

CARLOS EDUARDO RODRIGUES LOPES

**UMA REDE DE SENSORES SEM FIO
MULTICAMADA, MULTIMODAL PARA MONITORAÇÃO
AMBIENTAL**

Belo Horizonte
09 de agosto de 2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**UMA REDE DE SENSORES SEM FIO
MULTICAMADA, MULTIMODAL PARA MONITORAÇÃO
AMBIENTAL**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

CARLOS EDUARDO RODRIGUES LOPES

Belo Horizonte
09 de agosto de 2007

Resumo

A evolução da tecnologia das Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) em anos recentes permitiu o desenvolvimento de novas plataformas de nós sensores empregando as mais diversas modalidades de sensoriamento, em especial o sensoriamento visual com câmeras de vídeo. A pluralidade de dispositivos culminou com a criação de RSSFs que possuem elementos de rede heterogêneos organizados em camadas e com diferentes unidades sensoras. Estas redes, denominadas Redes de Sensores Sem Fio Multicamada, Multimodal (RSSF M²), são do interesse deste trabalho que tem por objetivos projetar, modelar, implementar e verificar o comportamento de uma RSSF M² para a monitoração ambiental. A rede de sensores desenvolvida emprega três perfis de nós sensores distribuídos em um hierarquia de camadas e utilizando duas modalidades de sensoriamento: radiação infravermelha e informação visual. Uma aplicação de monitoração ambiental utilizando rastreamento visual é definida como prova de conceitos da RSSF M².

No projeto e modelagem da rede são considerados aspectos como o uso inteligente de recursos e dos serviços de sensoriamento, processamento e disseminação da informação. Resultados obtidos em um ambiente de simulação indicam a abordagem multicamada, multimodal pelo menos 2,2 vezes mais econômica no consumo energético quando comparada a uma abordagem multicamada utilizando uma única modalidade de sensoriamento e pelos 11 vezes mais econômica quando comparada a uma abordagem que emprega sensores homogêneos. Esta economia no entanto, não representa uma redução na qualidade do sensoriamento da RSSF M². Um protótipo utilizando componentes, sensores e plataformas de sensoriamento disponíveis comercialmente foi também desenvolvido e demonstra a viabilidade da aplicação da tecnologia.

Abstract

The evolution of WSN technology observed over the last years, allowed the development of new sensor node platforms employing the most different sensing modalities, specially visual sensing with video cameras. This new sort of devices culminated with WSNs that use heterogeneous elements organized into node tiers with different sensing units. These nets, called Multi-tier, Multimodal Wireless Sensor Networks (WSN M²), are the object of study of this work. Dissertation objectives include the design, modeling, implementation and behavior analysis of a WSN M² for environmental monitoring. The proposed network employs three sensor node profiles hierarchically distributed into tiers that collect data from the environment using two distinct sensor modalities: infrared radiation and visual information. A visual tracking application is defined as a proof of concept for the WSN M².

During network design and modeling aspects such as sensor node's resources intelligent usage were considered. Sensing, processing and disseminating services were configured to work on demand, that is, the sensor nodes only executed these services whenever they were necessary to application. This behavior is the best fit for a visual sensing application where node's sensing and processing energy expenses have non negligible costs. Experimental results obtained through WSN simulation show that the multi-tier, multimodal approach is at least 2.2 times more economic concerning energy expenses when compared to a multi-tier network with a single sensing modality and at least 11 times more economic when compared to a single-tier homogeneous network. This energy savings however, do not sacrifice the WSN M² sensing quality. A network prototype using commercial off-the-shelf electronic components, sensors and node platforms was also developed. This prototype demonstrates the viability of the WSN M² technology for environmental monitoring.

*Para meus pais,
Luiza e Heli,
e minhas irmãs,
Camilla e Carol*

Agradecimentos

À professora Linnyer Beatrys Ruiz pela orientação no desenvolvimento deste trabalho e pela amizade construída ao longo deste período.

Aos professores Antônio Alfredo Loureiro, Arnaldo de Albuquerque Araújo e José de Souza Pio, não apenas pelas contribuições dadas a este trabalho, mas também pelos conselhos e ensinamentos transmitidos desde os tempos de minha iniciação científica.

Aos professores Hani Camille Yehia e Antônio de Pádua Braga que, por meio de suas disciplinas e comportamento, apresentaram a este Cientista da Computação a maneira “Engenharia” de ver o mundo.

Aos amigos Camillo Jorge Santos Oliveira e Flávio Humberto Cabral Nunes pelos bons momentos passados no NPDI – “... *tempo bom, não volta mais...*”.

Às amigas Fernanda Martins Vieira e Alina Gomide Vasconcelos sempre prontas a responder minhas dúvidas e fornecer conselhos valiosos.

Aos amigos do DCC pelas pré-estreias de cinema e jogatinas *on-line*, ao glorioso Knuthil Futebol Clube pelo entretenimento nas manhãs de sábado.

Ao Jéferson, Júlio e Helen que estiveram junto comigo durante todo o curso.

Aos membros minha família, tios, tias, primos e primas por sempre estarem dispostos a me escutar e me dar apoio (o 2502 é logo em cima).

Ao meu pai, minha mãe, Carol e Camilla por acreditarem em mim.

E a Deus por possibilitar tudo isto.

A todos o meu **Muito Obrigado!**

Sumário

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Objetivos | 2 |
| 1.2 | Contribuições | 3 |
| 1.3 | Organização do Texto | 4 |
| 2 | Referencial Teórico | 6 |
| 2.1 | Redes de Sensores Sem Fio | 6 |
| 2.1.1 | Características das RSSFs | 9 |
| 2.1.2 | Classificação das RSSFs | 10 |
| 2.2 | Redes de Sensores Visuais | 11 |
| 2.2.1 | Aplicações das RSSFs Visuais | 12 |
| 2.2.2 | Características das RSSFs Visuais | 12 |
| 2.3 | Redes de Sensores Multicamada, Multimodal | 16 |
| 2.3.1 | Características das RSSFs M^2 | 16 |
| 2.3.2 | Desafios de Projetos em RSSFs M^2 | 17 |
| 2.4 | Conclusão | 20 |
| 3 | Trabalhos Relacionados | 21 |
| 3.1 | Aplicações e Algoritmos | 21 |
| 3.1.1 | Aplicações de RSSFs M^2 | 21 |
| 3.1.2 | Rastreamento em RSSFs | 24 |
| 3.2 | Elementos de Hardware – Nós Sensores | 26 |
| 3.2.1 | Plataformas de Sensoriamento Visual | 26 |
| 3.2.2 | Dispositivos de Sensoriamento Visual | 31 |
| 3.2.3 | Quadro Resumo – Elementos de Sensoriamento Visual | 33 |
| 3.3 | Conclusão | 35 |
| 4 | Uma RSSF M^2 para Monitoração Ambiental | 36 |
| 4.1 | Aplicação da Rede: Rastreamento Visual | 37 |
| 4.2 | Organização das Camadas da Rede | 38 |
| 4.3 | Comportamento das Camadas da Rede | 40 |
| 4.3.1 | Máquinas de Estados Finitos Estendidas e Comunicantes | 40 |
| 4.3.2 | Primeira Camada | 42 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.3.3 | Segunda Camada | 43 |
| 4.3.4 | Terceira Camada | 43 |
| 4.4 | Processamento nas Camadas da Rede | 44 |
| 4.5 | Comunicação entre Camadas da Rede | 46 |
| 4.6 | Conclusão | 47 |
| 5 | Avaliação de Desempenho | 49 |
| 5.1 | Caracterização das Simulações | 50 |
| 5.1.1 | RSSF M ² | 52 |
| 5.1.2 | RSSF Visual Heterogênea Multicamada | 53 |
| 5.1.3 | RSSF Visual Homogênea | 54 |
| 5.2 | O Arcabouço MannaSim | 55 |
| 5.3 | Desempenho da RSSF M ² | 57 |
| 5.3.1 | Alcance de Comunicação | 57 |
| 5.3.2 | Tempo de Espera por Alvo | 60 |
| 5.3.3 | Velocidade do Alvo | 62 |
| 5.4 | Desempenho Comparativo | 66 |
| 5.5 | Conclusão | 71 |
| 6 | Implementação Real | 73 |
| 6.1 | Primeira Camada | 73 |
| 6.1.1 | MicaZ/PIR – Aspectos de Hardware | 74 |
| 6.1.2 | MicaZ/PIR – Aspectos de Software | 77 |
| 6.2 | Segunda Camada | 79 |
| 6.2.1 | MicaZ/CMUcam2 – Aspectos de Hardware | 79 |
| 6.2.2 | MicaZ/CMUcam2 – Aspectos de Software | 80 |
| 6.3 | Terceira Camada | 81 |
| 6.3.1 | PC/Webcam – Aspectos de Hardware | 81 |
| 6.3.2 | PC/Webcam – Aspectos de Software | 82 |
| 6.4 | Protótipo e Validação | 84 |
| 6.5 | Conclusão | 87 |
| 7 | Conclusão | 89 |
| A | Lista de Abreviações | 92 |
| B | Resultados dos Experimentos Simulados | 94 |
| B.1 | Desempenho da RSSF M ² | 95 |
| B.1.1 | Alcance de Comunicação | 95 |
| B.1.2 | Tempo de Espera por Alvo | 97 |
| B.1.3 | Velocidade do Alvo | 99 |
| B.2 | Desempenho Comparativo | 101 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Exemplos de nós sensores encontrados na literatura e/ou comercialmente. | 7 |
| 2.2 | Diferenças entre área de cobertura e campo de visão. | 15 |
| 3.1 | Plataforma de sensoriamento visual <i>Panoptes</i> | 28 |
| 3.2 | Plataforma de sensoriamento visual <i>Stargate</i> | 29 |
| 3.3 | Plataforma de sensoriamento visual <i>MeshEye</i> | 31 |
| 3.4 | Dispositivo de sensoriamento visual <i>CMUcam2</i> | 31 |
| 3.5 | Dispositivo de sensoriamento visual <i>Cyclops</i> | 32 |
| 4.1 | Representação lógica de uma RSSF M^2 para monitoração ambiental. | 37 |
| 4.2 | Funcionamento de um sensor PIR de dois elementos piroelétricos. | 39 |
| 4.3 | Diagrama de transição de estados representando um MEFEC. | 41 |
| 4.4 | Transição de estados de operação dos nós sensores da primeira camada. | 42 |
| 4.5 | Transição de estados de operação dos nós sensores da segunda camada. | 44 |
| 4.6 | Transição de estados de operação dos nós sensores da terceira camada. | 45 |
| 5.1 | Configurações do sensor infravermelho passivo. | 50 |
| 5.2 | Configurações dos nós sensores do perfil MicaZ/CMUcam2. | 51 |
| 5.3 | Exemplo de topologia da RSSF M^2 empregada durante simulações. | 54 |
| 5.4 | Diagrama de classes do MannaSim. | 55 |
| 5.5 | Energia versus Alcance do rádio (MicaZ/PIR). | 58 |
| 5.6 | Energia (Transmissão e Recepção) versus Alcance do rádio (MicaZ/PIR). | 59 |
| 5.7 | Energia (Sensoriamento e Transmissão) versus Alcance do rádio (MicaZ/PIR). | 59 |
| 5.8 | Uso efetivo versus Alcance do rádio (MicaZ/PIR). | 60 |
| 5.9 | Energia versus Tempo de espera por alvo. | 61 |
| 5.10 | Energia (Sensoriamento e Processamento) versus Tempo de espera por alvo. | 62 |
| 5.11 | Uso efetivo versus Tempo de espera por alvo. | 63 |
| 5.12 | Energia versus Velocidade do alvo. | 63 |
| 5.13 | Energia (Transmissão e Recepção) versus Velocidade do alvo. | 64 |
| 5.14 | Energia (Sensoriamento e Processamento) versus Velocidade do alvo. | 64 |
| 5.15 | Uso efetivo versus Velocidade do alvo. | 65 |
| 5.16 | Atraso de primeira observação versus Velocidade do alvo. | 66 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.17 | Consumo energético amortizado entre os elementos de cada uma das RSSFs consideradas. | 67 |
| 5.18 | Consumo energético (Transmissão e Recepção) das RSSFs consideradas. | 68 |
| 5.19 | Consumo energético (Sensoriamento e Processamento) das RSSFs consideradas. | 69 |
| 5.20 | Atraso de primeira observação das RSSFs consideradas. | 69 |
| 5.21 | Latência das RSSFs consideradas. | 70 |
| 5.22 | Uso efetivo dos sensores visuais das RSSFs consideradas. | 70 |
| 6.1 | Circuito de condicionamento de sinal utilizando amplificadores de instrumentação. | 75 |
| 6.2 | Circuito de condicionamento de sinal utilizando o CI KC778b. | 76 |
| 6.3 | Configuração final do conjunto MicaZ/PIR. | 77 |
| 6.4 | Cabelhaço das mensagens disseminadas pelos nós sensores da RSSF M ² | 78 |
| 6.5 | Configuração final do conjunto MicaZ/CMUcam2. | 79 |
| 6.6 | Configuração final do conjunto PC/Webcam. | 82 |
| 6.7 | Telas do aplicativo camShift com um alvo simulado. | 85 |
| 6.8 | Distribuição dos nós sensores do protótipo da RSSF M ² para monitoração ambiental em uma área retangular de 5 × 8 m ² | 86 |
| 6.9 | Regiões observadas através das lentes dos sensores visuais utilizados pelos nós sensores dos perfis MicaZ/CMUcam2 e PC/Webcam. | 86 |

Lista de Tabelas

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Exemplos de nós sensores encontrados na literatura e/ou comercialmente. | 8 |
| 2.2 | Volumes de dados produzidos por diferentes tipos de sensores. | 13 |
| 3.1 | Principais elementos hardware para o sensoriamento visual considerados. | 34 |
| 5.1 | Potência dissipada por operação dos perfis de nós sensores. | 52 |
| 5.2 | Quantidade de nós sensores utilizada em cada um dos cenários considerados. | 67 |
| 6.1 | Resultados experimentais para circuito de condicionamento com INA116 | 76 |
| 6.2 | Resultados experimentais para circuito de condicionamento com o CI KC778b | 77 |
| 6.3 | Parâmetros para comunicação serial MicaZ – <i>CMUcam2</i> | 80 |
| 6.4 | Resultados experimentais da validação do protótipo da RSSF M ² | 87 |
| B.1 | Consumo energético frente às variações no alcance de comunicação. | 95 |
| B.2 | Consumo energético, no serviço de comunicação (transmissão), frente às variações no alcance de comunicação. | 95 |
| B.3 | Consumo energético, no serviço de comunicação (recepção), frente às variações no alcance de comunicação. | 96 |
| B.4 | Consumo energético, no serviço de sensoriamento, frente às variações no alcance de comunicação. | 96 |
| B.5 | Consumo energético, no serviço de processamento, frente às variações no alcance de comunicação. | 96 |
| B.6 | Uso efetivo dos sensores visuais frente às variações no alcance de comunicação. | 96 |
| B.7 | Consumo energético frente às variações no tempo de espera por alvo. | 97 |
| B.8 | Consumo energético, no serviço de comunicação (transmissão), frente às variações no tempo de espera por alvo. | 97 |
| B.9 | Consumo energético, no serviço de comunicação (recepção), frente às variações no tempo de espera por alvo. | 98 |
| B.10 | Consumo energético, no serviço de sensoriamento, frente às variações no tempo de espera por alvo. | 98 |
| B.11 | Consumo energético, no serviço de processamento, frente às variações no tempo de espera por alvo. | 98 |
| B.12 | Uso efetivo dos sensores visuais frente às variações no tempo de espera por alvo. | 98 |
| B.13 | Consumo energético frente às variações na velocidade de deslocamento do alvo. | 99 |

| | |
|--|-----|
| B.14 Consumo energético, no serviço de comunicação (transmissão), frente às variações na velocidade de deslocamento do alvo. | 99 |
| B.15 Consumo energético, no serviço de comunicação (recepção), frente às variações na velocidade de deslocamento do alvo. | 100 |
| B.16 Consumo energético, no serviço de sensoriamento, frente às variações na velocidade de deslocamento do alvo. | 100 |
| B.17 Consumo energético, no serviço de processamento, frente às variações na velocidade de deslocamento do alvo. | 100 |
| B.18 Uso efetivo dos sensores visuais frente às variações na velocidade de deslocamento do alvo. | 100 |
| B.19 Atraso de primeira observação frente às variações na velocidade de deslocamento do alvo. | 101 |
| B.20 Consumo energético amortizado frente às variações nas dimensões da área monitorada. | 101 |
| B.21 Consumo energético, no serviço de comunicação (transmissão), amortizado frente às variações nas dimensões da área monitorada. | 102 |
| B.22 Consumo energético, no serviço de comunicação (recepção), amortizado frente às variações nas dimensões da área monitorada. | 102 |
| B.23 Consumo energético, no serviço de sensoriamento, amortizado frente às variações nas dimensões da área monitorada. | 102 |
| B.24 Consumo energético, no serviço de processamento, amortizado frente às variações nas dimensões da área monitorada. | 102 |
| B.25 Atraso de primeira observação frente às variações nas dimensões da área monitorada. | 103 |
| B.26 Latência das RSSFs frente às variações nas dimensões da área monitorada. | 103 |
| B.27 Uso efetivo dos sensores visuais frente às variações nas dimensões da área monitorada. | 103 |

Capítulo 1

Introdução

Formações vegetais do território brasileiro tais como, a Floresta Amazônica, fragmentos remanescentes da Mata Atlântica e a região do Cerrado, possuem uma rica biodiversidade que precisa ser conhecida, monitorada e preservada. O país abriga entre 10% e 20% das espécies do planeta; ocupa o primeiro lugar em espécies conhecidas de mamíferos, peixes de água doce e plantas superiores; fica em segundo lugar em anfíbios, terceiro em aves, quinto lugar em répteis e está entre os cinco países com maior número de espécies endêmicas, isto é, que existem apenas no território brasileiro [61]. Muito desta biodiversidade vem sendo destruída por atividades econômicas empreendidas pelos seres humanos.

Uma maneira utilizada por pesquisadores brasileiros e franceses para investigar os efeitos da presença do homem no comportamento de espécies silvestres tem sido por meio da utilização de armadilhas fotográficas [17]. Nestas armadilhas, um sensor de movimento aciona uma câmera fotográfica sempre que um animal passa diante do equipamento. Estas câmeras ajudam a confirmar a presença dos animais, saber por onde eles costumam andar e conhecer melhor o comportamento das espécies. A necessidade de percorrer todas as armadilhas com o objetivo de verificar o seu estado (se foi disparada ou não) pode ser tornar um inconveniente à utilização deste método em áreas maiores com maior quantidade destes dispositivos. Ainda assim, em apenas dois anos de trabalho, a pesquisa conseguiu aumentar de 45 para 98 o número de espécies de mamíferos registradas na região de estudo.

A tecnologia das Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) se apresenta como uma solução natural para auxiliar os esforços de monitoração e preservação dos recursos naturais do país. Uma RSSF é uma ferramenta para o sensoriamento distribuído de fenômenos ambientais, processamento de dados e disseminação de informações para um ou mais observadores. A ubiquidade dos elementos destas redes, os chamados nós sensores, tem aberto novas perspectivas para a monitoração ambiental. Nas RSSFs, os nós sensores são depositados ou lançados em uma região e de maneira autônoma formando uma rede *ad hoc* para a monitoração do ambiente [59].

Uma tendência de pesquisa recente na área das RSSFs está relacionada ao sensoriamento multimídia, isto é, coletar dados audiovisuais dos ambientes monitorados. O foco deste são as RSSFs onde câmeras de vídeo são acopladas aos nós sensores da rede. Tais redes são

denominadas Rede de Sensores Sem Fio Visuais (RSSFs Visuais) e representam uma mudança de paradigma no desenvolvimento de aplicações da tecnologia das RSSFs [22, 53, 62]. Em uma RSSF tradicional que não utiliza sensoriamento multimídia, o consumo energético de um nó sensor é dominado pela disseminação de informação. Para as RSSFs Visuais, embora este consumo seja relevante, a coleta e o processamento de dados apresentam valores significativos no orçamento energético do nó sensor e portanto, não podem ser negligenciados (característica comum às RSSFs tradicionais).

Um maneira de lidar com o perfil energético das RSSFs visuais consiste da utilização de esquemas de ciclos de trabalho (*duty cycles*) onde períodos de atividade dos sensores visuais são intercalados a períodos ociosos [51]. Outra abordagem é fazer uso dos sensores visuais somente quando necessário, ou seja, no momento da ocorrência de eventos de interesse como na passagem de um animal, por exemplo. Este comportamento baseado em eventos, no entanto, requer a existência de procedimentos e dispositivos atentos à ocorrência destes eventos de interesse.

Avanços recentes nas comunicações sem fio, o desenvolvimento de circuitos integrados de menor consumo energético e maior capacidade de processamento, além da miniaturização de componentes eletrônicos podem ajudar na criação do comportamento baseado em eventos para as RSSFs Visuais. Tais avanços possibilitaram o desenvolvimento de uma vasta coleção de sensores e plataformas de sensoriamento. Assim, é possível empregar nós sensores distintos, utilizando diferentes modalidades de sensoriamento, para a realização de um objetivo comum, como o rastreamento das RSSFs Visuais. Uma rede de sensores como a descrita acima e que tenha seus elementos de rede organizados em camadas é denominada uma Rede de Sensores Sem Fio Multicamada, Multimodal (RSSF M²) [40, 41].

1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo estudar a tecnologia das RSSFs M², suas possibilidades e limitações em vista de sua utilização em ações de monitoração e preservação do meio ambiente assim como, identificar diferenças entre as RSSFs Visuais e as RSSFs M² que utilizam sensoriamento visual.

Com estes objetivos, esta dissertação propõe o projeto, modelagem e desenvolvimento de uma RSSF M² para a monitoração ambiental utilizando sensoriamento visual. Uma aplicação de rastreamento visual é desenvolvida como prova de conceitos. A RSSF M² projetada é constituída por nós sensores distintos distribuídos, hierarquicamente, em três camadas que empregam duas modalidades de sensoriamento, a saber, o sensoriamento de radiação infravermelha e o sensoriamento de informação visual. A utilização de três camadas decorre das principais tarefas necessárias ao rastreamento visual: *i*) detecção, *ii*) identificação e *iii*) rastreamento de um alvo.

Neste trabalho, o comportamento da RSSF M² é modelado por máquinas de estados finitos estendidas e comunicantes (MEFECs) [5] específicas para cada uma das camadas da rede. Nestas MEFs, os estados representam ações executadas pelos nós sensores e as transições

são desencadeadas por eventos do ambiente como a detecção da presença de intrusos ou o fim de um temporizador. Esta abordagem permite o uso de maneira consciente dos recursos dos nós sensores e por consequência da RSSF M^2 como um todo.

Na RSSF M^2 proposta, a primeira camada de nós sensores emprega elementos de capacidade computacional reduzida no sensoriamento contínuo dos níveis de radiação infravermelha no ambiente monitorado procurando assim, detectar a presença de intrusos (eventos de interesse). As segunda e terceira camadas utilizam sensores visuais (câmeras de vídeo) e se comportam de maneira reativa aos eventos disparados por camadas inferiores.

Avaliações baseadas em simulação foram utilizadas para a verificação da eficiência da RSSF M^2 em termos de consumo de energia, atraso de primeira observação e uso efetivo dos sensores visuais. O comportamento da RSSF M^2 foi avaliado também, frente à duas outras abordagens, uma RSSF Visual Multicamada utilizando apenas uma modalidade de sensoriamento e uma RSSF Visual Unicamada com nós sensores homogêneos. Esta segunda análise mediu a eficiência das redes em termos de consumo de energia, atraso de primeira observação, uso efetivo dos sensores visuais, latência média na disseminação de mensagens e escalabilidade das redes com relação ao aumento da área monitorada. A viabilidade do desenvolvimento de uma RSSF M^2 para monitoração ambiental utilizando sensoriamento visual foi comprovada por meio da implementação de um protótipo da rede utilizando componentes, sensores e plataformas disponíveis comercialmente.

Não são objetivos do trabalho o desenvolvimento de novos algoritmos de rastreamento visual e nem o desenvolvimento de novos protocolos de roteamento e disseminação de informação para RSSFs. No contexto deste trabalho, foram adotadas soluções propostas por outros autores. Novas soluções para estes desafios são oportunidades para trabalhos futuros.

1.2 Contribuições

O desenvolvimento e a avaliação de uma RSSF M^2 para a monitoração ambiental resultam nas seguintes contribuições:

- O projeto, modelagem e implementação de uma RSSF M^2 para monitoração ambiental empregando elementos sensores distintos distribuídos em três camadas e utilizando sensoriamento de radiação infravermelha e informação visual.
- Avaliação comparativa do desempenho de três diferentes modelos de RSSFs para monitoração ambiental utilizando sensoriamento visual tendo em vista parâmetros como o consumo de energia, atraso de primeira observação, uso efetivo dos sensores visuais, latência média na disseminação de mensagens e escalabilidade das redes com relação ao aumento da área monitorada.
- Implementação de extensões ao simulador NS-2 e ao arcabouço MannaSim (aplicações, modelos de geração de dados multimídia e radiação infravermelha, modelos de plataformas de sensoriamento) que simplificam a criação de simulações de redes de sensores sem fio multicamada, multimodal.

- Implementação de um protótipo da RSSF M^2 para monitoração ambiental proposta por meio de uma aplicação de rastreamento visual que emprega componentes eletrônicos, sensores e plataformas disponíveis comercialmente.
- Projeto e desenvolvimento de um dispositivo de sensoriamento infravermelho (contendo sensor e circuito de condicionamento de sinal) específico para nós sensores da plataforma MicaZ, padrão *de facto* em aplicações comerciais e em projetos de pesquisa.

Durante o desenvolvimento da dissertação, alguns resultados parciais do trabalho foram aceitos para publicação em uma conferência internacional [44] e outros estão sob revisão. Resultados não relacionados diretamente ao tema desta dissertação foram publicados em um evento nacional [43].

1.3 Organização do Texto

O texto da dissertação está organizado em sete capítulos. O Capítulo 2 apresenta a teoria das RSSFs, seus principais conceitos, classificação, usos e características que fazem desta tecnologia uma área de pesquisa única no estudo das redes de computadores. A fim de ampliar o embasamento teórico a respeito de temas tratados ao longo do texto, o capítulo apresenta também características e particularidades a respeito das RSSFs Visuais e das RSSFs M^2 . São descritas as mudanças no paradigma das RSSFs introduzidas pelas RSSFs Visuais e desafios de pesquisa relacionados às RSSFs M^2 .

O Capítulo 3 lida com o estado da arte no que se refere às aplicações da tecnologia das RSSFs M^2 . São apresentadas também, aplicações que lidam com o rastreamento no âmbito das RSSFs em geral, isto é, redes distribuídas em uma ou mais camadas e utilizando quaisquer modalidades de sensoriamento. O texto revisa ainda os principais elementos de hardware para a realização do sensoriamento visual.

A RSSF M^2 para monitoração ambiental desenvolvida neste trabalho é apresentada no Capítulo 4. Uma breve discussão a respeito de características comuns às aplicações de rastreamento visual introduz o texto do capítulo, além de fornecer argumentos para as decisões de projeto realizadas. Em seguida, são apresentadas a organização da RSSF M^2 descrevendo os papéis e funções de suas camadas, a modelagem do comportamento esperado pelos nós sensores e a maneira como a rede lida com o processamento das informações coletadas. Aspectos relacionados à comunicação dos elementos da RSSF M^2 , como a disseminação de informações processadas são também tratados neste capítulo.

No Capítulo 5, é realizada a avaliação do funcionamento da RSSF M^2 em um ambiente de simulação. A avaliação é constituída de duas etapas, uma avaliação do comportamento da RSSF M^2 e uma avaliação comparativa entre esta rede e duas outras abordagens utilizadas no desenvolvimento de aplicações de monitoração ambiental. Durante a primeira etapa são considerados três cenários. Nestes cenários, o comportamento da rede é avaliado com base em alterações no alcance de comunicação dos nós sensores da primeira camada, no intervalo de

sensoriamento dos sensores visuais e na velocidade de deslocamento do alvo na região monitorada. Na segunda etapa, o comportamento das redes simuladas, bem como a escalabilidade das mesmas, é avaliado variando as dimensões da área monitorada.

O Capítulo 6 é focado na descrição e implementação de um protótipo da RSSF M^2 para monitoração ambiental. O desenvolvimento dos conjuntos sensores/plataforma é descrito com base nos componentes eletrônicos, sensores e plataformas de sensoriamento utilizados em cada uma das camadas da RSSF M^2 . São discutidos ainda, aspectos relacionados ao software embutido nos nós sensores com atenção especial aos algoritmos de identificação e rastreamento visual.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões obtidas a partir das simulações e implementação do protótipo da RSSF M^2 . Também, são apresentadas possíveis extensões à RSSF M^2 e discutidos trabalhos futuros.

Capítulo 2

Referencial Teórico

Neste capítulo, é apresentada um visão geral da tecnologia das Redes de Sensores sem Fio (RSSFs) e em particular o conceito das Redes de Sensores Multicamada, Multimodal, suas principais características e oportunidades de pesquisa.

As RSSFs têm se apresentado como um promissor ramo pesquisa na comunidade científica de redes de computadores uma vez que propõem novos desafios e uma variedade de problemas ainda não estudados ou incipientes. Toda esta atividade tem proporcionado o surgimento de especializações das RSSFs como, por exemplo, as Redes de Sensores Visuais, redes que utilizam câmeras de vídeo como sensores. As oportunidades introduzidas pelas redes visuais juntamente com os avanços da tecnologia de sensores e plataformas de sensoriamento conduziram ao surgimento das Redes de Sensores Multicamada, Multimodal.

O texto do capítulo está assim organizado, a Seção 2.1 apresenta as RSSFs, seus conceitos e características. A Seção 2.2 trata das Redes de Sensores Visuais, dado destaque às diferenças com relação a uma RSSF tradicional, os conceitos e desafios das Redes de Sensores Multicamada, Multimodal são listados na Seção 2.3. A Seção 2.4 encerra o capítulo fornecendo conclusões e apontando direções para o desenvolvimento desta dissertação.

2.1 Redes de Sensores Sem Fio

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) são um tipo especial de redes *ad hoc* para a coleta, processamento e disseminação por meio de comunicação sem fio, de informações¹ sobre fenômenos ocorridos em uma região de interesse. Uma RSSF representa o desafio da criação de um sistema distribuído de grande escala, fortemente inserido no mundo físico, com severas restrições de recursos e que seja capaz de operar por longos períodos mantendo um desempenho mínimo [65].

Os elementos de uma RSSF, conhecidos como nós sensores, são constituídos por uma unidade de comunicação para disseminação e troca de informações entre elementos internos e

¹No contexto deste trabalho, os termos dado e informação possuem significados distintos. O primeiro refere-se ao material coletado pelos sensores, ou seja, valores e medições em estado bruto. O segundo remete ao dado sensoreado após receber alguma forma de processamento, ou seja, é informação extraída a partir de dados brutos.

externos à rede; uma unidade computacional (processador e memória) para a manipulação e o armazenamento temporário dos dados coletados; uma ou mais unidades sensoras responsáveis pela coleta dos dados do ambiente e um reservatório de energia (quase sempre finito) que fornece recursos para as demais unidades. É esperado que estes elementos apresentem, em um futuro próximo, custo financeiro reduzido (apenas alguns centavos) e dimensões mínimas (poucos mm³). A Figura 2.1 apresenta exemplos de nós sensores comerciais como a família *Mica Motes* [32] e o *Stargate* [33], ambos da *Crossbow Technology* [34] e de projetos de plataformas sensoras encontradas na literatura como o *Smart Dust* [67] e o *XSM* [20], da Universidade da Califórnia, Berkeley, o *XYZ Mote* [48], da Universidade de Yale e o *iMotel* [39], desenvolvido pela *Intel Research*. As características do hardware desses nós sensores são apresentadas na Tabela 2.1. Observando os valores desta tabela, nota-se que, de maneira geral, nós sensores são dispositivos limitados no que diz respeito a capacidade de processamento, armazenamento e disseminação (largura de banda) de informações.

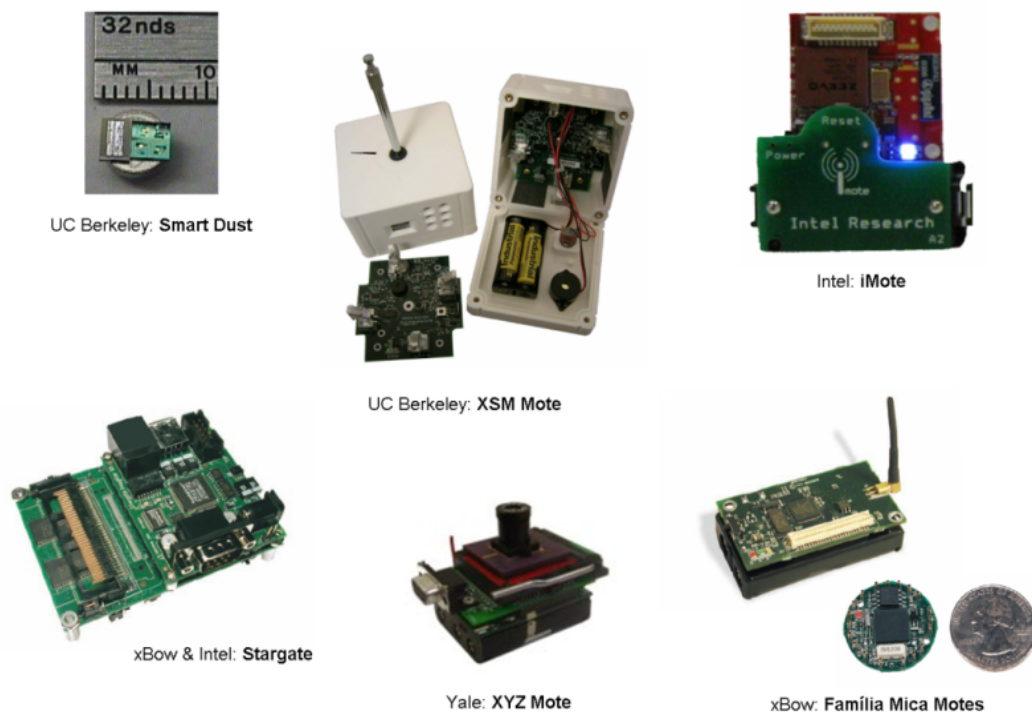


Figura 2.1: Exemplos de nós sensores encontrados na literatura e/ou comercialmente.

Em uma aplicação típica da tecnologia de RSSF, os nós sensores são depositados em áreas remotas, muitas vezes ambientes hostis, inóspitos ou de desastres, e por meio de cooperação entre seus pares, estabelecem uma rede para a monitoração de uma região de interesse. Esta fase inicial da RSSF é denominada *boot up* da rede e envolve atividades de descoberta de localização (*self-discovery*) e organização (*self-organization*) dos nós sensores [59]. A maneira como uma RSSF gerencia a si própria confere a ela as características de uma rede autônoma [2].

Estabelecida a rede, a operação de uma RSSF está relacionada à execução de três serviços

| | Processador | Memória | Rádio |
|------------------------|---|------------------|--|
| <i>MicaZ</i> [32] | Atmel ATmega128L 8 bits RISC 7,3728 MHz | 512 Kbytes Flash | Chipcom CC2420 IEEE 802.15.4 2,4 GHz 250 kbps |
| <i>Stargate</i> [33] | Intel PXA255 32 bits RISC 400 MHz | 64 Mbytes RAM | Cartão PCMCIA IEEE 802.11b 2,4 GHz 11 Mbps |
| <i>Smart Dust</i> [67] | Design proprietário 12 bits RISC 8 MHz | 8 Kbytes SRAM | <i>Optical Radio</i> 1 Mbps |
| <i>XSM</i> [20] | Atmel ATmega128L 8 bits RISC 7,3728 MHz | 512 Kbytes Flash | Chipcom CC1000 315–916 MHz 38,4 kbps |
| <i>XYZ</i> [48] | OKI ML67Q5002 32 bits RISC 57,6 MHz | 256 Kbytes Flash | Chipcom CC2420 IEEE 802.15.4 2,4 GHz 250 kbps |
| <i>iMote</i> [39] | ARM7 32 bits RISC 12 MHz | 512 Kbytes Flash | Zeevo TC2001 Bluetooth Radio 2,4 GHz 720 kbps |

Tabela 2.1: Exemplos de nós sensores encontrados na literatura e/ou comercialmente – características do hardware.

principais: *i*) sensoriamento, *ii*) processamento e *iii*) disseminação. Obviamente, as RSSFs podem desempenhar outras tarefas que no entanto, não as caracterizam como uma RSSF. No serviço de sensoriamento são coletados dados obtidos pelas unidades sensoras dos elementos da rede a respeito do ambiente monitorado (fenômenos físicos, imagens, áudio, dentre outros). O serviço de processamento é o responsável por analisar os dados sensoreados e extrair deles informações úteis à aplicação. Cabe ao serviço de disseminação transmitir a informação produzida a outros nós sensores da rede ou a algum observador externo utilizando um ou mais nós sorvedouros (*sink nodes*). Um nó sorvedouro é um nó sensor que recebe a informação coletada por outros nós sensores da RSSF. Nós sorvedouros diferem de outros tipos de nós sensores nos seguintes aspectos: possuem maior suprimento energético, maior alcance de comunicação (rádio) e não realizam sensoriamento [59]. A disseminação de informação nas RSSF é, em geral, realizada em múltiplos saltos (ou *hops*²), ou seja, os dados sensoreados são retransmitidos de nó sensor-em-nó sensor até atingirem o nó sorvedouro. A comunicação com redes externas ocorre por meio nós sorvedouros que desempenham também a função de *gateway* que são também chamados de, sendo então conhecidos como pontos de acesso (PAs).

Cenários possíveis à aplicação da tecnologia das RSSF incluem monitoração e controle ambiental, segurança, sistemas médicos e biológicos, uso militar, monitoração e controle de

²O termo *multi-hop* é comumente utilizado para designar esta forma de comunicação.

processos industriais, etc [1, 24, 49, 50, 69].

2.1.1 Características das RSSFs

As RSSFs possuem muitas particularidades que, não apenas as tornam diferentes de outras redes, como ainda impactam significativamente a maneira como as aplicações destinadas a estas redes devem ser desenvolvidas.

Dependência de Aplicação

Uma solução em RSSFs é específica para a aplicação em questão, ou seja, decisões e implementações realizadas em um projeto podem não ser aplicáveis a outros. O tipo de aplicação influencia diretamente nas funções exercidas por um nó da rede, assim como na arquitetura da rede, na quantidade de nós que compõem a rede, na distribuição e disposição dos nós sensores no ambiente, na escolha dos protocolos da pilha de comunicação, no tipo de dado a ser tratado, no tipo de serviço a ser provido pela rede e, conseqüentemente, no tempo de vida dessa rede.

Restrições de Energia

Baterias são a principal fonte energética dos elementos de rede de uma RSSF caracterizando então, a energia como um recurso finito. A substituição das baterias esgotadas pode ser inviável em um cenário onde uma aplicação utiliza milhares de nós sensores depositados em áreas remotas, muitas vezes hostis. Além disso, é esperado que uma aplicação continue produtiva por períodos muitas vezes superiores a um ano. A otimização do uso dos recursos energéticos é então, não só encorajado, como indispensável para as RSSFs. Tarefas e dispositivos energeticamente mais dispendiosos devem ser acionados somente em momentos oportunos e de forma otimizada. O projeto de uma RSSF deve, portanto, ser conduzido considerando severas restrições de energia.

Restrições de Hardware

Como apresentado neste capítulo, os elementos de rede de uma RSSF apresentam dimensões reduzidas, em sua maioria apenas alguns cm^3 . Este requisito leva à utilização de dispositivos miniaturizados e impõe aos elementos de rede severas restrições de hardware. Os dispositivos de processamento geralmente possuem baixo *clock* e não executam operações em ponto flutuante (existem exceções como a plataforma Stargate [33], por exemplo). As memórias (principal e secundária) de um nó sensor armazenam dados da ordem de algumas centenas de Kbytes e seus dispositivos de comunicação apresentam curto alcance e baixa taxa de transmissão de dados.

O ambiente restrito dos elementos de rede das RSSFs no entanto, não reduz as possibilidades de aplicação desta tecnologia. Como será apresentando adiante neste capítulo, quando organizados e um objetivo único diferentes nós sensores simples criam aplicações relevantes.

Autonomia

Uma vez que as RSSFs são depositadas em áreas remotas e inóspitas – florestas, desertos, áreas glaciais, ambientes de desastres, campos de batalha – é desejado que as mesmas operem com pouca ou nenhuma supervisão humana direta (aos seres humanos caberia apenas “trabalhar” com as informações sensoriadas).

Fluxo Unidirecional de Mensagens

Aplicações da tecnologia de RSSFs possuem o objetivo comum de disseminar a informação produzida para o mundo exterior à rede utilizando o sorvedouro (para um observador externo ou mesmo para outra rede como a Internet, por exemplo). Desta forma, o fluxo de informação dentro da rede tende a ser direcionado, na maioria das aplicações, ao sorvedouro e não aos nós sensores que compõem a RSSF.

Topologia Dinâmica

Uma RSSF possui topologia dinâmica mesmo quando seus elementos de rede são estáticos. Nós sensores podem sair de serviço ao serem desligados para manutenção da densidade de cobertura ou para poupar energia. Podem ainda esgotar seu suprimento de energia ou mesmo ser destruídos por algum evento no ambiente de monitoração. Implícito neste conceito, encontra-se outra característica importante: *no mundo das RSSFs falhas não são exceções*.

2.1.2 Classificação das RSSFs

A classificação de uma RSSF depende de seus objetivos e área de aplicação. No âmbito desta dissertação, a classificação das RSSFs é realizada com base no modelo funcional proposto por Ruiz [59]. Segundo este modelo, as redes de sensores sem fios são classificadas segundo sua configuração, sensoriamento, processamento e comunicação (disseminação³). O restante da seção apresenta maiores detalhes sobre o modelo.

Para as RSSFs, no que diz respeito à configuração, uma rede é dita *homogênea* quando todos os elementos de rede que a compõem possuem as mesmas configurações de hardware (é possível que nós executem software diferentes). Quando a rede é formada por nós sensores com configurações de hardware distintas a rede é dita *heterogênea*.

Uma RSSF pode, também, ser classificada como *plana* ou *hierárquica*. Neste último caso, os nós sensores são organizados em grupos (ou *clusters*) e cada grupo possui um líder (ou

³No contexto deste trabalho os termos comunicação e disseminação são considerados sinônimos.

cluster-head) que coordena seu funcionamento. Se a rede hierárquica for também homogênea, existe a necessidade de, periodicamente, alguns nós serem eleitos líderes dos vários grupos que irão compor a rede. Em redes heterogêneas, os nós sensores de maior capacidade (de processamento, memória ou alcance de comunicação) assumem a liderança dos grupos durante o período de vida da rede. Quando os elementos de rede não estão organizados em grupos, a rede é considerada plana.

Uma RSSF é *estática* quando têm seus nós sensores estacionários, ou seja, imóveis. De forma contrária, a rede é dita *móvel*. Novamente, deve ser observado que, mesmo estática, a rede de sensores ainda pode apresentar topologia dinâmica. Com relação à distribuição dos nós sensores, uma RSSF é *balanceada* quando tem seus elementos de rede distribuídos uniformemente na área de monitoração. A rede pode ainda ser *densa* ou *esparça* dependendo do número de nós sensores por unidade de área.

O sensoriamento é uma atividade chave para as RSSFs, variando conforme o fenômeno tratado pela aplicação. As RSSFs podem realizar o sensoriamento de forma *contínua*, onde os sensores permanecem coletando dados continuamente durante todo o tempo de vida da rede; *periódica*, onde os sensores coletam dados em intervalos determinados pela aplicação; *reativa*, onde os sensores coletam dados em resposta a um evento específico ou quando solicitados (através de um observador externo ou outro nó sensor). Uma abordagem híbrida, onde tipos de sensoriamento diversos coexistem em uma mesma RSSF, também pode ocorrer.

Após o sensoriamento, é realizado algum tipo de processamento nos dados coletados. De uma forma geral este processamento tem por objetivos reduzir o volume do dados a ser transmitido e extrair algum conhecimento a partir da informação em seu estado puro. Uma lista abrangente de formas de processamento dos dados sensorizados é apresentada em [59].

Com relação à comunicação, as RSSFs são classificadas em *contínua*, *periódica*, *sob demanda* e *baseada em eventos*. Na disseminação contínua os nós sensores transmitem os dados coletados continuamente durante todo o tempo de vida da rede; na disseminação periódica os nós sensores transmitem os dados coletados em intervalos determinados pela aplicação; na disseminação sob demanda, a transmissão dos dados é realizada mediante à requisição dos mesmos por um observador externo ou um outro nó sensor; finalizando, na disseminação baseada em eventos os nós sensores transmitem os dados coletados em resposta a um evento específico no ambiente onde a rede esta inserida.

2.2 Redes de Sensores Visuais

Desde os primeiros trabalhos relacionados às RSSFs, aplicações reais da tecnologia têm se concentrado na monitoração de parâmetros ambientais como temperatura [49], campo magnético [1, 24], umidade relativa do ar [49], variações de movimento [69]. Os dados coletados nestas aplicações são ditos simples: a leitura do sensor fornece apenas alguns bits que caracterizam o ambiente no momento do sensoriamento. Dados mais complexos e com maior densidade de informação como áudio e vídeo (informação multimídia em geral) somente agora têm despertado o interesse da comunidade acadêmica.

Neste trabalho, além do sensoriamento tradicional⁴, o sensoriamento de dados multimídia é considerado, em especial dados visuais (vídeos e imagens). É necessário então, definir as redes de sensores que tratam de informações visuais, as chamadas Redes de Sensores Visuais (RSSFs Visuais). Uma Rede de Sensores Visuais é uma RSSF cujos nós, além de utilizarem comunicação sem fio, possuem sensores visuais (câmeras de vídeo) e apresentam poder computacional suficiente para executar rotinas de análise de imagens [53].

2.2.1 Aplicações das RSSFs Visuais

Muitas aplicações podem se beneficiar das informações mais ricas em detalhes proporcionadas por uma RSSF Visual. Alguns exemplos destas aplicações são listados abaixo:

- **monitoração ambiental**, onde os nós sensores visuais são utilizados para a observação do comportamento de espécies selvagens em seu habitat natural com o mínimo de interferência humana ou, ainda, para a monitoração de áreas remotas;
- **segurança**, onde os nós sensores visuais são utilizados para a detecção, identificação e alerta a respeito de possíveis intrusos em áreas de acesso restrito ou de grande movimento (aeroportos, estádios, fábricas);
- **robótica**, onde os nós sensores visuais auxiliam a navegação expandindo o campo de visão de robôs;
- **situações de emergência**, onde os nós sensores visuais são utilizados em regiões de conflito ou de desastre para extrair a maior quantidade de informação visual no menor intervalo de tempo possível, provendo às equipes de resgate informações críticas a respeito do incidente uma vez que a infra-estrutura pré-existente pode estar indisponível ou destruída;
- **ambientes inteligentes para videoconferências** (também conhecidos por *smart rooms*), onde os nós sensores visuais interagem entre si oferecendo a melhor visão do locutor em um dado instante.

As RSSFs visuais têm ganhado popularidade ainda que o custo financeiro dos elementos de rede sejam proibitivos em situações onde centenas ou milhares de nós sensores devem operar em áreas remotas. Uma plataforma de sensoriamento visual como o *Stargate* [33], por exemplo, é comercializada por aproximadamente US\$ 925 (valor praticado pela *Crossbox Technology* [34]). Detalhes a respeito desta plataforma são apresentados na Seção 3.2.1.

2.2.2 Características das RSSFs Visuais

Um dos principais desafios de uma RSSF visual é a forma com a qual a rede lida com a quantidade de dados gerada por seus sensores. Na Tabela 2.2, são apresentados, a título

⁴No contexto deste trabalho, o sensoriamento de parâmetros ambientais como temperatura, umidade, campo magnético dentre outros, será também chamado de sensoriamento tradicional.

de comparação, o volume de dados produzidos por diferentes tipos de sensores (visuais e tradicionais) em 1 (um) segundo de sensoriamento. Para os sensores visuais, o volume de dados, corresponde à captura de vídeo sem qualquer tipo de compressão e para os sensores tradicionais (acelerômetro, temperatura, etc) a resolução adotada é aquela utilizada no sistema operacional *TinyOS* [42]. Analisando as informações contidas na Tabela 2.2 pode ser observado que os sensores visuais produzem uma quantidade de dados uma ordem de grandeza superiores aos sensores tradicionais. É possível ainda, obter um quadro bem definido à respeito das limitações que os nós sensores listados na Tabela 2.1 têm com relação a uma aplicação visual: não possuem memória para o armazenamento e nem transmissores com largura de banda suficiente para a disseminação dos dados.

| Sensor | Amostragem | Resolução | Volume (aprox.) |
|--------------------------|------------------|---------------------------|-----------------|
| Câmera VGA ^a | 30 quadros/s | 640 x 480 pixels, 24 bits | 26 MBytes/s |
| Câmera CIF ^b | 30 quadros/s | 352 x 288 pixels, 24 bits | 9 MBytes/s |
| Câmera QCIF ^c | 30 quadros/s | 176 x 144 pixels, 24 bits | 2 MBytes/s |
| Acelerômetro | 1.000 amostras/s | 16 bits | 2,0 KBytes/s |
| Temperatura | 1.000 amostras/s | 16 bits | 2,0 KBytes/s |

^a Padrão de *display* da plataforma IBM/PC, comumente utilizado para designar quadros de vídeo ou imagens que possuem 640 colunas e 480 linhas de resolução.

^b Formato de vídeo utilizado em sistemas de vídeo conferência com taxa de amostragem igual a 30 quadros por segundo, onde cada quadro possui 352 colunas e 288 linhas de resolução.

^c Formato de vídeo que corresponde a 1/4 do formato CIF, cada quadro possui 176 colunas e 144 linhas de resolução.

Tabela 2.2: Quantidade aproximada de dados produzidos por diferentes sensores (tradicionais e visuais).

Em se tratando da disseminação das informações multimídia das RSSFs Visuais, Gürses e Akan [22] listam as seguintes limitações e características que devem ser observadas.

1. A disseminação deve ser realizada com base na ocorrência de eventos de interesse à aplicação ou então em resposta a consultas à rede (*query-driven*). A disseminação contínua (tratamento e transmissão da informação) é dispendiosa em termos energéticos e pode esgotar rapidamente os recursos da rede.
2. A agregação de dados multimídia realizada na camada de rede (*in-network aggregation*) deve ser evitada. Funções de agregação simples como a média, o máximo ou a aplicação de um limiar aos dados sensorizados não são aplicáveis ao conteúdo multimídia das RSSFs Visuais. Um função de agregação possível nestes cenários é a codificação conjunta de múltiplos sinais de vídeo correlacionados em um nó agregador. A teoria da codificação distribuída, no entanto, revela que a codificação distribuída e o princípio da decodificação conjunta são capazes de representar a correlação espacial das informações coletadas de maneira tão eficiente quanto a codificação conjunta [68]. A troca de dados entre os nós sensores para a agregação introduz ainda, gastos extras de compressão e descompressão.

3. A comunicação direta entre um nó sensor visual e o sorvedouro caracteriza o uso de um canal de baixa largura de banda e alta taxa de erros, devendo portanto, ser evitada. A transmissão *multi-hop*, a curtas distâncias com boa largura de banda e baixa taxa de erros, atende melhor aos requisitos de qualidade de serviço das RSSFs Visuais.

Disseminar os dados visuais puros, sem qualquer forma de tratamento, é extremamente ineficiente do ponto de vista energético e do uso de largura de banda (um único nó sensor visual utiliza largura de banda equivalente a centenas de nós equipados com sensores tradicionais). Conforme observado por Obraczka *et al.* [53] e por Soro e Heinzelman [62], a chave para minimizar estas limitações está no processamento local dos dados uma vez que, nem toda a informação coletada é de interesse para a aplicação e pode ser filtrada no próprio nó sensor visual. De forma geral, imagens e vídeos coletados por câmeras possuem alta correlação, o que permite reduzir a quantidade de informação na rede além tornar o sistema mais tolerante a falhas.

O processamento de dados visuais justifica a necessidade de nós sensores equipados com maior poder computacional e maiores reservas energéticas para as RSSFs Visuais. Tal operação traz à tona a questão a respeito do nível de abstração da representação da informação visual disseminada, em virtude do processamento sofrido. A abordagem tradicional é a compressão do *stream* de vídeo para sua posterior transmissão ao próximo *hop* da rota até a chegada ao sorvedouro. A compressão alcançada pelos algoritmos atuais, porém, ainda é insuficiente para redes com largura de banda restrita como as RSSFs Visuais.

Outra forma de abstração simples é a redução da frequência do sensoriamento das câmeras, medida em quadros capturados por segundo (fps). A redução da taxa de amostragem de uma câmera VGA (ver Tabela 2.2) de 30 para 15 fps, por exemplo, reduz em 13 MBytes/s o volume de dados coletados. Se por um lado a redução da taxa de quadros diminui o volume de dados e conseqüentemente a carga de processamento nó sensor visual, por outro pode causar a perda de eventos de curta duração. Uma terceira abordagem consiste na criação de uma representação reduzida utilizando parâmetros que descrevem a cena observada. Um conjunto adequado de atributos (como bordas e contornos, cor predominante, posição no espaço, velocidade de deslocamento) tornam a codificação mais compacta. À medida que o nível de processamento aplicado aos dados coletados (ou nível de inteligência da rede) aumenta, os requisitos de largura de banda na disseminação da informação visual diminuem de maneira semelhante [25].

Nas RSSFs tradicionais, os nós sensores coletam dados sobre fenômenos ocorridos em sua vizinhança, região denominada área de cobertura do sensor. A área de cobertura de um sensor pode ser definida, de forma simplificada, como um círculo de raio R centrado no nó sensor. A Figura 2.2(a) ilustra este conceito em uma RSSF tradicional. Sensores visuais (câmeras) no entanto, possuem a capacidade de coletar dados a respeito de fenômenos que não ocorrem, necessariamente, em sua vizinhança (em um sistema de vigilância, por exemplo, um sensor visual pode capturar a movimento de intrusos que estejam a vários metros de distância do mesmo). Nas RSSFs Visuais, o conceito de área de cobertura do sensor é substituído

pelo campo de visão do sensor (FoV). O campo de visão é definido como a área no espaço tridimensional visível a partir da câmera [63]. A Figura 2.2(b) ilustra o conceito e permite ressaltar que, em uma RSSF Visual, a localização de um nó sensor deve incluir, além de seu posicionamento física na região de monitoração, informações a respeito do FoV de sua câmera.

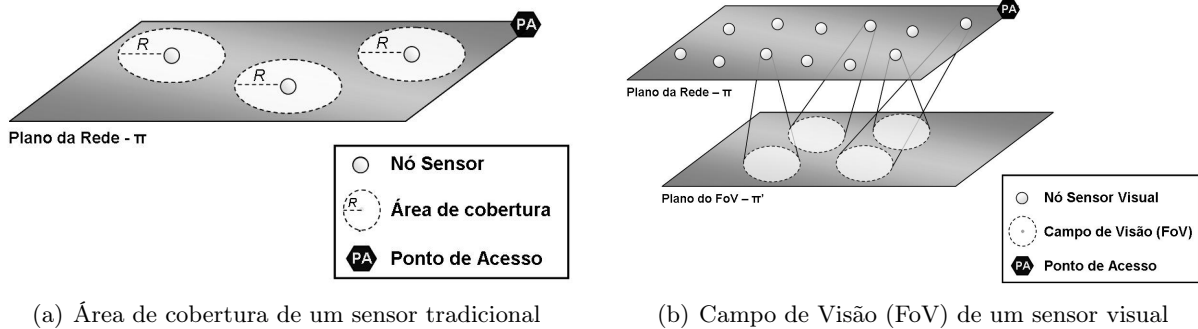


Figura 2.2: Diferença entre os conceitos de área de cobertura de um sensor tradicional e campo de visão de um sensor visual. Na Figura 2.2(b), a divisão da RSSF Visual em dois planos é empregada para demonstrar que nem sempre o FoV coincide com a posição física do sensor visual.

Ampliar a cobertura da área de monitoração da aplicação é uma das principais razões para a deposição de uma RSSF Visual. Para que este objetivo seja alcançado, a colaboração entre os nós sensores visuais é de fundamental importância. A situação óbvia para a colaboração entre nós sensores ocorre quando existe sobreposição do FoV entre duas câmeras. A observação de uma cena a partir de dois pontos distintos *i*) torna a detecção de evento mais confiável utilizando validação cruzada das informações e *ii*) permite uma descrição em profundidade da cena observada por meio de técnicas de triangulação de pontos. Contra esta forma de colaboração pesa a necessidade de acesso às imagens e vídeos produzidos por outros nós sensores, o que pode sobrecarregar a rede. A cooperação entre nós sensores é possível ainda que os FoVs dos sensores visuais não estão sobrepostos. Este é o caso quando um dado sensor visual, rastreando um objeto em movimento na região de monitoração, notifica nós sensores vizinhos da presença de objetos e os alerta quando o objeto estiver prestes a entrar em seus campos de visão. Esta técnica, de menor impacto nas comunicações da rede, é conhecida como *hand off* do objeto rastreado.

As RSSF Visuais se caracterizam também, por uma mudança no padrão de consumo energético comumente encontrado nas RSSFs tradicionais. Nestas redes a energia despendida nas tarefas relacionadas ao sensoriamento e processamento é relativamente pequena, significando que o consumo total de um nó sensor é dominado pelo subsistema de comunicação (ou seja, o rádio). Esta característica não é válida para sensores multimídia (câmeras de vídeo, por exemplo) que coletam grandes quantidades de dados e necessitam de um nível de processamento considerável para a análise e/ou compressão dos mesmos. Acrescentando a estas constatações o fato que o sensoriamento pode ser também um grande consumidor de recursos energéticos, é possível concluir que nas RSSFs Visuais, o consumo em atividades de sensori-

amento e processamento não pode ser negligenciado. Assim, estratégias de gerenciamento e economia de energia são necessárias para maximizar o tempo de vida da rede [3].

2.3 Redes de Sensores Multicamada, Multimodal

Os rápidos avanços tecnológicos nas comunicações sem fio, miniaturização de circuitos integrados e no desenvolvimento de micro sistemas eletro-mecânicos (MEMS) possibilitou não apenas o surgimento das RSSFs (e suas especializações como as RSSFs Visuais) como produziu uma variedade de sensores e plataformas sensoras. Atualmente são encontrados nós sensores com diferentes custos, tamanhos, propósitos e funcionalidades (ver Figura 2.1).

De forma geral, a abordagem utilizada para o desenvolvimento de uma aplicação utilizando a tecnologia das RSSFs consiste em escolher ou definir um tipo de sensor e uma plataforma convenientes e programar os nós para executarem as tarefas da aplicação. Esta abordagem resulta em uma rede plana (de uma única camada) e homogênea. Segundo Tsiatsis *et al.* [65], o uso de uma única plataforma não é escalável o suficiente para abranger toda a complexidade e dinamicidade das aplicações previstas para a tecnologia da RSSFs, em especial aplicações multimídia .

A disponibilidade de sensores e plataformas de diferentes propósitos e recursos torna interessante o desenvolvimento de aplicações que façam uso de elementos heterogêneos hierarquicamente organizados. Neste contexto, surgem as Redes de Sensores Multicamada, Multimodal (RSSFs M^2) [40]. O termo *multicamada* refere-se à maneira como os elementos de rede estão organizados: em níveis hierárquicos de acordo com suas funcionalidades e capacidades (ver Seção 2.1.2 a respeito da classificação das RSSFs). Já o termo *multimodal* remete à possibilidade de diferentes modalidades de sensoriamento serem utilizadas para a realização do objetivo comum da aplicação.

Tsiatsis *et al.* [65] relaciona o conceito das RSSFs M^2 às memórias *cache* encontradas nas arquiteturas de computador modernas. *Cache* são memórias rápidas, pequenas e de custo elevado que utilizam das propriedades de localidade temporal e espacial para acesso eficiente à memória principal [26]. Um sistema de memória baseado em *cache* se apresenta tão rápido quanto as memórias *cache* e tão grande quanto a memória principal. De forma análoga, uma rede multicamada, multimodal possui consumo de energia e cobertura semelhantes aos de uma rede plana dotada de sensores simples podendo apresentar entretanto, a alta funcionalidade e confiabilidade de uma rede plana composta por nós sensores de alto desempenho.

2.3.1 Características das RSSFs M^2

As RSSFs M^2 podem apresentar vantagens sobre as redes de sensores planas e homogêneas: baixo custo, alta cobertura, alta funcionalidade e alta confiabilidade. Não é raro encontrar uma solução baseada nas redes unicamada que se apresente melhor que as redes multicamada, multimodal em algum subconjunto dos requisitos expostos. Uma rede de sensores composta por nós sensores simples pode apresentar baixo custo e alta cobertura mas a funcionalidade é

comprometida, uma vez que seus elementos podem não ser capazes de executar tarefas complexas. A confiabilidade nesta rede pode ser, ainda, sacrificada devido às severas restrições energéticas dos nós sensores. Uma rede de sensores funcional, por outro lado, pode ser desenvolvida com elementos de alta capacidade mas ao custo de uma cobertura mais restrita, uma vez que estes sensores possuem custo financeiro elevado. Otimizar apenas um dos eixos de custo, cobertura, funcionalidade ou confiança resulta em uma rede de sensores onde um ou mais requisitos chave são prejudicados [40]. Empregando nós sensores distintos na execução de tarefas com diferentes requisitos, as redes multicamada, multimodal apresentam um balanço mais eficiente de custos, cobertura, funcionalidade e confiabilidade.

Na arquitetura de uma RSSF M^2 , como mencionado acima, os nós sensores são organizados hierarquicamente em múltiplas camadas. Os nós sensores que compõem cada camada são assumidos homogêneos com respeito às suas capacidades de sensoriamento, processamento, armazenamento e memória. Camadas diferentes são consideradas heterogêneas com respeito às suas capacidades e modalidades de sensoriamento (razão pela qual a rede é denominada multimodal). Mesmo quando diferentes camadas empregam a mesma modalidade de sensoriamento, é assumido que os sensores de uma camada possuem diferenças significativas com respeito a valor monetário, consumo energético ou funcionalidade.

Nas Redes de Sensores Multicamada, Multimodal partindo do nível mais baixo em direção ao mais alto, a capacidade dos nós sensores tende a aumentar, bem como a complexidade das tarefas por eles desempenhada (o consumo energético aumenta também). Elementos sensores mais limitados, são densamente distribuídos pela área de monitoração e empregados em tarefas simples enquanto que, elementos de maior capacidade, de distribuição esparsa, executam tarefas mais complexas. Assim, afim de maximizar o tempo de vida da rede, a aplicação deve utilizar os recursos de cada camada de maneira criteriosa e deve executar suas tarefas na camada de menor consumo energético mas, ainda assim, capaz de executar a tarefa. Esta constatação demonstra a importância que deve receber a divisão da aplicação em tarefas durante a etapa de desenho e o posterior mapeamento destas nas várias camadas da rede.

Outra característica importante das RSSFs M^2 diz respeito à interação e cooperação entre camadas para a conclusão dos objetivos da aplicação, uma vez que as diferentes tarefas são executadas em camadas distintas. Interações podem ocorrer entre elementos de camadas distintas (interações inter-camadas) e entre elementos de uma mesma camada (interações intra-camadas). Dada estas interações, a aplicação deve mapear suas tarefas nas diferentes camadas da rede dando atenção especial às interações entre tarefas [41].

2.3.2 Desafios de Projetos em RSSFs M^2

Em seu trabalho a respeito das RSSFs M^2 , Kulkarni *et. al.* [40], estabeleceu quatro desafios de pesquisa com relação ao projeto de aplicações: *i) tradeoffs* de projeto, *ii) explorar* múltiplas modalidades de sensoriamento, *iii) interação* multicamada e gerenciamento de recursos e *iv) abstrações* de programação.

***Tradeoffs* de Projeto**

O grande desafio no projeto de uma RSSF M^2 está no projeto e modelagem de um sistema que seja ajustável o suficiente para poder alcançar todas as vantagens oferecidas por estas redes: baixo custo, longevidade, boa cobertura e funcionalidade. Muitas aplicações no entanto possuem objetivos múltiplos dificultando a definição do melhor ajuste para o projeto. Aplicações de vigilância e monitoração, por exemplo, têm como requisitos uma RSSF M^2 de boa longevidade com alta confiabilidade. Tais objetivos porém, são conflitantes. Outra situação que representa um desafio de projeto de RSSFs M^2 ocorre nas aplicações de rastreamento. Estas aplicações buscam maximizar o tempo de vida da rede e ao mesmo tempo minimizar sua latência. Assim, as tarefas da aplicação devem ser distribuídas entre as camadas da rede de forma que notificações de eventos atendam aos requisitos de latência. Além disso, a opção mais eficiente no uso dos recursos energéticos, mas que ainda assim não exceda a latência esperada deve ser selecionada afim de prolongar o tempo de vida da rede.

Estes exemplos mostram que diferentes *tradeoffs* surgem em diferentes aplicações e devem ser tratados com decisões de projeto próprias. No contexto desta dissertação, a RSSF M^2 projetada para a monitoração ambiental utilizando rastreamento visual busca um maior tempo de vida em detrimento ao desempenho da rede (principalmente com relação à latência para iniciação das atividades de rastreamento visual).

Explorar Múltiplas Modalidades de Sensoriamento

O uso de diferentes sensores promove, de forma geral, ganhos para a aplicação. Limitações inerentes às modalidades de sensoriamento empregadas em uma RSSF M^2 podem restringir a funcionalidade da mesma. Em situações de vigilância, por exemplo, nós sensores visuais são capazes de detectar a presença de intrusos apenas quando estes estiverem sob o FoV de suas câmeras. Já um sensor acústico pode antecipar esta detecção uma vez que é capaz de detectar a presença e até mesmo a posição⁵ de um intruso antes que este esteja visível aos nós sensores visuais. Do ponto de vista energético, o uso de diferentes sensores pode gerar benefícios. O consumo de um sensor visual é maior que o de um sensor acústico que, por sua vez, é maior que o de um sensor simples (acelerômetro, magnetômetro, etc.). Esta diferença pode ser explorada utilizando nós sensores simples e, de custo financeiro inferior, na detecção de eventos e posterior ativação de nós sensores de maior capacidade e custo monetário elevado.

A RSSF M^2 para monitoração ambiental desenvolvida neste trabalho emprega duas modalidades de sensoriamento, o sensoriamento de radiação infravermelha e o sensoriamento de informação visual. Os sensores infravermelho de menor consumo energético são utilizados para a detecção de intrusos no ambiente de monitoração enquanto que, sensores visuais ficam responsáveis pela identificação e o rastreamento visual dos alvos (um tarefa que exige maiores

⁵A posição do intruso é determinada por triangulação e pelo menos três nós sensores devem ter captado sua movimentação.

recursos tanto computacionais quanto energéticos).

Interação Multicamada e Gerenciamento de Recursos

Para alcançar os objetivos da aplicação, os nós sensores devem interagir e coordenar ações entre si. Além disso, recursos têm que ser alocados dinamicamente em cada camada para suprir as necessidades da aplicação durante sua execução. Protocolos com suporte à coleta de dados de vários sensores, processamento local da informação e propagação dos resultados pela rede devem ser criados dando suporte à implementação de algoritmos de fusão de dados nas redes multicamada, multimodal. Tais protocolos devem ainda suportar outras formas de interação comuns às redes de sensores como ativação baseado em evento e *handoff* entre nós sensores.

A carga de sensoriamento e processamento observada em uma RSSF M^2 pode apresentar grande variabilidade espacial e temporal, onde longos períodos tranquilos são intercalados por rajadas de eventos localizados e de curta duração. Além disso, por definição, as redes multicamada, multimodal são heterogêneas motivando assim a necessidade de um gerenciamento dinâmico de seus recursos. Assuntos como *i*) balanceamento de carga de processamento entre os nós sensores, *ii*) tratamento de falhas de nós sensores redistribuindo tarefas entre nós adjacentes, e *iii*) gerenciamento de energia multicamada devem ser tratados no contexto das RSSFs M^2 .

Como será visto adiante, na rede proposta neste trabalho, nós sensores de maior poder computacional realizam tarefas de maior complexidade, nós mais simples desempenham tarefas que necessitam de menores restrições de recursos. Além disso, o gerenciamento de recursos energéticos da RSSF M^2 é realizado através da ativação dos elementos de sensoriamento com base na ocorrência de eventos. Tais eventos são notificados por meio da interação entre as camadas da rede. A solução desenvolvida não contempla mecanismos de tolerância a falhas.

Abstrações de Programação

Embora as RSSFs M^2 apresentem uma série de vantagens, é importante ressaltar que elas tornam o desenvolvimento das aplicações mais complexo. Nas redes planas e homogêneas, o mesmo software é executado em todos os nós sensores e estes desempenham o mesmo papel. A natureza heterogênea das RSSFs M^2 leva à execução das tarefas da aplicação em diferentes plataformas de nós sensores. Este fato requer do projetista conhecimento especializado nas plataformas utilizadas, cada qual com suas características de hardware e utilizando diferentes sistemas operacionais.

Assim, é um desafio para as RSSFs M^2 o desenvolvimento de ferramentas de programação em alto nível e de bibliotecas comuns à várias plataformas disponíveis para a simplificação do desenho das aplicações. No contexto desta dissertação, estes desafios não são considerados, sendo necessário o conhecimento de diversas plataformas e ambientes de desenvolvimento de aplicações RSSFs.

2.4 Conclusão

Este capítulo tratou dos desafios e oportunidades de pesquisas na tecnologia de Redes de Sensores Sem Fios (RSSFs). Foi apresentada uma fundamentação sobre as RSSFs, suas características e um modelo funcional que as descreve. Duas especializações desta tecnologia foram também descritas: as Redes de Sensores Visuais (RSSFs Visuais) e as Redes de Sensores Multicamada, Multimodal (RSSFs M²). Nas RSSFs Visuais, câmeras de vídeo substituem sensores tradicionais como acelerômetros, magnetômetros, sensores de temperatura e umidade, provendo informações mais ricas a respeito do ambiente monitorado. Nestas redes, o volume de dados coletados é muitas vezes superior ao encontrado nas RSSFs tradicionais e existe uma clara mudança no perfil energético da rede, os serviços de sensoriamento e processamento possuem gastos energéticos similares ou até mesmo superiores aos gastos do serviço de comunicação. As RSSFs M², por sua vez, empregam sensores heterogêneos hierarquicamente organizados em camadas que executam diferentes tarefas para a realização do objetivo comum à aplicação. Estas redes de sensores procuram equilibrar o desenvolvimento de RSSFs funcionais, sem no entanto, apresentar custos elevados e cobertura reduzida.

No capítulo seguinte, o estado da arte com relação à aplicações da tecnologia das RSSFs Visuais e das RSSFs M² é apresentado, com ênfase nas aplicações de rastreamento. É apresentado ainda, um estudo revisando os principais dispositivos sensores utilizando câmeras de vídeo para a monitoração visual.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Este capítulo trata do estado da arte no que diz respeito às aplicações da tecnologia RSSFs M^2 (e das RSSFs de múltiplas camadas e/ou múltiplas modalidades de sensoriamento) e às aplicações de rastreamento em RSSFs. É realizada também, uma revisão dos principais elementos de hardware para o sensoriamento visual e, por conseqüência para o rastreamento visual. O texto está organizado com a seguir. Na Seção 3.1 são apresentados trabalho relacionados à aplicações e algoritmos de RSSF M^2 e rastreamento. A Seção 3.2 apresenta as revisões de trabalhos relacionados aos elementos de rede para rastreamento visual. A Seção 3.3 conclui o capítulo apresentando algumas considerações.

3.1 Aplicações e Algoritmos

Até o momento, aplicações de RSSFs distribuídas em múltiplas camadas e/ou que utilizam múltiplas modalidades de sensoriamento são raras na literatura. A Seção 3.1.1 apresenta trabalhos que fazem uso de conceitos e características das RSSFs M^2 , conforme descritos na Seção 2.3. Já a Seção 3.1.2 trata das aplicações de rastreamento de objetos utilizando a tecnologia de RSSFs. O rastreamento é apontando como uma das classes de aplicações mais promissoras desde os primeiros estudos a respeito das RSSFs. É interessante observar que as aplicações de rastreamento descritas não utilizam sensores visuais uma vez que, aplicações de rastreamento visual são desenvolvidas, principalmente, utilizando a tecnologia das RSSFs M^2 .

3.1.1 Aplicações de RSSFs M^2

Masuda e Hattori [52] descrevem uma RSSF M^2 para monitoração remota utilizando comunicação sem fio, via rede celular. A aplicação desenvolvida é destinada à observação de ambientes externos e/ou internos e é composta por três partes: um IBM/PC chamado de *estação base*, nós sensores visuais equipados com câmeras, capacidade de processamento e comunicação sem fio denominados *estações remotas* e *nós sensores sem fio* que formam uma RSSF independente do sistema visual.

Os nós sensores são responsáveis por detectar a presença de objetos (de forma geral, seres humanos) e acionar as estações remotas. Cada nó sensor possui um sinal identificador de

radio único que permite às estações remotas posicionarem suas câmeras de forma a obter a melhor visão do objeto (a localização dos nós sensores é conhecida *a priori*). As estações remotas possuem câmeras que operam sob todas condições climáticas e também no escuro (visão noturna), elas são auto-suficientes em energia (possuem células fotoelétricas) e podem reconhecer e identificar até 16 nós sensores distintos. Ao receber um sinal, a estação remota identifica o nó sensor sem fio emissor, ajusta os parâmetros de sua câmera (foco, brilho, ângulo, zoom), captura imagens do ambiente, realiza a compressão das mesmas e as transmite (via rede celular) à estação base. Segundo os autores, a transmissão das imagens requer aproximadamente 55 segundos. A estação base recebe as imagens e informa o operador do sistema a respeito. Ela pode ainda, controlar estações remotas com requisições para captura periódica de imagens. Por se tratar de um sistema comercial, em uso em mais de 20 cidades do Japão, maiores detalhes a respeito da modalidade de sensoriamento empregada pelos nós sensores sem fio, configurações detalhadas da câmera, algoritmo de compressão, dentre outros não são fornecidos. Outra desvantagem com relação ao sistema é a necessidade de um operador para a análise das imagens.

Maleki *et al.* [50] utiliza múltiplas modalidades de sensoriamento e detecção de eventos no desenvolvimento de uma aplicação da tecnologia de RSSFs M^2 para a monitoração de ambientes domésticos. Fazendo uso da característica das RSSFs M^2 de empregar elementos de rede mais simples (de menor custo monetário, maior eficiência energética, etc.) para ativar, em momentos oportunos, elementos de maior desempenho (ver Seção 2.3.1), os autores empregam acelerômetros¹ e câmeras de vídeo na detecção de quedas acidentais de pessoas idosas ou sob cuidados médicos e posterior acionamento de serviços de emergência. Critérios como o custo monetário, o consumo energético e a viabilidade de construção são considerados no desenvolvimento da aplicação.

Nós sensores equipados com acelerômetros são afixados junto ao corpo da pessoa sob observação (um por pessoa) e permanecem coletando dados sobre a inclinação da mesma. Ao detectar uma queda, estes nós sensores disseminam uma mensagem direcionada à classe de nós sensores equipados com câmeras de vídeo espalhados pelo ambiente monitorado (no protótipo apresentado no trabalho são utilizados três nós sensores visuais). A partir do indicador de intensidade do sinal recebido (RSSI) a posição aproximada da pessoa é determinada e o sensor visual com melhor visibilidade acionado. O software embutido nestes elementos procura reduzir o número de alarmes falsos e identificar a postura a pessoa após a queda (em pé ou deitada). O sistema apresenta ainda, um módulo para comunicação entre a pessoa acidentada e serviços de atendimento de emergência. Tal dispositivo pode ser acionado pelo próprio usuário no nó sensor afixado a seu corpo ou a partir da detecção do evento (queda). Os experimentos e conclusões do texto indicam resultados interessantes em ambientes internos como salas e cozinhas, detectando corretamente a postura do acidentado em 63% dos casos.

A RSSF Visual multicamada *SensEye* é descrita no trabalho de Kulkarni *et al.* [41]. Trata-se de uma solução de sensoriamento visual de baixa latência e de uso eficiente de recursos

¹Acelerômetros são sensores utilizados para realizar medições de aceleração, detecção de vibrações e inclinação de objetos (aceleração em decorrência da força da gravidade).

energéticos. O projeto da rede *SensEye* é baseado em três princípios: *i*) mapear cada tarefa da aplicação na camada de menor desempenho mas que ainda assim seja capaz de executá-la; *ii*) explorar ativação sob demanda (*wake up on-demand*) e *iii*) explorar redundância na cobertura.

Como estudo de caso, uma aplicação de vigilância, distribuída em três camadas nós sensores visuais foi desenvolvida. A aplicação de vigilância no *SensEye* é dividida em três tarefas: detecção, identificação e rastreamento de objetos. A camada 1 é responsável pela detecção de objetos. Esta camada utiliza nós sensores *Mica2* [31] equipados com os sensores visuais *CMUcam* [57] operando em regime de ciclo de trabalho (*duty cycle*), isto é, periodicamente os elementos de rede são acionados para o cumprimento de suas tarefas e após um período são desativados. Uma vez detectado um objeto, os nós sensores da camada 1 determinam as coordenadas 3D do mesmo e ativam os elementos da camada 2 cujas câmeras apontam para esta direção. Se não existir nenhum nó sensor na camada 2 nesta condição então a camada 3 é ativada. A camada 2, constituída por nó sensores *Stargate* [33] equipados com câmeras USB (*Universal Serial Bus*), é responsável pela identificação e rastreamento dos objetos. A tarefa de rastreamento é compartilhado com a terceira camada (um IBM/PC equipado com uma câmera PTZ – *pan, tilt* e *zoom*) quando existirem partes da área de monitoração que não estejam cobertas por algum nó sensor da camada 2.

Os autores realizam duas análises distintas da rede *SensEye*. Na primeira, o comportamento isolado de cada um dos sensores é avaliado. Conclusões obtidas a partir dos resultados observados confirmam que, nas RSSFs Visuais e RSSFs M² que fazem uso de sensores visuais, a energia despendia em operações de sensoriamento e processamento dos dados visuais representam a maior parte do consumo total do elemento de rede (este valor chega a 92% nos elementos da camada 1. Na segunda análise, o *SensEye* é comparado a uma RSSF Visual homogênea de uma única camada. Nos experimentos realizados, o *SensEye* se mostrou mais eficiente no uso de recursos energéticos apresentando consumo 74% inferior ao consumo observado na rede unicamada. Esta redução, embora bastante significativa, refletiu em um aumento de apenas 6% na taxa de eventos não detectados.

Hu *et al.* [29] apresenta um sistema de monitoração e identificação de espécies de sapos comuns na região nordeste australiana. O sistema consiste em uma RSSF organizada em camadas para o sensoriamento do cochar destes anfíbios (dados sonoros). Assim como acontece nas RSSFs Visuais, os autores chamam a atenção para o volume de dados gerados e apontam limitações do hardware comumente utilizado no desenvolvimento de aplicações de RSSFs, como a baixa taxa de amostragem dos sensores e a latência nas operações de processamento e disseminação. O sistema é destinado à monitoração e rastreamento de populações de sapos de uma mesma espécie e não de um animal específico.

O sistema emprega duas camadas de diferentes nós sensores, na primeira nós sensores *Mica2* [31] são empregados na coleta de sons na região de monitoração. Modificações no sistema operacional TinyOS [42] foram realizadas para permitir a aquisição de dados na frequência necessária para a aplicação (aproximadamente 10 KHz). Os nós *Mica2* são responsáveis pela compressão os dados sensorizados utilizando um algoritmo simples de supressão

de ruídos e/ou silêncio. Eles trabalham em duplas assim, enquanto um nó sensor *Mica2* está sensoriando e comprimindo os dados, o outro está disseminando a informação já tratada. A informação comprimida é repassada à segunda camada que utiliza a plataforma de alto desempenho *Stargate* [33]. Os nós *Stargate* são responsáveis pela análise da informação recebida (utilizando algoritmos complexos como a Transformada Rápida de Fourier – FFT) e posterior classificação do sinal (em espécies de sapo) utilizando rotinas de aprendizado de máquina.

Os experimentos realizados em laboratório e em condições reais obtiveram bons resultados classificando corretamente 4 em cada 6 amostras. O algoritmo de compressão apresentou uma taxa de redução de dados da ordem de 25% a 45%. A latência do sistema, igual a 45 segundos (15 segundos de sensoriamento e 30 segundos de transmissão), por outro lado, não se mostrou um problema ao objetivos da aplicação principalmente com a redução de custos decorrentes da diminuição do número de nós *Stargate*. O trabalho apresenta fragilidade ao disseminar continuamente os dados coletados, mesmo quando apenas ruídos e silêncio são sensorizados.

3.1.2 Rastreamento em RSSFs

O trabalho de Arora *et al.* [1] descreve o desenvolvimento e implementação de uma RSSF experimental para a detecção de objetos de forma distribuída. Os elementos principais do sistema compreendem a detecção, classificação e rastreamento. Partindo de um cenário militar, chamado “*a line in the sand*”, os autores modelam possíveis alvos (soldados portando armas de fogo, carros de combate), o terreno (distúrbios e ruídos) e determinam os sensores mais apropriados para a aplicação (magnetômetro e radar).

A classificação e o rastreamento são realizados com base no conceito de campo de influência dos alvos. Esta métrica corresponde à região limitada por curvas de campos de força equipotentes onde a relação sinal/ruído excede o limiar mínimo de detecção do sensor. O classificador calcula o campo de influência de um ou múltiplos objetos se movendo pela rede. Ele diferencia também, alarmes falsos de intrusos reais e é capaz de distinguir múltiplos intrusos. O módulo de rastreamento determina a posição mais provável de cada intruso e, dependendo do tipo de intruso e de sua posição (estimada), o módulo de rastreamento determina ainda, a posição futura do objeto.

Uma RSSF utilizando 90 nós sensores *Mica2* [31] equipados com magnetômetros e radares, foi implementada como protótipo do sistema e testes foram conduzidos em instalações militares no estados de Ohio e da Flórida, EUA. RSSFs de menor porte foram utilizadas na validações em separado dos subsistemas de detecção, classificação e rastreamento. Segundo os autores, no entanto, a rede não se mostrou escalável, sendo notada uma deterioração na qualidade do serviço prestado à medida que mais nós eram adicionados (devido principalmente ao aumento do tráfego da rede).

A RSSF projetada e implementada por de Vlaam [18] utiliza nós sensores *Mica2* [31] acoplados a sensores infravermelho passivos com objetivos de detectar e rastrear a movimentação de objetos. O sensoriamento infravermelho é capaz de detectar mas não distinguir entre dois objetos, o que leva o autor a assumir que um objeto detectado por outros nós sensores em um curto espaço de tempo representa o mesmo objeto. A topologia da rede é outro ponto

importante nesta aplicação, todos nós sensores têm conhecimento do posicionamento relativo de seus vizinhos diretamente adjacentes (à direita ou à esquerda) e a distância entre dois nós sensores é fixa e igual para todos. Estas características são utilizadas no cálculo da velocidade do objeto. Na aplicação de rastreamento, assim que um nó sensor detecta um objeto (e a direção de seu movimento) uma mensagem contendo o endereço do nó sensor, um identificador do objeto detectado, sua direção e, se possível, sua velocidade, é disseminada para seus dois vizinhos (à direita e à esquerda). Ao receber tal mensagem, estes vizinhos acionam temporizadores que são usados para determinar o tempo que o objeto necessita para percorrer a distância entre dois nós sensores (conhecida *a priori*) e assim determinar sua velocidade. Esta informação permite ainda, a colaboração entre os elementos da rede para determinar corretamente a direção do movimento do objeto (um mecanismo de confirmação de direção por mais de um nó sensor é utilizado). A disseminação de relatórios sobre o rastreamento para o nó sorvedouro é periódica e é realizada de acordo com o número de vezes que o alvo foi detectado (múltiplos de uma base pré-definida). Este contador também é transmitido na mensagem aos vizinhos.

Nos experimentos realizados para a validação do sistema, a direção de deslocamento do objeto no momento da primeira detecção foi correta em menos de 50% dos casos alcançando taxas de acerto iguais a 100% através da colaboração entre os sensores. A velocidade calculada pela aplicação possui boa precisão mas pode ser influenciada negativamente por pequenas diferenças de orientação dos sensores. Embora os resultados seja encorajadores, eles devem ser observados com cautela. A rede desenvolvida é baseada em muitas suposições que não se sustentam em aplicações reais.

Oto *et al.* [54] apresentam o algoritmo COBMAT (*Color-Based Multiple Agent Tracking*) que utiliza múltiplos sensores visuais para rastrear a movimentação de alvos sob o FoV de câmeras com ou sem sobreposição. O algoritmo tem por objetivos o rastreamento de alvos de uma forma distribuída, sem a necessidade de um controle centralizado e se manter simples o bastante para ser utilizado nas RSSFs Visuais.

O COBMAT utiliza *background subtraction* e rotinas de segmentação de imagens para identificar possíveis alvos (*blobs*) nos quadros capturados. O histograma de luminosidade (*hue histogram*) de cada um destes *blobs* é calculado e é então, comparado àqueles histogramas pertencentes aos alvos identificados em quadros anteriores. Esta comparação permite identificar quais objetos que permaneceram, quais objetos entraram e quais objetos deixaram o FoV do sensor visual. Os *blobs* não identificados, ou seja, aqueles que entraram no FoV, são comparados a uma banco de dados local contendo histogramas de alvos identificados por sensores vizinhos. Se ainda assim o alvo não for identificado, o nó sensor assume que este é um novo objeto na área de monitoração e transmite uma mensagem contendo o histograma do objeto a seus vizinhos de um salto (*one-hop neighbors*). Os vizinhos armazenam esta informação atualizando seus bancos de dados locais permitindo assim, o *handoff* entre os sensores.

Resultados experimentais mostram que o algoritmo é robusto, permitindo o rastreamento vários alvos, a utilização de diferentes posicionamento de câmeras e realizando o rastreamento após colisões (durante colisões os objetos são tratados com um novo alvo). A oclusão de alvos

e iluminação irregular no entanto, representam situações onde o comportamento do algoritmo deve ser melhorado.

3.2 Elementos de Hardware – Nós Sensores

Os elementos de hardware para sensoriamento visual empregados no desenvolvimento de aplicações das tecnologias das RSSFs Visuais e das RSSFs M^2 podem ser classificados de acordo com seus componentes eletrônicos. Esta dissertação propõe uma classificação dos elementos de hardware com base na presença ou não de recursos de comunicação e no propósito para o qual eles foram projetados. Duas classes são definidas para a diferenciação do hardware para sensoriamento visual: as plataformas de sensoriamento visual e os dispositivos de sensoriamento visual.

- **Plataformas de sensoriamento visual** – correspondem a nós sensores visuais completos dotados de processador, memória, rádio transmissor e sensor visual (câmera de vídeo). De forma geral, as plataformas de sensoriamento visual são elementos de rede de propósito geral, ou seja, seu uso não é restrito a uma aplicação visual específica podendo, inclusive, ser utilizados em aplicações da tecnologia das RSSFs tradicionais.
- **Dispositivos de sensoriamento visual** – correspondem aos elementos de hardware cujo foco esteja relacionado principalmente à atividade de sensoriamento de dados e por consequência no sensor visual. De forma geral, não possuem rádio transmissores e, muitas das vezes, são equipados com processadores/microcontroladores e memórias dedicados. Os dispositivos de sensoriamento visual são elementos de uso específico em aplicações visuais e devem ser acoplados a alguma plataforma de sensoriamento (dotada de recursos de comunicação) para atuarem como elementos de rede nas RSSFs Visuais ou M^2 .

Os resultados obtidos nos principais trabalhos publicados na literatura são apresentados nas seções a seguir. Inicialmente, são descritas as plataformas de sensoriamento visual e logo em seguida os dispositivos de sensoriamento visual. Um quadro resumo com as principais características de hardware de cada elemento finaliza esta seção.

3.2.1 Plataformas de Sensoriamento Visual

Tendo por base cinco princípios de projeto, Cao *et al.* [7] apresentam um protótipo de um nó sensor visual completo para a transmissão sem fio de imagens comprimidas do ambiente de monitoração. É válido listar estes princípios uma vez que eles permeiam o desenvolvimento das demais plataformas de sensoriamento visual mostradas no decorrer da seção. São eles:

1. utilizar processadores mais poderosos e maior quantidade de memória para o armazenamento temporário de dados para processamento;

2. utilizar comunicação em tempo real e dispositivos de rádio transmissão com largura de banda suficiente para tráfego multimídia;
3. utilizar de forma eficiente e otimizada recursos energéticos, tanto no processamento (modificando algoritmos de tratamento de imagens) quanto na transmissão de dados (comprimindo informação e criando representações parametrizadas das cenas);
4. utilizar transmissão robusta e com requisitos de qualidade de serviço (QoS) uma vez que o canal de comunicação sem fio é falho e ruidoso;
5. utilizar processamento distribuído e colaboração entre os elementos aumentando a eficiência durante a execução das tarefas.

O nó sensor desenvolvido por Cao *et al.* [7] utiliza processador Samsung S3C44B0X ARM7 de 16/32 bits e quatro modos de operação (*normal*, *slow*, *idle* e *stop*). Um sensor CMOS de alta performance e de baixo consumo é responsável pela captura de imagens. Há ainda um dispositivo FPGA onde são implementados algoritmos de compressão de imagens baseados na transformada de *wavelet*. Um módulo de rádio transmissão CC1000 da Chipcom é utilizado para a disseminação da informação coletada e processada.

Uma contribuição do trabalho de Cao *et al.* [7] é encontrada no modelo de gerenciamento de energia empregado. Após o *boot up* do nó sensor, todos os componentes entram em modo ocioso (*idle*) com exceção do módulo de rádio transmissão que permanece ativo apenas para a recepção de mensagens. Ao receber uma mensagem de alarme, o processador é acionado e ativa o sensor CMOS dando início ao principal ciclo operação: coletar \rightarrow processar \rightarrow comprimir \rightarrow transmitir imagens. Ao final deste ciclo os componentes retornam ao estado ocioso ficando ativa, novamente, apenas a unidade de recepção de mensagens. Se a mensagem recebida estiver relacionada ao roteamento da informação através da rede, nenhum componente ocioso é acionado e a mensagem é, simplesmente, retransmitida ao próximo *hop* da rota. O nó sensor retorna ao estado inicial. O trabalho perde em qualidade por não apresentar testes quantitativos a respeito do desempenho do nó sensor, principalmente testes relacionados ao consumo energético nas atividades de sensoriamento e processamento de imagens.

A plataforma *Panoptes* é apresentada no trabalho de Feng *et al.* [8]. Trata-se de um sistema acadêmico de captura de vídeos de qualidade mediana, com alta frequência do sensoriamento (fps) e com baixo consumo desenvolvido para aplicações RSSFs visuais. O nó sensor visual *Panoptes* é baseado em um processador StrongARM de 206 MHz, contando ainda com 64 Mbytes de memória principal. Ele utiliza uma câmera USB. como sensor visual, sistema operacional Linux e comunicação via protocolo 802.11 (*wi-fi*) [14]. Uma segunda versão do sensor *Panoptes* foi desenvolvida tendo por base a plataforma *Stargate* (maiores detalhes são apresentados ainda nesta seção). As duas versões do sensor *Panoptes* são apresentadas na Figura 3.1. Os autores afirmam que, mesmo possuindo o dobro de capacidade de processamento encontrado na primeira versão do *Panoptes*, a versão *Stargate* é ainda mais econômica.

O software dos sensores *Panoptes* é constituído por módulos de captura, compressão, filtragem e *buffering*. O módulo de captura trata da coleta dos dados da câmera USB e seu repasse

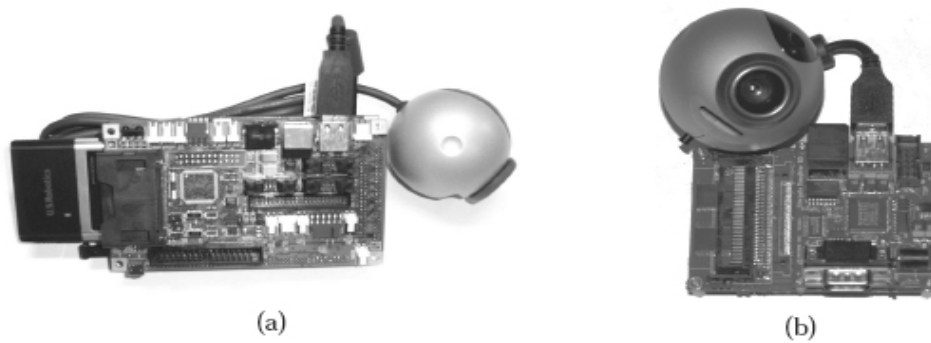


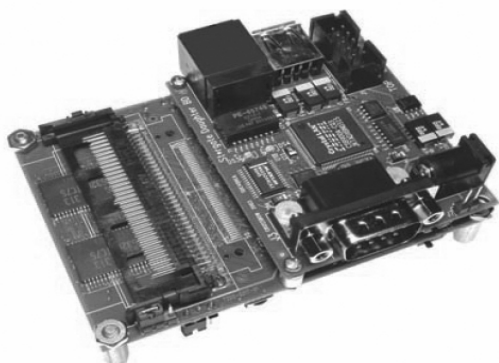
Figura 3.1: Duas versões da plataforma *Panoptes*: a) plataforma StrongARM e b) plataforma *Stargate*.

às aplicações que o nó implementa. O módulo de compressão utiliza o padrão JPEG [66] para a compressão de quadros selecionados a partir do módulo de filtragem. Este módulo permite aos usuários especificar “como” e “quais” dados devem ser filtrados. A filtragem empregada é realizada com base em uma comparação *pixel-a-pixel* para determinar o quanto o quadro atual difere do anterior, quadros muito semelhantes (segundo um limiar pré-estabelecido) são descartados. O módulo de *buffering* é responsável pelo armazenamento temporário da informação processada e sua disseminação. Um esquema baseado em fila de prioridades é utilizado a fim de garantir que as informações de alta prioridade sejam transmitidas o quanto antes e que as de baixa prioridade sejam eliminadas em caso de *buffer overflow*.

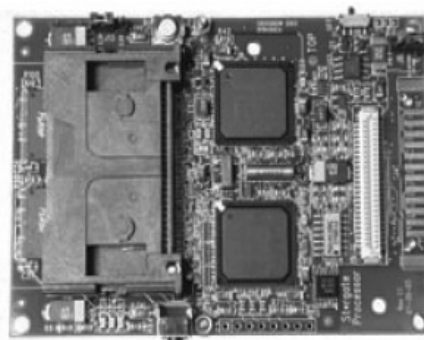
Embasados por resultados experimentais, os autores afirmam que o *Panoptes* é capaz de capturar vídeos com frequências próximas a 30 fps (qualidade mediana, 320×240 *pixels*) e comprimir imagens em tempo real (~ 30 ms). Análises e medidas do consumo energético dos nós sensores também foram realizadas e, confirmando a mudança de perfil energético descrita na Seção 2.2.2, a coleta de dados se mostrou a atividade de maior gasto energético da aplicação (5,268 *watts*). Um ponto observado nos experimentos diz respeito ao consumo de recursos de energia isolado dos componentes do nó sensor que se mostrou aditivo, isto é, o aumento de consumo provocado pelo acionamento da câmera de vídeo, por exemplo, é o mesmo estando o rádio (ou qualquer outro componente) ativo ou não.

Desenvolvida nos laboratórios da Intel Research [12] e comercializada pela Crossbow Technology Inc. [34], a plataforma *Stargate* [33] pode ser, resumidamente, descrita como um computador embarcado de 400 MHz, dimensões reduzidas e baixo consumo energético, executando o sistema operacional Linux. O *Stargate* possui processador Intel XScale de 400 MHz, 32 Mbytes de memória *flash* e 64 Mbytes de memória principal. Conectores PCMCIA comuns em computadores portáteis, *Compact Flash* e um conector nativo para a série Mica [27] de nós sensores são encontrados na placa principal do *Stargate*. Há ainda uma placa adicional (*daughter board*) que amplia as funcionalidades do nó sensor provendo conectores serial, *Ethernet* e USB. Quando equipado com um cartão PCMCIA 802.11 e uma câmera USB, o *Stargate* está apto a atuar como um nó sensor visual de alto desempenho. Na Figura 3.2

são apresentadas duas visões da plataforma, a câmera não está presente bastando entretanto, conectá-la à porta USB da *daughter board*.



(a) *Stargate* - Visão superior



(b) *Stargate* - Visão inferior

Figura 3.2: Plataforma de sensoriamento visual *Stargate*. As imagens representam *a*) a visão superior do nó sensor juntamente com a *daughter board* acoplada (conectores USB, Ethernet e serial à vista); e *b*) a visão da parte inferior do nó sensor. Observe o conector 51-pin para a conexão de nós sensores da família Mica à direita.

Margi *et al.* [51] realizaram um estudo sobre o comportamento energético dos sensores *Stargate*. O trabalho consiste na definição de tarefas elementares durante a execução de uma aplicação visual como por exemplo, ativar a câmera de vídeo ou capturar e comprimir uma imagem. Estas tarefas são caracterizadas por sua duração e pelo aumento de consumo energético observado, isto é, o consumo durante a execução da tarefa menos o consumo que seria esperado se a tarefa não estivesse sendo executada.

Conclusões interessantes a respeito do comportamento dos nós sensores *Stargate* podem ser retiradas deste trabalho. A ativação e desativação de componentes como câmera de vídeo e adaptador de rede *WiFi* representam um gasto energético significativo e introduzem alta latência na aplicação (algumas vezes superior a 2,5 segundos) mostrando que, os componentes não devem acionados indiscriminadamente. Outra constatação diz respeito ao processamento das imagens capturadas pelo sensor visual. O custo de captura e posterior compressão é pouco inferior ao custo observado se, entre estas tarefas, for realizado alguma forma de análise da imagem (detecção de movimentos, por exemplo). Tal análise pode ajudar na redução da quantidade de informação disseminada através da rede. Estas conclusões confirmam, quantitativamente, as afirmações de Obraczka *et al.* [53] e por Soro e Heinzelman [62] apontadas na Seção 2.2.2 a respeito da utilização de processamento local dos dados como forma de aumentar o tempo de vida da rede.

Pesquisadores do *Wireless Sensor Networks Lab* (WSNL) da Universidade de Stanford utilizam uma abordagem diferente para o desenvolvimento de nós sensores visuais. Eles acreditam que, utilizar apenas uma câmera por nó sensor, não é a maneira mais eficiente do ponto de vista energético, nem a que apresenta desempenho ideal nas aplicações visuais. Partindo desta premissa eles têm desenvolvido uma série de protótipos de nós sensores para aplicações de RSSFs visuais, tais como os trabalhos de Downes *et al.* [19] e Hengstler e

Aghajan [25] apresentados a seguir.

Downes *et al.* [19] apresenta o desenvolvimento de um nó sensor visual de propósito geral, ou seja, que não é focado em uma aplicação específica. Segundo os autores, as plataformas de sensoriamento atuais encontram-se em dois extremos, ou são *gateways* com recursos que excedem as necessidades de processamento e memória das aplicações visuais ou são plataformas de sensoriamento genérico² que por sua vez têm recursos insuficientes de memória e processamento. O nó sensor descrito no trabalho é baseado na arquitetura ARM7 de 32 bits, operando a 48 MHz e com 64 Kbytes de memória *on-chip*. Conta ainda com um rádio transmissor operando na frequência de 2.4 GHz, com suporte ao padrão Zigbee/IEEE 802.15.4 [6] de comunicação sem fio. O sensor é pioneiro na utilização de múltiplas câmeras contando com uma interface serial capaz de agregar até seis dispositivos visuais, quatro câmeras de baixa resolução (30×30 *pixels*, tons-de-cinza com resolução de 6 bits) e duas câmeras CIF.

Para comprovar a viabilidade de sensores visuais de tão baixa resolução (30×30 *pixels*) foram realizados experimentos com o nó sensor em uma aplicação de rastreamento de pedestres e detecção de automóveis em vias de trânsito. No rastreamento de pedestres os eventos foram identificados corretamente em 100% dos casos (condições ideais foram utilizadas durante os testes). Utilizando uma sequência de operações simples como diferenciação de quadros (*background subtraction*), segmentação por limiar (*thresholding*) e até convolução em duas dimensões³, as limitações dos sensores são superadas mostrando que informações podem ser facilmente extraídas das imagens capturadas.

Também desenvolvido no WSNL, o nó sensor *MeshEye* [25] representa uma especialização com relação ao projeto apresentado por Downes *et al.* [19]. Trata-se de um nó sensor visual inteligente utilizando processamento local, projetado especificamente para aplicações de vigilância. O protótipo deste nó sensor visual pode ser visto na Figura 3.3.

O nó sensor utiliza três cameras de vídeo, sendo duas de baixa resolução (30×30 *pixels*, tons-de-cinza com resolução de 6 bits) e uma câmera VGA CMOS programável (640×480 *pixels*, tons-de-cinza ou em cores com resolução de 24 bits). Seu processador é, também, um ARM 7 de 32 bits e 64 Kbytes de memória principal, e utiliza o mesmo rádio transmissor do nó sensor (2.4 GHz, ZigBee/IEEE 802.15.4).

O sistema de visão computacional implementado para o *MeshEye* usa os sensores de baixa resolução para detectar a presença de objetos se movendo sob o FoV do nó sensor. A partir de técnicas de visão estéreo, a posição e o tamanho dos objetos detectado são determinados e esta informação permite especificar a região de interesse (RoI) que deve ser capturada no plano do sensor VGA. O processador, então, aciona o sensor VGA para capturar a imagem e depois realizar seu processamento. Segundo os autores, esta abordagem é mais eficiente em termos de latência e de consumo energético que aquela que utiliza apenas uma câmera VGA sensoriando continuamente o ambiente. Um nó sensor *MeshEye* apresenta tempo de vida

²Ao contrário de uma plataforma de sensoriamento visual de propósito geral, uma plataforma de sensoriamento genérico é aquela serve de base para vários tipos de dispositivos sensores como por exemplo, a família Mica [27] com suas placas de aquisição de dados de temperatura, humidade, luminosidade, etc.

³Convolução é uma operação matemática que descreve a ação de um sistema linear sobre um sinal (neste caso um sinal em duas dimensões, uma imagem), tal como um filtro passa baixas.



Figura 3.3: Plataforma de sensoriamento visual *MeshEye* desenvolvida pelo WSNL da Universidade de Stanford.

de aproximadamente 12 dias quando dotado de um suprimento energético de duas pilhas AA não-recarregáveis e utilizando intervalo de sensoriamento de 1 segundo para as câmeras de baixa resolução. Esta afirmação é feita com base em um modelo energético simplificado da plataforma, também descrito em [25].

3.2.2 Dispositivos de Sensoriamento Visual

Desenvolvido por pesquisadores da Universidade de Carnegie Mellon, o *CMUcam2* [58] é a segunda versão de uma família de dispositivos de sensoriamento visual inteligentes capazes de executar procedimentos simples de visão computacional (ver Figura 3.4). Os objetivos destes sensores são obter informações de alto nível a partir de imagens obtidas de uma câmera de vídeo e repassá-las a um processador externo (ou microcontrolador de um nó sensor por exemplo) para análises posteriores. É importante mencionar que o *CMUcam2* foi projetado com foco em aplicações de visão computacional e robótica e portanto, o consumo energético não é otimizado para as RSSFs e suas derivações.

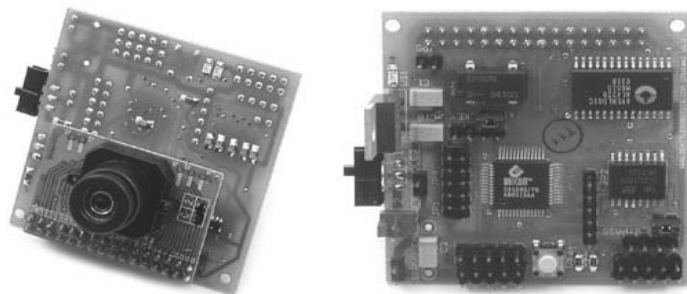


Figura 3.4: Dispositivo de sensoriamento visual *CMUcam2* desenvolvido pela Universidade de Carnegie Mellon.

Com relação ao hardware, o dispositivo utiliza uma câmera CIF CMOS de baixo custo, com resolução de 352×288 e frequência do sensoriamento igual a 50 fps em sua versão

mais simples, apresentando resolução igual a 240×160 e frequência do sensoriamento igual a 60 fps em sua versão mais sofisticada. Ambas versões captam imagens em cores (RGB⁴ e YCbCr⁵) e são ajustáveis em vários aspectos como saturação de cores, brilho, contraste, tempo de exposição, ganho e balanço do branco (*white balance*). O *CMUcam2* adota um processador RISC de 75 MHz, 262 bytes de memória principal e 4096 bytes de memória de programa. Um *buffer* para o armazenamento temporário de imagens permite que sejam realizadas operações mais complexas nos dados coletados. Contando com 384 Kbytes de capacidade de armazenamento e configuração FIFO (*First In, First Out*), este *buffer* é a principal atualização com relação à primeira geração do sensor [57]. O consumo esperado, segundo os autores, é de 850 mW contudo, medições descritas em [41] entretanto, apontam um desempenho inferior (1165,5 mW).

As funcionalidades providas pelo software embutido no *CMUcam2* incluem rastreamento de cores, *background subtraction*, detecção de bordas e histograma de cores. Todos os comandos são transmitidos ao microcontrolador do sensor, via porta serial, utilizando uma linguagem própria e os resultados retornados possuem padrões específicos para cada ação tomada.

O dispositivo de sensoriamento visual *Cyclops* [56], ao contrário do *CMUcam2*, foi projetado para o uso em aplicações da tecnologia de RSSFs, em especial as RSSFs visuais e as RSSFs M² (ver Figura 3.5). Os autores o descrevem como uma interface eletrônica entre um módulo visual (câmera de vídeo) e um nó sensor simples.

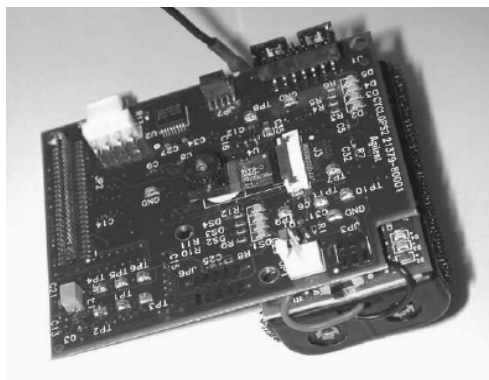


Figura 3.5: Dispositivo de sensoriamento visual *Cyclops* para RSSFs visuais e RSSFs M². Nesta imagem, o dispositivo aparece acoplado a um nó sensor *Mica2* [31].

O *Cyclops* utiliza uma câmera CIF CMOS com suporte para três sistema de cores (8 bits tons-de-cinza, 24 bits RGB e 16 bits YCbCr) e parâmetros ajustáveis como tempo de exposição e balanço de cores. O sensor possui um processador RISC de 8 bits e *clock* de 7 MHz responsável pelo controle do dispositivo (instruir a câmera a capturar um frame, realizar algum processamento na imagem buscando inferir algum conhecimento do ambiente, etc.). Com o objetivo de oferecer um *buffer* de imagens, um dispositivo CPLD (*Complex Programmable*

⁴Espaço de cores aditivo baseado no modelo de cores RGB onde as cores vermelha, verde e azul são combinadas de forma a reproduzir outras cores.

⁵YCbCr é uma família de espaço de cores utilizada em sistemas de vídeo. Y é a componente de luminância, Cb e Cr os componentes de crominância azul e vermelho, respectivamente.

Logic Device) é utilizado para o controle de 512 Kbytes de memória SRAM compartilhada. Além disso, o CPLD pode ser utilizado para executar operações simples durante o processo de captura de imagens como por exemplo, *background subtraction* e estatísticas de imagem. O desenvolvimento de um conjunto de bibliotecas de software para a manipulação de matrizes (operações lógicas e aritméticas), o cálculo de estatísticas (min/max, histograma) e o processamento de imagens (aplicação de filtros) ocorreu paralelamente ao desenvolvimento do hardware do *Cyclops*.

O consumo apresentado pelo sensor *Cyclops* nas atividades de sensoriamento (42 mW) é significativamente inferior ao observado no sistema *CMUcam2*, o que era esperado. Este consumo é comparável ao observado em nós sensores da família Mica [27] quando estes utilizam seus rádios transmissores. Em experimentos destinados a verificar o desempenho para detecção de objetos o *Cyclops* foi correto em 78,4% dos casos, nos 21,6% restantes ou o sistema reportou falso-positivos ou falso-negativos. As latências observadas no algoritmo de detecção foram iguais a 240 ms (imagens de 128×128 pixels), 60,8 ms (64×64) e 16,8 ms (32×32). Já em uma aplicação de reconhecimento de gestos, o *Cyclops* obteve êxito em 92% dos casos para um alfabeto de cinco gestos e utilizando resolução de imagens igual a 64×64 pixels.

3.2.3 Quadro Resumo – Elementos de Sensoriamento Visual

A Tabela 3.1 apresenta características de hardware dos principais elementos de sensoriamento visual descritos nas Seções 3.2.1 e 3.2.2 (para efeitos de comparação foram incluídas as características da plataforma *MicaZ* [32]). Foram considerados itens como processador ou microcontrolador utilizado (arquitetura, frequência de *clock*), quantidade de memória disponível (memória RAM e *Flash*), componente de rádio transmissão (frequência de operação, padrão de comunicação), sensor visual (resolução, tecnologia do sensor – CMOS ou CCD, *Charged Coupled Device*) e recursos extras como conectores e circuitos adicionais.

Informações sobre o perfil energético destes elementos foram consideradas também, entretanto, os dados encontrados nos trabalhos não estão padronizados ou então correspondem a atividades específicas do elemento considerado. Dentre os elementos de hardware considerados nesta seção e listados na Tabela 3.1, apenas a plataforma de sensoriamento visual *Stargate* e o dispositivo de sensoriamento visual *CMUcam2* estão disponíveis comercialmente a um custo financeiro igual a US\$ 925 e US\$ 179, respectivamente. Os demais elementos ou são projetos puramente acadêmicos, ou ainda não são considerados prontos para comercialização como, por exemplo, o dispositivo visual *Cyclops*.

| Elementos de Hardware para o Sensoriamento Visual | | | | | |
|---|---|------------------------------------|--|--|-----------------------------|
| | Processador | Memória | Rádio | Sensor Visual | Extras |
| <i>MicaZ</i> [32] | Atmel ATmega128L 8 bits RISC 7,3728 MHz | 4 Kbytes RAM 128 Kbytes Flash | Chipcom CC2420 IEEE 802.15.4 2,4 GHz | – | – |
| Cao <i>et al.</i> [7] | Samsung S3C44B0X 32 bits RISC 66 MHz | 8 Kbytes RAM | Chipcom CC1000 915 MHz | N. Semiconductor LM9628 640 × 480 (VGA) CMOS | FPGA |
| <i>Panoptes</i> [8] | Intel SA-1110 32 bits RISC 206 MHz | 64 Mbytes RAM | Cartão PCMCIA IEEE 802.11 2,4 GHz | Logitech Quickcam Pro 3000 320 × 240 CCD | USB PCMCIA |
| <i>Stargate</i> [33] | Intel PXA255 32 bits RISC 400 MHz | 64 Mbytes RAM | Cartão PCMCIA IEEE 802.11 2,4 GHz | Logitech Quickcam Pro 4000 640 × 480 (VGA) CCD | USB PCMCIA Ethernet |
| Downes <i>et al.</i> [19] | Atmel AT91SAM7S 32 bits RISC 55 MHz | 64 Kbytes RAM 256 Kbytes Flash | Chipcom CC2420 IEEE 802.15.4 2,4 GHz | Agilent ADNS-3060, 30 × 30 – CMOS Agilent ADCM-1670, 352 × 288 (CIF) – CMOS | USB USB |
| <i>MeshEye</i> [25] | Atmel AT91SAM7S 32 Bits RISC 55 MHz | 64 Kbytes RAM 256 Kbytes Flash | Chipcom CC2420 IEEE 802.15.4 2,4 GHz | 2 × Agilent ADNS-3060, 30 × 30 – CMOS 1 × Agilent ADCM-2700, 640 × 480 (VGA) – CMOS | USB |
| <i>CMUcam2</i> [58] | Ubicom SX52 32 bits RISC 75 MHz | 262 bytes RAM, 4096 bytes Flash | – | Ominivision OV6620, CMOS, 352 × 288 (CIF) Ominivision OV7620, CMOS, 240 × 160 | 384 Kbytes <i>buffer</i> |
| <i>Cyclops</i> [56] | Atmel ATmega128L 8 bits RISC 7,3728 MHz | 4 Kbytes RAM 128 Kbytes Flash | – | Agilent ADCM-1700, CMOS, 352 × 288 (CIF) | CPLD |

Tabela 3.1: Principais elementos de hardware para o sensoriamento visual considerados neste trabalho. O quadro resumo lista as características fundamentais destes elementos.

3.3 Conclusão

Este capítulo apresentou a revisão da literatura de aplicações da tecnologia das RSSF M^2 , aplicações de rastreamento em RSSFs e dos elementos de hardware para o desenvolvimento de RSSFs Visuais. Empregando nós sensores modestos na execução de tarefas simples mas ainda assim relacionadas ao objetivo principal da aplicação, a tecnologia das RSSFs M^2 foi apresentada como uma abordagem viável para o desenvolvimento aplicações que utilizam sensoramento de informações audiovisuais.

O trabalho de Masuda e Hattori [52] descreve uma RSSF M^2 para monitoração ambiental utilizando câmeras e comunicação celular. Ele difere da solução proposta nesta dissertação ao analisar os dados coletados manualmente, por meio de um operador humano e por disseminar informação visual. Maleki *et al.* [50] desenvolve uma RSSF M^2 para monitoração de acidentes em ambientes domésticos. Desta maneira, elementos sensores da rede estão embutidos no objeto de monitoração, o que não está presente na RSSF M^2 para monitoração ambiental projetada, modelada e analisada nos capítulos que seguem. O sistema SensEyes [41] é apresentado como uma aplicação de vigilância visual baseado em múltiplas camadas mas no entanto, difere da RSSF M^2 descrita nesta dissertação por utilizar apenas uma modalidade de sensoramento. Já Hu *et al.* [29] com seu sistema para classificação de sapos, embora utilize sensoramento sonoro também é baseado na distribuição de tarefas entre camadas da rede.

Ainda no capítulo, uma nova classificação dos elementos de hardware para o sensoramento visual foi proposta. Os elementos foram classificados com base na presença ou não de recursos de comunicação e no propósito para o qual eles foram projetados. Para as plataformas de sensoramento visual a tendência é contar com processadores poderosos capazes de executar complexas rotinas de processamento digital de imagens digitais. A baixa taxa de transmissão de dados observada nos dispositivos de comunicação destes elementos é apresentada como sua principal desvantagem. Os dispositivos de sensoramento visual por sua vez, possuem hardware dedicado (processadores ou arranjos de lógica programável) para o processamento das imagens coletadas e não possuem recursos para a disseminação de dados. De maneira geral, ambas as categorias empregam sensores CMOS que capturam imagens e vídeos a cores e apresentam baixa resolução (QCIF).

Utilizando os conceitos apresentados no Capítulo 2, a análise de aplicações da tecnologia das RSSFs M^2 e do rastreamento alvos em RSSFs, no capítulo seguinte é descrito o projeto e a modelagem de uma RSSF M^2 para a monitoração ambiental. A revisão do estado da arte no hardware para o sensoramento visual é empregada na determinação dos dispositivos e plataformas de sensoramento visual a serem utilizadas na avaliação da rede em um ambiente de simulação (Capítulo 5) e na implementação de um protótipo da RSSF M^2 (Capítulo 6).

Capítulo 4

Uma RSSF M^2 para Monitoração Ambiental

Este capítulo apresenta o projeto e a modelagem de uma RSSF M^2 para monitoração ambiental que implementa os principais serviços de uma rede de sensores (sensoriamento, processamento e disseminação) de maneira inteligente distribuindo as tarefas da aplicação entre diferentes nós sensores que compõem a rede¹. Uma aplicação de rastreamento visual de animais silvestres em áreas remotas, com o mínimo de intervenção humana, é definida como estudo de caso. A rede é auto-organizada em três camadas de nós sensores sendo que a primeira relaciona-se preferencialmente com a segunda, a segunda preferencialmente com a terceira obedecendo a uma hierarquia (relacionamentos que quebrem esta hierarquia são permitidos porém, incomuns). Para o serviço de sensoriamento são definidas duas modalidades: sensoriamento de radiação infravermelha e sensoriamento visual (imagens e vídeo). No serviço de processamento o desafio é a utilização de técnicas e algoritmos de processamento digital de imagens e visão computacional para a análise da informação visual. Em virtude deste processamento, o serviço de disseminação não é sobrecarregado com a transmissão de informação multimídia. A Figura 4.1 apresenta a representação lógica da arquitetura proposta para a RSSF M^2 .

O capítulo apresenta na Seção 4.1 a descrição da aplicação de rastreamento visual desenvolvida para a RSSF M^2 proposta. Na Seção 4.2, é descrita a organização da rede multicamada, multimodal. Aspectos referentes à operação da rede são apresentados na Seção 4.3. A Seção 4.4 trata do serviço de processamento realizado pelos nós sensores da RSSF M^2 enquanto que, aspectos de comunicação são tratados na Seção 4.5. As conclusões do capítulo são apresentadas na Seção 4.6 que finaliza o texto.

¹A implementação da RSSF M^2 para monitoração ambiental é realizada em um ambiente de simulação como apresentado no Capítulo 5 e por meio de um protótipo utilizando componentes disponíveis comercialmente como descrito no Capítulo 6.

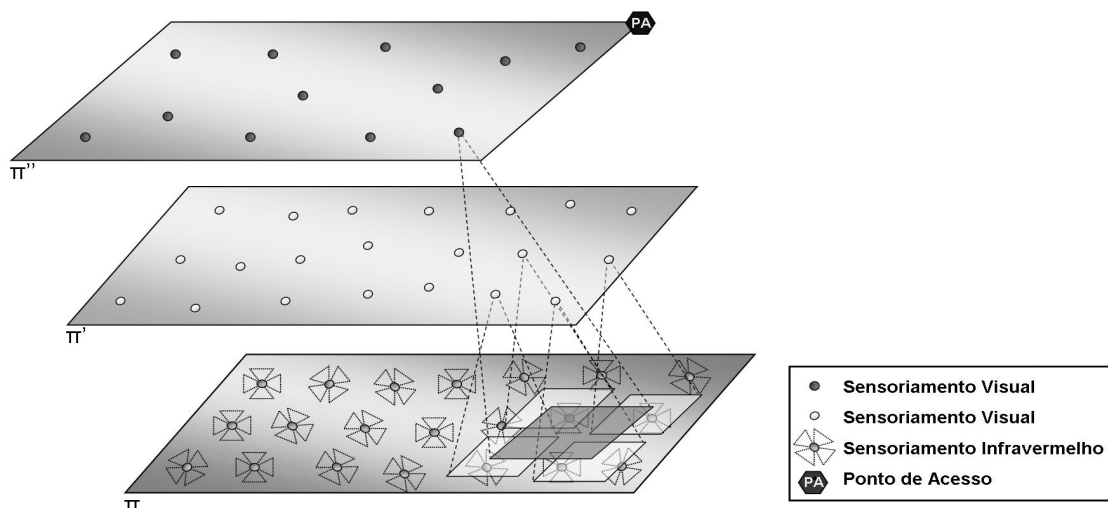


Figura 4.1: Representação lógica de uma RSSF M^2 para monitoração ambiental. A rede é organizada em três camadas de nós sensores heterogêneos e emprega duas modalidades de sensoriamento: radiação infravermelha e imagens/vídeo.

4.1 Aplicação da Rede: Rastreamento Visual

Como mencionado na Seção 2.1.1, as RSSFs são caracterizadas por soluções específicas para as aplicações a qual se destinam. As RSSFs M^2 , uma especialização recente da tecnologia das RSSFs, também apresentam este caráter “dependente da aplicação”. Assim, é interessante especificar os requisitos da aplicação a qual se destina a RSSF M^2 de monitoração ambiental proposta neste trabalho: o rastreamento visual. Em uma aplicação de rastreamento, os elementos da RSSF M^2 detectam, identificam e acompanham a movimentação de objetos, como por exemplo, animais selvagens em florestas ou áreas de preservação e intrusos em áreas de segurança. Não se trata apenas da substituição de olhos humanos por sensores visuais, estas aplicações tem por objetivo a maior automatização possível de tarefas de monitoração ambiental a partir da tecnologia disponível [28].

Nestas aplicações, os eventos de interesse como a presença de um intruso por exemplo, ocorrem com pouca frequência resultando em intervalos de inatividade ao longo da vida da rede. Neste caso, é esperado que a maioria dos elementos de rede permaneçam ociosos ou inativos durante estes períodos e que, no momento da ocorrência dos eventos de interesse, operem sem restrições nos serviços de sensoriamento, processamento e disseminação. Gui e Mohapatra [23] definem dois estágios para as aplicações de rastreamento em RSSFs e suas variações: vigilância e rastreamento. No estágio de vigilância, não existem objetos se movendo pela área de monitoração. A aplicação permanece alerta com seus nós sensores monitorando o ambiente à procura de eventos de interesse ou possíveis invasões. No estágio de rastreamento, a aplicação reage à presença de intrusos executando ações como, por exemplo, a identificação e rastreamento do movimento de intrusos, o disparo de alarmes de alertar para observadores externos, dentre outras.

Economia de recursos energéticos e qualidade de sensoriamento são requisitos conflitantes

nas aplicações de rastreamento em RSSFs, principalmente quando o rastreamento é realizado por sensores visuais. Sem restrições de energia, uma região de interesse poderia ser completamente monitorada bastando que todas as câmeras responsáveis pela cobertura da região estejam ativas. Contudo, considerando as restrições energéticas inerentes às RSSFs, a qualidade de sensoriamento pode se tornar inversamente proporcional ao tempo de vida da rede se não forem adotadas estratégias de gerenciamento de recursos energéticos. Em se tratando de alvos móveis, a cobertura contínua e completa da região de interesse utilizando sensores visuais é desnecessária, uma vez que uma rede com regiões descobertas ainda é capaz de detectar a presença e rastrear o movimento de intrusos com um pequeno atraso. Sensores tradicionais, de menor consumo energético podem ser utilizados na detecção dos alvos e ativação de sensores visuais de custos financeiros e consumo energético mais representativos.

Deve ser ressaltado que, na RSSF M² proposta, o rastreamento é auto-contido, isto é, não é objetivo da aplicação disseminar imagens ou *streams* de vídeo para fora da rede, uma boa estratégia para economizar recursos energéticos no serviço de comunicação. Ao usuário final da aplicação são fornecidas, via PAs, apenas informações a respeito do posicionamento e da trajetória do alvo de interesse. Esta decisão de projeto é responsável por duas características fundamentais da aplicação de rastreamento visual desenvolvida. Primeiro, uma maior carga de processamento será exigida dos elementos da RSSF M² (ou dos elementos de pelo menos uma de suas camadas) para lidar com o grande volume de dados gerados (ver Tabela 2.2 para exemplos de volume de dados produzidos por diversos sensores visuais). Segundo, o fluxo de dados transmitidos através da rede é reduzido (apenas dados textuais são disseminados) prolongando o tempo de vida da RSSF M².

4.2 Organização das Camadas da Rede

A divisão da aplicação em várias tarefas e posterior distribuição destas entre as camadas da rede são duas das principais decisões no projeto de uma RSSF M². Em uma aplicação de rastreamento típica, a despeito de outras possíveis tarefas, três são as tarefas chave: *i*) detectar objetos, *ii*) identificar possíveis alvos de interesse e *iii*) rastrear alvos de interesse. Estas tarefas são relacionadas isto é, uma não pode ter início até que a anterior tenha terminado. Por exemplo, um objeto só pode ser identificado a partir do momento que tenha sido detectado. Como consequência desta divisão de tarefas de uma aplicação de rastreamento e da disponibilidade comercial dos elementos de hardware para o sensoriamento visual apresentados na Seção 3.2, a RSSF M² para monitoração ambiental desenvolvida neste trabalho tem seus elementos de rede organizados em três camadas de nós sensores que são descritas a seguir.

A primeira camada (plano II na Figura 4.1) é constituída por nós equipados com sensores infravermelho passivos (PIR) capazes de detectar a presença de objetos² que emitem calor e que estejam em movimento na região de monitoração (ver Figura 4.2). Segundo Vlaam

²No contexto deste trabalho o termo *objeto* é utilizado para designar possíveis alvos que ainda não tenham sido identificados, o termo *alvo* remete aos objetos de interesse para a aplicação para a aplicação já identificados e aptos a serem rastreados.

Objetos que geram calor, seres humanos e animais, por exemplo, emitem radiação infravermelha. Este tipo de radiação possui comprimento de onda superior ao da luz visível, ou seja, é imperceptível a olho nú, podendo, entretanto, ser detectado por meio de sensores PIR. Um sensor PIR é feito de material cristalino de propriedades piroelétricas que, ao ser exposto à radiação infravermelha, gera uma diferença de potencial correspondente à radiação observada. Nestes sensores, o termo “passivo” remete à forma como a radiação infravermelha é captada, o elemento piroelétrico não emite energia, recebe passivamente toda a radiação ao seu alcance. De forma geral, um sensor PIR é composto de dois elementos piroelétricos e a resposta do sensor é baseada na diferença de potencial entre estes. Esta característica cancela efeitos causados por vibração, mudanças de temperatura e luz solar além de permitir identificar o sentido do movimento do objeto detectado (ver Figura 4.2).

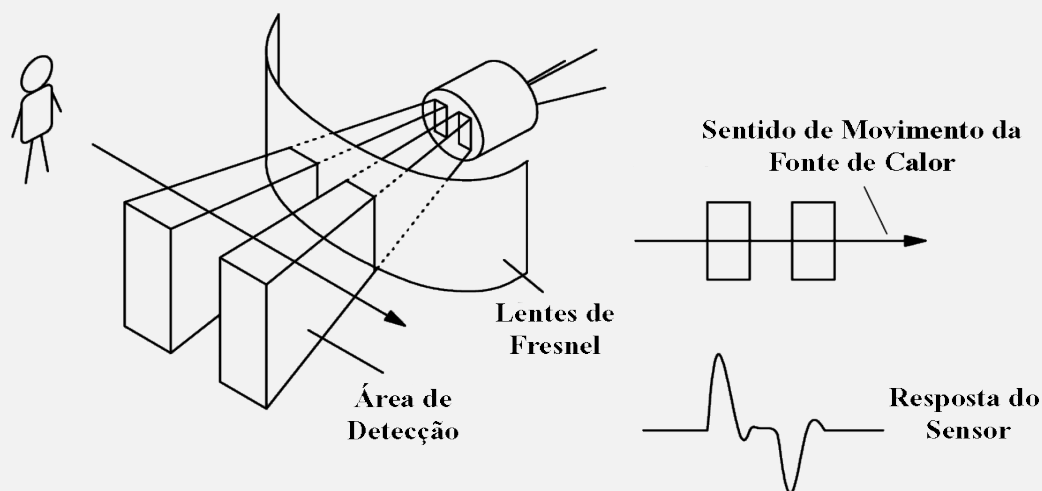


Figura 4.2: Sensor PIR dotado de dois elementos piroelétricos. Ao entrar na linha de visada do sensor, um objeto que gera calor ativa sucessivamente os dois elementos piroelétricos produzindo uma diferença de potencial positiva ou negativa dependendo de qual elemento foi ativado primeiro. Dessa forma é possível determinar a direção do movimento do objeto.

[18] e Arora *et al.* [1], os sensores PIR apresentam baixo consumo energético, possuem custo monetário e tamanho reduzidos, necessitam de pouco processamento e apresentam resultados confiáveis. Os nós sensores PIR realizam sensoriamento contínuo do ambiente em busca de variações bruscas na radiação coletada (forte indício da presença de intrusos). Uma vez que não possuem a capacidade de identificar os objetos detectados, outra tarefa desempenhada pelos nós sensores da primeira camada é dar prosseguimento à tarefas do rastreamento acionando elementos de rede vizinhos mas que pertençam a camadas superiores.

A segunda camada (plano II' na Figura 4.1) utiliza nós sensores equipados com dispositivos de sensoriamento visual (ver Seção 3.2.2) com a capacidade de identificar objetos sob seus campos de visão. Este processo permite determinar se o objeto detectado é de interesse para a aplicação e se é necessário o seu rastreamento. Na aplicação desenvolvida a identificação é realizada com base no atributo de baixo nível cor, ou seja, os possíveis alvos são caracterizados pela cor que lhes é predominante.

À terceira e última camada (plano Π'' na Figura 4.1) fica incumbida a tarefa de rastrear o objeto à medida que este se desloca pelo ambiente. O conjunto de nós sensores que a compõem deve computar a posição corrente do alvo e determinar a sua trajetória. O *handoff* da responsabilidade de rastreamento entre elementos desta camada (uma relação intra-camada) também pode ser realizado embora, no contexto deste trabalho, não seja necessário uma vez que as camadas inferiores estão vigilantes.

Como relação à divisão da aplicação de rastreamento visual em estágios de vigilância e de rastreamento, ao utilizar múltiplas camadas de nós sensores, as RSSFs M^2 tornam possível que camadas diferentes atuem em estágios diferentes da aplicação.

Na RSSF M^2 proposta, a camada composta por nós sensores PIR atua no estágio de vigilância na aplicação de rastreamento visual. As características da modalidade de sensoriamento infravermelho permitem que uma grande quantidade destes nós sensores sejam distribuídos pelo ambiente monitorado. Vale a pena ressaltar que, embora a cobertura desta camada deva ser homogênea, ela não precisa ser, necessariamente, completa uma vez que existem outras camadas que podem cobrir possíveis áreas descobertas. As camadas que empregam sensores visuais (segunda e terceira camadas) são responsáveis pelo estágio de rastreamento da aplicação. De custo monetário e consumo energético mais elevados estas camadas apresentam distribuição dos nós sensores esparsa (a terceira camada mais que a segunda) e executam seus serviços de sensoriamento, processamento e disseminação apenas em situações de interesse, reagindo a eventos.

4.3 Comportamento das Camadas da Rede

O comportamento da RSSF M^2 para monitoração ambiental é descrito, de forma simplificada, como a seguir. Após a deposição da RSSF M^2 , apenas nós sensores PIR realizam o sensoriamento da região monitorada. Uma vez detectado um objeto em movimento, nós sensores visuais da segunda camada devem ser acionados para a identificação do mesmo. A identificação positiva do alvo leva à ativação dos nós sensores visuais da terceira camada para a realização do rastreamento.

O comportamento detalhado dos diferentes elementos da rede é mais complexo e, para descrever tal comportamento, neste trabalho é adotado a modelagem por Máquinas de Estados Finitos Estendidas e Comunicantes (MEFEC). No seuiência do texto, é apresentada uma breve descrição das MEFEC e, em seguida, a modelagem do comportamento de cada uma das camadas da RSSF M^2

4.3.1 Máquinas de Estados Finitos Estendidas e Comunicantes

MEFECs são máquinas de estados finitos estendidas que possuem predicados que podem ser associados a suas transições e que, além disso podem interagir com outras máquinas ou o ambiente [5]. Nestes autômatos, as transições entre estados se dão após a ocorrência de eventos, aos quais o sistema responde executando ações correspondentes. Ao término destas

ações, se necessário, os resultados são comunicados a outras máquinas ou outros elementos do ambiente.

Formalmente, uma máquina de estados finitos estendida e comunicante é uma 6-tupla, $MEFEC = \{S, s_0, E, f, V\}$, onde:

- S é um conjunto de estados;
- s_0 é o estado inicial;
- E é um conjunto de eventos;
- f é uma função de transição e
- V é um conjunto de variáveis, se existirem.

Uma MEFEC pode ser representada por um diagrama de transição de estados onde os vértices correspondem aos estados e, as arestas, às transições de estado. A Figura 4.3 apresenta o diagrama de transição de estados de uma MEFEC constituída por dois estados, 1 e 2, e duas transições. No diagrama, as transições são rotuladas da seguinte maneira: **evento / ações / resultados**. É importante notar que, exceto pelo evento responsável pela da transição inicial, eventos são obrigatórios em todas as transições enquanto que, ações e resultados são opcionais. O símbolo “-” em uma transição é utilizado para indicar que não existem valores correspondentes para o campo em questão.

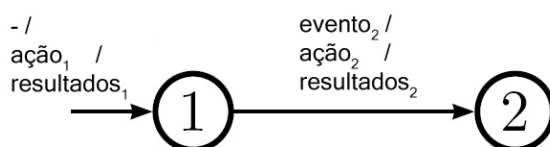


Figura 4.3: Diagrama de transição de estados representando um MEFEC.

Como apresentado acima, uma MEFEC pode utilizar predicados para controlar o comportamento do autômato, isto é, suas transições. Ao receber um evento, a máquina de estados verifica um predicado composto por variáveis, operadores lógico e de comparação. Se o predicado for avaliado como verdadeiro, são realizadas ações correspondentes e caso seja interessante, os resultados são comunicados a outras máquinas. As MEFECs apresentadas neste trabalho não utilizam predicados.

As MEFECs podem possuir, ainda, temporizadores e operações relacionadas a este temporizador. Durante uma transição, um temporizador é iniciado com um dado intervalo de tempo. Se o temporizador não for cancelado, ele gera um evento de expiração de temporizador assim que o intervalo se encerra. Quanto um evento de interesse ocorre antes do temporizador expirar, este é cancelado e a transição para o estado seguinte prossegue normalmente. São duas as operações relacionadas a um temporizador, **set** e **reset**. A operação **set(v, T1)** associa um intervalo de tempo v ao temporizador $T1$ e a operação **reset(T1)** é utilizada para cancelar o mesmo.

4.3.2 Primeira Camada

A modelagem do comportamento dos nós sensores PIR da primeira camada apresenta três estados de operação como pode ser visto no diagrama de transição de estados³ da Figura 4.4. O transição inicial do diagrama é caracterizada pela coleta e digitalização do sinal obtido dos sensores PIR leva ao **Estado 1**. Neste estado, os níveis de radiação infravermelha observados no ambiente são comparados a um limiar pré-estabelecido (ver Seção 6.1 para maiores detalhes a respeito deste limiar). Enquanto estas comparações não indicarem a presença de possíveis objetos na área monitorada, isto é, enquanto os nível de radiação observada for inferior ao limiar, os nós PIR permanecem realizando novas coletas. Alterações superiores a este nível caracterizam a presença de um possível alvo e provocam a transição para o **Estado 2**. Neste segundo estado, o nó sensor cria uma mensagem *wake up* que é utilizada para alertar nós sensores da segunda camada a respeito de objetos na vizinhança. A disseminação desta mensagem, em *broadcast*, tem como efeitos a transição para o **Estado 3**, a desativação dos componentes do elemento de rede (rádio, sensores) e a iniciação de um temporizador utilizado na reativação destes componentes. O **Estado 3** é caracterizado pela ausência de atividades, ou seja, o nó sensor permanece ocioso durante um intervalo de tempo. Este período é necessário uma vez que o objeto pode permanecer na linha de visada do nó sensor infravermelho passivo mesmo após sua detecção, o que provocaria uma inundação da rede com mensagens *wake up*. Encerrado o temporizador, o nó sensor ativa novamente seus componentes e retorna ao estado inicial (**Estado 1**). O ciclo de operação dos elementos desta camada é simples, o que era esperado uma vez que ela realiza a tarefa de menor complexidade de toda a aplicação.

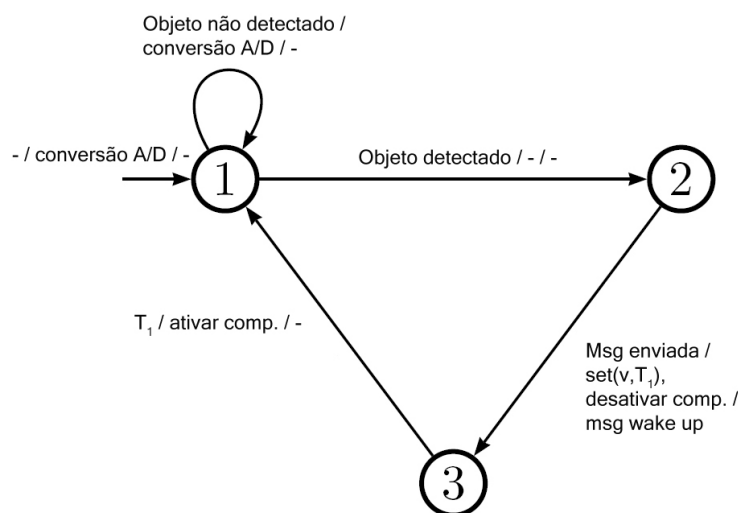


Figura 4.4: Diagrama de transição de estados de operação para os nós sensores PIR que compõem a primeira camada da RSSF M² para a monitoração ambiental.

³Deve ser observado que o comportamento relatado nos diagramas de transição de estados para todas as camadas considera que os procedimentos de *boot up* da rede já foram realizados e os nós sensores estão prontos para operação.

4.3.3 Segunda Camada

Os quatro estados de operação da MEFEC que representam o comportamento dos nós sensores visuais da segunda camada, bem como as transições possíveis entre eles, são apresentados no diagrama de transição de estados da Figura 4.5. Para os elementos desta camada, durante o *boot up* da rede, seus componentes são todos desativados. O acionamento do dispositivo de rádio transmissão conduz ao estado inicial do diagrama. Durante o **Estado 1** este dispositivo permanece ativo à espera de mensagens *wake up* disseminadas por nós sensores infravermelho passivos. Ao receber tal mensagem, o nó sensor visual tem sua câmera de vídeo ativada, um temporizador para o controle da atividade deste dispositivo é iniciado e o elemento de rede passa a operar sob o **Estado 2**. No **Estado 2** são aplicados algoritmos de detecção de movimentos nas imagens capturadas com o objetivo de detectar objetos se deslocando pelo ambiente durante o intervalo do temporizador. Este intervalo é importante, uma vez que o alvo dificilmente irá se deslocar em direção a todos os nós sensores visuais que receberam uma mensagem *wake up*. Se for detectada a movimentação de algum objeto sob o campo de visão da câmera ocorre uma transição para o **Estado 3**. Caso contrário, isto é, quando temporizador é disparado, o sensor visual é desativado e a transição é de volta ao **Estado 1**. No **Estado 3**, os nós sensores visuais utilizam algoritmos de visão computacional e processamento digital de imagens para a identificação do objeto com base no atributo de baixo nível cor (ver Seção 6.2.2 a respeito desta identificação). A identificação permite ao nó sensor determinar se o alvo é do interesse da aplicação, ou seja um alvo válido. Alvos válidos provocam a transição para o **Estado 4**, onde uma nova mensagem *wake up*, direcionada à terceira camada, é produzida e disseminada (após a disseminação desta mensagem, o nó sensor retorna ao estado inicial – **Estado 1**). Alvos inválidos, aqueles que não possuem um padrão de cor condizente com o especificado para a aplicação, resultam na desativação do sensor visual e no retorno ao estado inicial.

4.3.4 Terceira Camada

A terceira camada possui comportamento semelhante àquele apresentado pela segunda camada com um diferencial de não precisar disseminar mensagens para despertar nós sensores, uma vez que, na RSSF M² projetada nesta dissertação não existem outras camadas. Os nós sensores possuem então, apenas três estados. No **Estado 1**, os elementos de rede estão com rádios ativos à espera de mensagens *wake up* vindas da segunda camada e todos os demais componentes ociosos. O recebimento de uma destas mensagens leva o nó sensor ao **Estado 2** e, assim como na segunda camada, o sensor visual é ativado. A permanência neste segundo estado é determinada por um temporizador iniciado na transição entre os **Estados 1** e **2**. Encerrado este intervalo sem que a presença do alvo tenha sido detectada, isto é, quando o temporizador é disparado, o sensor visual é desativado e o elemento de rede volta a operar sob o estado inicial (**Estado 1**). Caso contrário, o nó sensor avança ao **Estado 3** onde é realizado o rastreamento do alvo de interesse para a aplicação. Enquanto este alvo estiver sob o campo de visão da câmera o rastreamento prossegue e as informações coletadas são

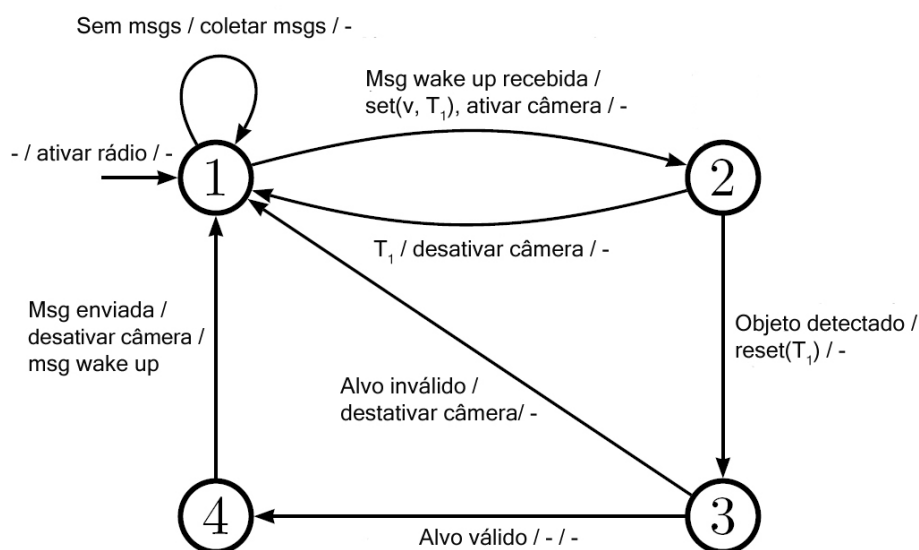


Figura 4.5: Diagrama de transição de estados de operação dos nós sensores da segunda camada da aplicação de monitoração ambiental. Observe que durante os dois primeiros estados o objeto detectado é tratado de forma genérica e somente quando é realizada sua identificação ele é tratado como alvo (válido ou não).

disseminadas para o ponto acesso da RSSF M². Uma vez que o alvo não estiver mais visível ocorre uma transição para o estado inicial. A Figura 4.6 apresenta o diagrama de transição de estados para a MEFEC que sumariza o comportamento descrito neste parágrafo.

Os temporizadores utilizados nos sensores visuais das segunda e terceira camadas com o objetivo de manter suas câmeras ativas à espera do objeto/alvo atingir seus FoVs são iguais ao período ocioso dos nós sensores PIR da primeira camada. A opção por intervalos de tempo iguais permite por exemplo, uma interação entre os elementos da primeira e segunda camadas. Enquanto os nós sensores visuais despertados monitoram o ambiente, o nó sensor PIR responsável por disseminar a mensagem *wake up* permanece ocioso, economizando recursos energéticos. Outro detalhe importante a respeito dos temporizadores, com relação ao **Estado 2** nas segunda e terceira camadas, deve ser mencionado. Se, durante o tempo de vigência do temporizador o nó sensor receber uma nova mensagem *wake up*, o temporizador é reiniciado.

4.4 Processamento nas Camadas da Rede

O caráter auto-contido da RSSF M² para monitoração ambiental descrita neste capítulo está relacionado ao serviço de processamento realizado pelos seus nós sensores, em especial àqueles que equipados com sensores visuais. Como apresentado na Seção 4.2, uma aplicação de rastreamento é composta pelas tarefas de detecção, identificação e rastreamento que, neste trabalho, foram distribuídas à primeira, segunda e terceira camadas da RSSF M².

O serviço de processamento executado nos elementos de rede que formam a primeira

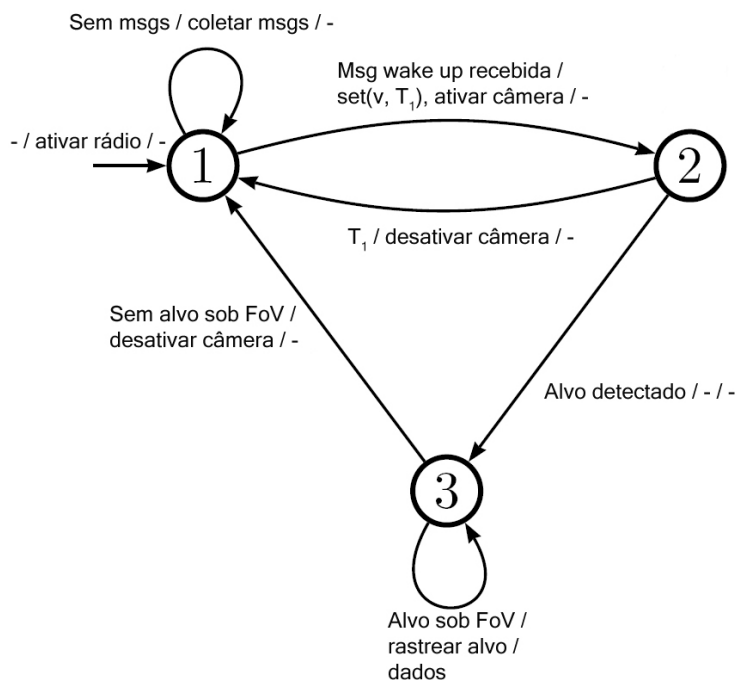


Figura 4.6: Diagrama de transição de estados de operação dos nós sensores da terceira camada da aplicação de monitoração ambiental. Observe que o objeto rastreado é tratado como alvo uma vez que já foi identificado pelos nós sensores da segunda camada.

camada consiste na conversão do sinal de radiação infravermelha coletada realizada pelo conversor A/D encontrado no microcontrolador do nó sensor. Este sinal é então comparado a um limiar a fim de determinar a existência ou não de uma detecção positiva. Para esta camada, o serviço de processamento da RSSF M² se comporta como aqueles realizados nas RSSFs tradicionais.

No serviço de processamento dos nós sensores visuais da segunda camada da RSSF M² estão presentes tarefas relacionadas à detecção de objetos em movimento e ao rastreamento de um alvo. A subtração de *background* implementada pelos elementos desta camada, é uma técnica de segmentação de imagens utilizada na detecção de movimentos (esta atividade correspondente ao **Estado 2** do diagrama da Figura 4.5). O método realiza uma subtração *pixel-a-pixel* entre a imagem corrente e uma imagem de referência (*background frame*). Após obter a diferença absoluta, uma função limiar é utilizada para determinar a ocorrência de mudanças entre os quadros e detectar objetos em movimento em relação ao *background frame* [25]. A fragilidade do método decorre de sua sensibilidade a cenários dinâmicos, o que não chega a ser um problema nas aplicações de monitoração ambiental, onde os eventos de interesse são escassos. É importante observar que, na aplicação desenvolvida, sempre que o sensor visual é ativado ao receber uma mensagem *wake up*, uma nova imagem de referência é capturada.

A técnica de subtração de *background* apenas, não é capaz de identificar os objetos detectados. Na RSSF M² para monitoração ambiental descrita neste trabalho, a identificação de um alvo é realizada com base em sua cor predominante. Assim, o serviço de sensoriamento dos elementos da segunda camada utiliza uma atividade de extração, *pixel-a-pixel*, de elemen-

tos da imagem e o agrupamento destes por meio do atributo de cor para identificar possíveis alvos. A presença de regiões nas cores características do alvo sob monitoração resultam em sua identificação positiva. Maiores detalhes a respeito da implementação dos algoritmos de subtração de *background* e identificação de alvos são apresentadas na Seção 6.2.2 do capítulo que descreve a implementação de um protótipo real da RSSF M².

No serviço de processamento dos elementos da terceira camada da RSSF M² é empregado o algoritmo de rastreamento visual CamShift [4]. De maneira geral, a tarefa do rastreamento envolve o reconhecimento de alvos entre quadros de uma sequência de imagens capturadas pelo sensor visual utilizando atributos como pontos, linhas, cores ou *blobs* [28]. No CamShift é um métodos de rastreamento baseado em contorno ativo e no atributo de baixo nível cor. Nos métodos baseados em contorno ativo, os alvos têm suas formas representadas por um *bounding box* e o rastreamento é realizado por meio da atualização dinâmica do posicionamento e das dimensões destas estruturas. Já para os algoritmos baseados no atributo de cor o rastreamento é realizado pela extração e agrupando de elementos das imagens que apresentam distribuição de cores condizendo com o alvo a ser monitorado (semelhante ao método de indentificação utilizado pelos elementos da segunda camada). O CamShift é apresentado em detalhes na Seção 6.3.2.

4.5 Comunicação entre Camadas da Rede

Como observado por Hengstler e Aghajan [25], à medida que inteligência embutida nos elementos de rede e, por conseqüência, nas RSSFs M² de forma geral aumenta, a necessidade de largura de banda para a disseminação da informação processada tende a diminuir. A presença de nós sensores visuais inteligentes, com a capacidade de extrair de informações de alto nível (identificação e rastreamento de alvos) dos dados coletados, proporciona uma redução no fluxo de informação multimídia disseminada pela RSSF M².

A disposição dos elementos das RSSFs M² em camadas por outro lado, se traduz em um maior número de mensagens *wake up* e de controle na rede. A princípio este aumento pode ser percebido como prejudicial à rede pois tem impacto negativo no consumo de recursos energéticos do serviço de disseminação. O *trade-off* entre a redução no fluxo de informação multimídia e o aumento do fluxo de mensagens de controle, no entanto, é considerado positivo uma vez que informação multimídia é mais volumosa e tem custo energético mais elevado que a disseminação de mensagens textuais.

O alerta da presença de objetos na região de monitoração é realizado pelos elementos sensores da primeira camada ao disseminarem mensagens *wake up*. Estas mensagens são transmitidas aos nós sensores da segunda camada que se encontram na vizinhança do nó sensor PIR que detectou o objeto. As mensagens *wake up* possuem, além da identificação do elemento de rede que está disseminando o alerta (endereço e camada), o destino da mensagem (neste caso um endereço de *broadcast* para a segunda camada da RSSF M²) e as coordenadas do alvo. Afim de evitar que nós sensores distantes da região de interesse sejam ativados desnecessariamente, a potência de transmissão dos nós sensores PIR é ajustada de forma que

as mensagens *wake up* alcancem somente a vizinhança desejada.

De maneira semelhante, os nós sensores visuais da segunda camada devem transmitir mensagens *wake up* aos elementos da terceira camada sempre que identificarem um objeto como sendo um alvo válido para a aplicação de rastreamento visual. Aqui porém, mais relevante que acionar a vizinhança do emissor da mensagem é acionar o nó sensor visual da terceira camada que apresente um grau de sobreposição de FoV com o nó sensor visual da segunda camada emissor da mensagem *wake up*. No contexto desta dissertação, é assumido que todos os nós sensores visuais da RSSF M² estão com suas câmeras calibradas, isto é, eles possuem conhecimento dos valores de seus parâmetros intrínsecos⁴ e extrínsecos⁵ dos sensores visuais. Assim, durante a fase de *boot up*, nós sensores da terceira camada disseminam mensagens *hierarchy* que contêm, além de informações de identificação do nó sensor, as coordenadas do FoV de suas câmeras (já ajustadas com relação às coordenadas da região de monitoração). Ao receber uma destas mensagens, nós sensores visuais da segunda camada determinam a existência ou não de sobreposição entre FoVs. Existindo sobreposição, o endereço do nó emissor é adicionado à lista de elementos da terceira camada a serem acionados. Cada nó sensor visual da segunda camada possui sua própria lista.

A transmissão de outras mensagens, em especial aquelas contendo informações de rastreamento são direcionadas ao nó sorvedouro da rede e utilizam os nós sensores de todas as camadas. Neste ponto a rede se comporta como uma rede de sensores homogênea de uma única camada utilizando protocolos de roteamento tradicionais nas RSSFs. Isto é possível uma vez que a informação de rastreamento disseminada consiste, basicamente, de dados textuais descrevendo a trajetória do alvo observado. Na RSSF M² desenvolvida não existe transmissão de informação multimídia, apenas o seu sensoramento.

4.6 Conclusão

Este capítulo apresentou a proposta de uma RSSF M² para monitoração ambiental. A rede emprega duas modalidades de sensoramento, o sensoramento infravermelho passivo e o sensoramento visual utilizando câmeras de vídeos. A rede emprega ainda, nós sensores heterogêneos distribuídos em três camadas auto-organizadas.

Uma aplicação de rastreamento visual foi definida como estudo de caso para RSSF M² proposta. As três principais tarefas da aplicação, *i*) detecção de objetos, *ii*) identificação de objetos e *iii*) rastreamento de alvos, foram distribuídas entre as camadas da rede. Os nós sensores PIR da primeira camada monitoram continuamente o ambiente detectando a

⁴Parâmetros intrínsecos podem ser resumidos à distância focal, f , às dimensões do sensor, d_u e d_v , e às coordenadas, em *pixels*, do centro de imagem, $o = (o_u, o_v)$. São considerados parâmetros intrínsecos ainda, o eixo ótico do sensor e as distorções causadas pelas lentes da câmera [15].

⁵Parâmetros extrínsecos referem-se à pose (posição e orientação) da câmera em relação ao sistema de coordenadas global adotado. A posição é representada pelas coordenadas do centro de projeção, C . Quanto à orientação, ou rotação, é comum que seja representada por um conjunto de ângulos. Entretanto, em certos casos é mais usual que a orientação seja especificada por alguns vetores que correspondem a alguns eixos locais da câmera [15].

presença de possíveis alvos, acionando nós sensores visuais da segunda em resposta aos eventos de interesse. Estes identificam os objetos detectados e acionam os nós sensores da terceira camada para a realização da tarefa de rastreamento.

No desenvolvimento do capítulo foi apresentada também, uma modelagem baseada em estados para o comportamento dos nós sensores da RSSF M². Os estados e as ações ou eventos que provocam transições entre eles foram descritos em detalhes para cada uma das camadas que compõem a rede. O texto foi encerrado descrevendo aspectos de interação e comunicação entre os elementos da rede, em especial a criação da hierarquia de disseminação de mensagens *wake up* entre os elementos da segunda e terceira camadas.

Nos capítulos que seguem são apresentados a avaliação do comportamento da RSSF M² para monitoração ambiental em um ambiente simulado e o desenvolvimento de um protótipo da aplicação de rastreamento visual utilizando componentes eletrônicos, sensores e plataformas disponíveis comercialmente.

Capítulo 5

Avaliação de Desempenho

Neste capítulo, são apresentados cenários de simulação, experimentos e seus respectivos resultados, conduzidos para a avaliação do desempenho da RSSF M^2 para monitoração ambiental proposta. Os experimentos foram realizados no ambiente de simulação de redes NS-2 [55]. Originalmente o NS-2 não contempla as particularidades das RSSFs. Para superar esta limitação foi utilizado, juntamente com o NS-2, o arcabouço MannaSim [43]. Trata-se de um conjunto de classes que ampliam as funcionalidade do NS-2 introduzindo novos módulos que facilitam o projeto, desenvolvimento e análise de simulações da tecnologia de RSSFs.

Tradicionalmente, os resultados de pesquisas na área das redes de computadores têm sido obtidos a partir de simulações. Para as RSSFs M^2 , em particular, as simulações são vantajosas sob alguns aspectos: *i)* o custo atual dos nós sensores visuais é elevado variando entre centenas e milhares de dólares, o que impossibilita a criação de cenários que empregam uma grande quantidade destes elementos; *ii)* diferentes configurações de nós sensores podem ser utilizadas durante as simulações permitindo determinar o conjunto que melhor se adequa à aplicação; e principalmente, *iii)* a replicabilidade dos experimentos que possibilita variação dos parâmetros de configuração dos nós sensores permitindo um ajuste fino da rede. Neste trabalho, além da avaliação de desempenho da RSSF M^2 , simulações foram utilizadas em uma análise comparativa entre a abordagem proposta e duas outras encontradas na literatura, uma RSSF Visual Heterogênea Multicamada [41] e uma RSSF Visual Homogênea de uma única camada de nós sensores [51].

O texto do capítulo está organizado da seguinte maneira. Na Seção 5.1, são descritos os cenários de simulação, são apresentadas configurações comuns a todos os cenários simulados, bem como configurações específicas das redes consideradas. O arcabouço MannaSim para simulação de redes de sensores é apresentado na Seção 5.2 em conjunto com algumas extensões a ele incorporadas e que são necessárias à simulação de RSSFs M^2 . A Seção 5.3 apresenta uma avaliação do desempenho da RSSF M^2 abordando cenários que utilizam diferentes configurações de raio de transmissão de mensagens, tempo de sensoriamento visual à espera de objetos e velocidade de deslocamento dos alvos. Uma análise comparativa entre a RSSF M^2 e outras duas abordagens é descrita na Seção 5.4 e a Seção 5.5 finaliza o capítulo texto apresentando algumas conclusões.

5.1 Caracterização das Simulações

As simulações foram realizadas considerando características de elementos reais como os nós sensores da família MicaZ [32], a plataforma de sensoriamento visual *Stargate* [33] e o dispositivo de sensoriamento visual *CMUcam2*[58] (ver Tabelas 2.1, 3.1 e a Seção 3.2 para detalhes a respeito destes dispositivos). Desta forma, foi possível criar três diferentes perfis de elementos sensores para compor as redes simuladas: MicaZ/PIR, MicaZ/CMUcam2 e Stargate/Webcam.

MicaZ/PIR – Nós sensores MicaZ foram equipados com sensores infravermelhos passivos (PIR) a partir de um circuito desenvolvido no contexto desta dissertação (ver Seção 6.1). Nas simulações, os nós sensores do perfil MicaZ/PIR possuem, cada um, quatro sensores infravermelho passivos possibilitando ao nó monitorar toda região a seu redor. Os sensores PIR apresentam ângulo de abertura igual a 100 graus e alcance máximo de sensoriamento de 6,5 metros. Estes termos podem ser melhor compreendidos no diagrama da Figura 5.1. A coleta de dados é contínua e realizada ciclicamente entre os sensores, isto é, a cada coleta apenas um dentre os quatro sensores PIR tem seus dados utilizados. Em números, um segundo de sensoriamento representa coletadas 100 leituras do nível de radiação infravermelha do ambiente (uma coleta a cada 10 milissegundos, 25 coletas por sensor).

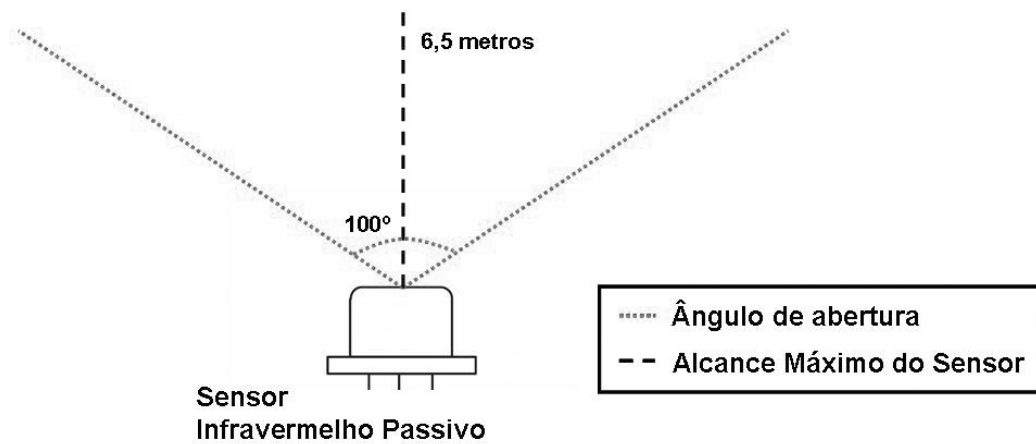


Figura 5.1: Configurações do sensor infravermelho passivo utilizadas durante as simulações. Observe que o ângulo de abertura do sensor é expandido por meio do uso de lentes de fresnel.

MicaZ/CMUcam2 – Nós sensores MicaZ foram equipados com o dispositivo de sensoriamento visual *CMUcam2*. Estes sensores não possuem conexão nativa com a plataforma *MicaZ* e foi necessário o desenvolvimento de mecanismos para a comunicação entre os dispositivos (ver Seção 6.2). Os nós sensores do perfil MicaZ/CMUcam2 apresentam câmeras posicionadas *overhead*, ou seja, câmeras com visão aérea do ambiente monitorado. O campo de visão das câmeras alcança 3 metros em todas as direções a partir de seus centros de projeção formando uma região de sensoriamento quadrangular de 6

metros de comprimento. Novamente, estas configurações podem ser melhor compreendidas em um diagrama (ver Figura 5.2). Os nós sensores apresentam comportamento reativo (o recebimento de mensagens *wake up*) e são programados para capturar vídeos do ambiente, quando os *CMUcam2* estiverem ativos, com frequência igual a 5 quadros por segundo.

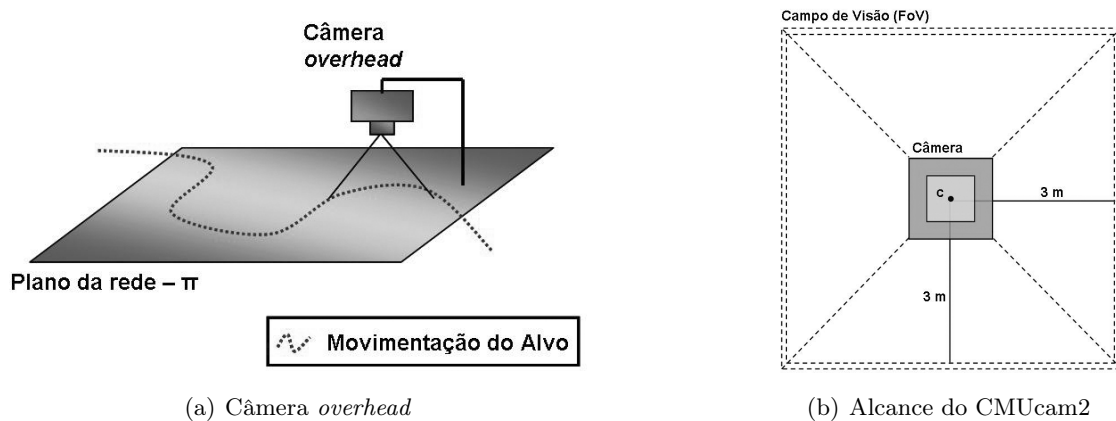


Figura 5.2: Configurações dos nós sensores do perfil *MicaZ/CMUcam2*: *a)* posicionamento *overhead* que proporciona visão aérea do ambiente e *b)* dimensões do FoV do dispositivo *CMUcam2* (“*c*” indica o centro de projeção da câmera).

Stargate/Webcam – Nós sensores *Stargate* foram equipados, cada um, com uma câmera USB (*Webcam*). Os nós sensores do perfil *Stargate/Webcam* utilizam câmeras com visão aérea e apresentam campo de visão quadrangular com 10 metros de comprimento. Possuem comportamento reativo e taxa de captura de vídeos igual a 10 quadros por segundo (quando o sensor visual estiver ativo). Os nós sensores *Stargate/Webcam* apresentam ainda, latência de ativação do sensor visual igual a 1,3 segundos conforme observado em Margi *et al.* [51].

Com relação aos recursos de comunicação encontrados nos elementos sensores, foi adotada largura de banda de 250 kbps nos nós sensores da plataforma *MicaZ*, banda máxima da arquitetura [32]. O raio de transmissão de dados nestes nós foi ajustado para 20 metros. Para os nós sensores da plataforma *Stargate* foi adotada largura de banda de 11 Mbps e alcance de transmissão de 40 metros. Na simulação de ambos nós sensores, o padrão IEEE 802.11 foi escolhido como protocolo de controle de acesso ao meio. O tamanho das mensagens *wake up* e *hierarchy* foi ajustado para 19 e 28 bytes, respectivamente (ver Seção 4.5 com relação ao conteúdo destas mensagens).

Com o intuito de avaliar consumo energético, as simulações consideraram os principais serviços executados pelos nós sensores das redes. Além de gastos referentes às atividades de comunicação (recepção e transmissão de mensagens, rádio ocioso), a energia consumida com sensoriamento, processamento e ativação de sensores visuais foram computados. A tabela

5.1 lista valores de potência dissipada (em watts) para cada uma das operações consideradas (campos em branco representam atividades cujo consumo é mínimo e portanto, não influencia o consumo total). A reserva energética inicial dos conjuntos MicaZ/PIR, MicaZ/CMUcam2 e Stargate/Webcam foi ajustada para, respectivamente, 2.000, 2.000 e 4.000 joules (valores correspondentes à reserva energética fornecida por duas e quatro pilhas tamanho AA).

| Operação | Potência Dissipada por Operação (<i>watts</i>) | | |
|---------------|--|---------------|-----------------|
| | MicaZ/PIR | MicaZ/CMUcam2 | Stargate/Webcam |
| Transmissão | 0,042 | 0,042 | 1,425 |
| Recepção | 0,0591 | 0,0591 | 0,925 |
| Rádio Ocioso | 0,0006 | 0,0006 | 0,045 |
| Processamento | 0,024 | 0,0985 | 0,925 |
| Sensoriamento | 0,015 | 1,165 | 1,653 |
| Ativar Câmera | – | – | 1,348 |

Tabela 5.1: Potência dissipada por operação para cada um dos perfis de nós sensores empregados durante as simulações. *Importante:* os valores apresentados na linha “ocioso” estão relacionados ao referentes ao rádio transmissor.

A movimentação de objetos pela área monitorada foi tratada na simulação como pequenos deslocamentos em movimento retilíneo uniforme (MRU) com velocidades iguais a 2,5 m/s. Desta forma é possível que um objeto realize “passeios” aleatório durante o período de simulação. Estes objetos possuem coloração uniforme e o deslocamento é realizado no plano bidimensional, ou seja, não existem elevações no terreno considerado.

As simulações foram realizadas em um IBM/PC equipado com um processador Intel Pentium 4 com frequência de *clock* igual a 3.0 GHz, 1 GByte de memória principal e 80 Gbytes de memória secundária. Cada cenário foi simulado 33 vezes com tempo de simulação limitado em 3.000 segundos e quatro passeios aleatórios realizados por um objeto. Além disso, nas simulações o nó sorvedouro foi localizado em um dos vértices da área simulada (ver Figura 5.3). As métricas utilizadas nas simulações incluem: *latência média*; *atraso de primeira observação* (o tempo necessário para que um nó sensor visual responsável pelo rastreamento detecte o objeto em movimento); *uso efetivo dos sensores visuais* (o quanto o sensor visual esteve ativo com alvos sob seu FoV); *consumo médio de energia* (da rede como um todo e de cada camada das redes). Os resultados apresentados nesta seção correspondem à média aritmética simples das simulações e possuem intervalo de confiança de 95%.

As características e configurações apresentadas até o momento se aplicam a todas redes simuladas. Cada uma delas entretanto, apresenta suas particularidades que são descritas a seguir começando pela RSSF M², depois a RSSF Visual Heterogênea Multicamada e finalmente a RSSF Visual Homogênea.

5.1.1 RSSF M²

A RSSF M² simulada corresponde à proposta deste trabalho, uma rede de sensores para a monitoração ambiental organizada em três camadas e utilizando duas modalidades de sensori-

amento. Foram empregados os perfis MicaZ/PIR na camada de detecção de objetos (*primeira camada*), MicaZ/CMUcam2 na camada de identificação de objetos (*segunda camada*) e Stargate/Webcam na camada de rastreamento de alvos (*terceira camada*). O comportamento apresentado pelos elementos sensores é aquele descrito nas Seções 4.2 e 4.3: sensoriamento infravermelho contínuo, sensoriamento visual reativo e modelagem baseada em estados.

A topologia simulada consiste em uma RSSF M^2 de nós sensores estacionários distribuídos uniformemente por uma região quadrangular como mostrado na Figura 5.3. Deve ser observado que que uma RSSF M^2 que emprega sensoriamento visual não permite que seus nós sensores distribuídos de maneira aleatória ou mesmo lançados sobre a área de monitoração (como muitas vezes é esperado em uma RSSF tradicional). É fundamental considerar o posicionamento do campo de visão destes sensores na criação da topologia da rede afim de evitar grandes áreas descobertas. Na figura, é possível a identificação de um padrão ou um núcleo que se repete na distribuição dos nós sensores. Cada núcleo é formado por um nó MicaZ/PIR, um nó Stargate/Webcam e quatro nós MicaZ/CMUcam2 organizados em um *grid* 2×2 em uma área de 20×20 m². Assim, a escalabilidade da rede não é controlada diretamente pelo número de nós e sim pelas dimensões da área monitorada que comportem uma quantidade exata destes núcleos. Esta topologia

O intervalo de sensoriamento entre o recebimento de uma mensagem *wake up* e o reconhecimento de um alarme falso foi ajustado em 5 segundos, isto é, ao receber uma mensagem *wake up* os nós sensores MicaZ/CMUcam2 ou Stargate/Webcam monitoram o ambiente à procura de intrusos durante 5 segundos antes de desativarem seus sensores visuais.

5.1.2 RSSF Visual Heterogênea Multicamada

A RSSF Visual Heterogênea Multicamada é caracterizada por nós sensores distintos organizados em duas camadas. O modelo é baseado no *SensEye* [40, 41] conforme descrito por Kulkarni *et al.* [41] em suas avaliações experimentais. Nós sensores do perfil MicaZ/CMUcam2 foram utilizados na camada de detecção e identificação de objetos (o acúmulo de funções decorre da eliminação da camada de sensoriamento infravermelho). Os elementos desta camada possuem comportamento proativo isto é, estão constantemente monitorando o ambiente à procura de objetos em movimento, não existe a disseminação de mensagens *wake up* para a ativação dos nós sensores da camada. Esta característica requer sensoriamento visual contínuo, situação inviável para as RSSFs com suprimento energético limitado. Nas simulações, este problema foi superado empregando o regime de ciclos de trabalho (*duty cycles*). Periodicamente o dispositivo visual *CMUcam2* é acionado, executa suas tarefas (detecção e identificação de objetos) e então, retorna ao estado ocioso. Nós sensores do perfil Stargate/Webcam foram utilizados na camada responsável pelo rastreamento dos alvos. O comportamento destes nós sensores não difere daquele apresentado pelos elementos da terceira camada da RSSF M^2 , permanecendo à espera de mensagens *wake up* para acionar seus sensores visuais.

Na topologia simulada, assim como na RSSF M^2 , os nós sensores são estacionários e distribuídos uniformemente em uma região quadrangular. Existe também um núcleo de nós sensores formado por quatro nós MicaZ/CMUcam2 e um nó Stargate/Webcam organizados

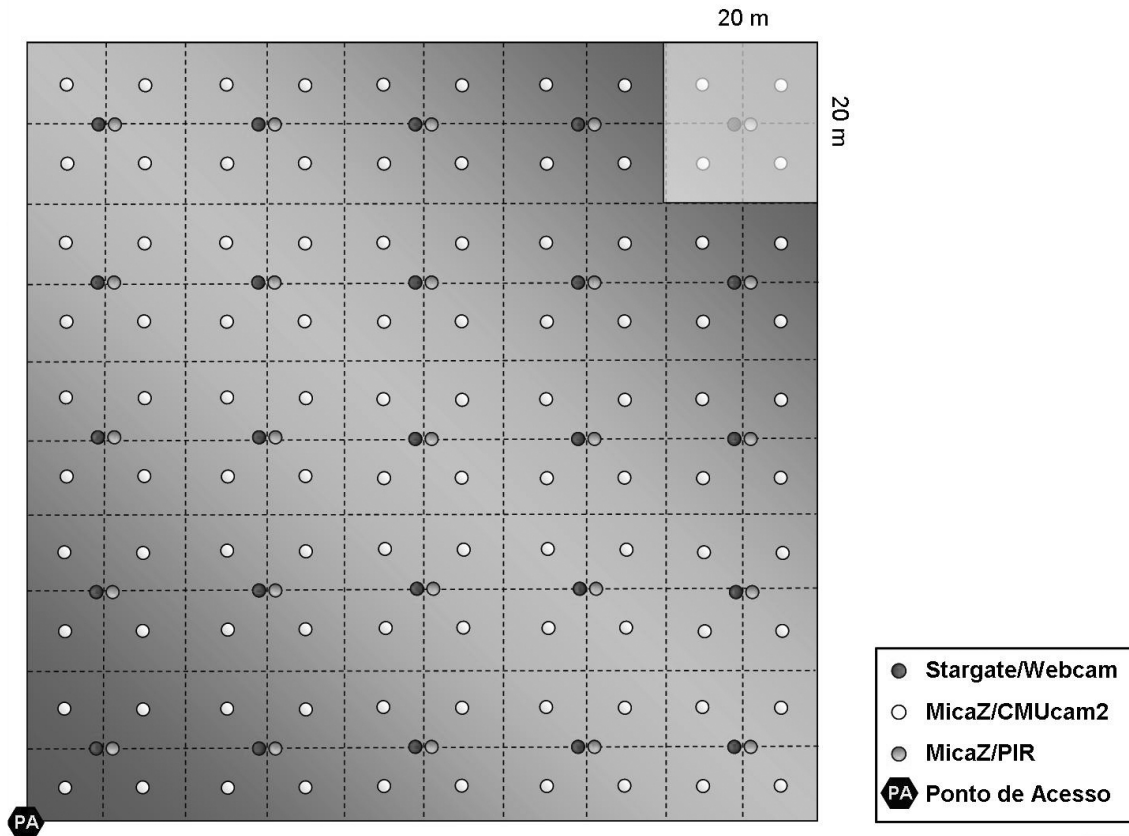


Figura 5.3: Exemplo de topologia da RSSF M^2 empregada durante simulações. A região em destaque na figura representa o núcleo básico da distribuição dos nós sensores.

em uma área de $20 \times 20 \text{ m}^2$. O ciclo de trabalho do elementos da primeira camada é de 60 segundos, durante os cinco segundos iniciais os sensores visuais estão ativos e permanecem desativados no restante do ciclo. Os nós sensores Stargate/Webcam são configurados com tolerância de 5 segundos entre o recebimento de uma mensagem *wake up* e o descarte da mesma como um alarme falso.

5.1.3 RSSF Visual Homogênea

A RSSF Visual Homogênea representa a mais tradicional das abordagens em aplicações de rastreamento visual: uma rede homogênea utilizando nós sensores de alto desempenho equipados com câmeras de vídeo. Os nós sensores do perfil Stargate/Webcam foram considerados nas simulações. O comportamento dos elementos de rede é segundo o regime de ciclo de trabalho e, ao contrário das demais redes consideradas, os nós sensores executam todas as tarefas da aplicação. Assim, um nó sensor da RSSF Visual Homogênea é responsável por detectar, identificar, rastrear e alertar seus vizinhos a respeito de alvos no ambiente monitorado.

A topologia simulada considera nós sensores distribuídos de maneira uniforme em uma região quadrangular formando um *grid*. Nesta rede não existe um núcleo de nós sensores, o que é impossível uma vez que todos os elementos de rede são iguais. Os nós Starget/Webcam possuem ciclo de trabalho de 61,3 segundos sendo que, os 1,3 segundos iniciais correspondem

ao tempo de ativação do sensor visual conforme observado em Margi *et al.* [51], os 5 segundos subsequentes correspondem ao período de atividade do sensor visual e os 55 segundos restantes correspondem ao período ocioso do sensor. Com relação às mensagens *wake up*, se durante um período ocioso uma destas mensagens for recebida pelo nó sensor, sua câmera é ativada e permanece assim enquanto for detectada a presença de objetos/alvos sob seu FoV ou até se encerrar o ciclo de trabalho.

5.2 O Arcabouço MannaSim

O MannaSim é um conjunto de classes que estendem as funcionalidades do ambiente de simulação de redes NS-2 [55] contemplando diferentes organizações de rede, serviços de sensoriamento, processamento e disseminação de dados para a simulação de RSSFs [43]. Trata-se de um software livre, distribuído sob os termos da licença GPL (*GNU General Public License*) que permite o uso do código em produtos comerciais e não-comerciais [35]. O código do arcabouço MannaSim encontra-se disponível no endereço <http://www.mannasim.dcc.ufmg.br>.

O MannaSim permite a simulação de diferentes modalidades de sensoriamento por meio da geração de dados artificiais. A classe `DataGenerator` é a base para a produção desta informação, bastando estendê-la para representar diferentes dispositivos sensores (ver Figura 5.4 com o diagrama das principais classes do MannaSim). O arcabouço contempla o sensoriamento de forma coleta contínua, periódica ou sob demanda. A frequência com que os dados são gerados modela as diferentes opções de sensoriamento. Para redes que utilizam coleta programada ou contínua, um temporizador é utilizado (classe `SensingTimer`).

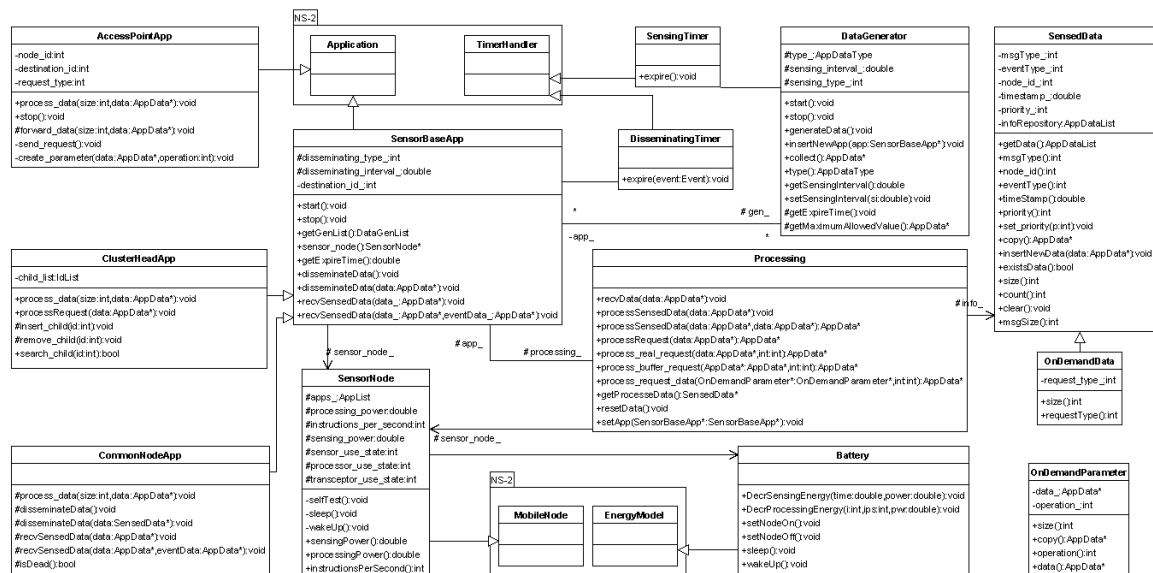


Figura 5.4: Diagrama de classes do MannaSim.

A disseminação de dados no MannaSim pode ser realizada continuamente, de maneira programada ou sob demanda, independente do tipo de sensoriamento escolhido. Para a disseminação programada, temporizadores da classe `DisseminatingTimer` são utilizados. As

mensagens transmitidas através da rede até um nó sorvedouro são modeladas pela classe `SensedData`, que implementa a classe abstrata `AppData` da API padrão do NS-2.

No MannaSim, os dados coletados devem ser submetidos a alguma forma de processamento antes de serem disseminados para a RSSF ou para fora dela. A classe `Processing` serve como ponto de partida para a criação de tipos específicos de processamento de dados para cada aplicação.

O comportamento um nó sensor é implementado pela classe `SensorBaseApp`. Esta classe é a base para implementar comportamentos diferenciados como, por exemplo, nós sensores líder (classe `ClusterHeadApp`) ou nós sensores comuns (classe `CommonNodeApp`). Por meio da classe `SensorNode`, que estende a classe `MobileNode` do NS-2, o MannaSim é capaz de criar nós sensores com diferentes configurações. Além disso, cada instancia de um `SensorNode` possui um objeto `Battery`, uma especialização da classe `EnergyModel` do NS-2 que define um modelo de reserva energética para nós sensores.

O desenvolvimento do MannaSim teve início com o trabalho de Ruiz [59] e vem sendo aprimorado por pesquisadores do Grupo Manna. Os requisitos da RSSF M² desenvolvida neste trabalho exigiram extensões ao MannaSim que foram então, incorporadas ao arcabouço [44]. Estas extensões são descritas a seguir.

Novos tipos de nós sensores – O item inicial para o desenvolvimento de simulações da RSSF M² foi o criação de nós sensores com suporte às configurações dos elementos sensores descritos no início da Seção 5.1. O MannaSim recebeu então, duas novas classes de nós sensores, `InfraredNode` para a simulação de nós equipados com sensores PIR e `CameraNode` para a simulação de nós sensores equipados com câmeras de vídeo.

Novas modalidades de sensoriamento – O sensoriamento de radiação infravermelha e informação visual foram adicionados ao MannaSim por meio das classes `CameraDataGenerator` e `InfraredDataGenerator`. No sensoriamento de informação visual, quando o sensor está ativo, a frequência da coleta de dados é determinada pela taxa de quadros por segundo (fps) do sensor visual.

Novos perfis de comportamento – O comportamento dos nós sensores da RSSF M² conforme apresentado na Seção 4.3 foram implementados pelas classes `InfraredNodeApp`, `CMUcamNodeApp` e `WebcamNodeApp`.

Novas formas de processamento – Com o objetivo de desempenhar as funções atribuídas a cada uma das camadas de RSSF M² para monitoração ambiental desenvolvida neste trabalho, os elementos da rede processaram de forma diferente os dados coletados. As classes `InfraredProcessing`, `CMUcamProcessing` e `WebCamProcessing` simularam, respectivamente, o processamento esperado para a detecção, identificação e rastreamento de um alvo.

Alvo para monitoração – O desenvolvimento de componentes que estendem o MannaSim e permitem a criação de uma RSSF M² não é suficiente para a avaliação simulada

da mesma. É necessária também, a existência de um alvo capaz de se deslocar pela área monitorada. Este requisito de simulação foi preenchido pela classe **Target**. Uma instância desta classe cria um alvo que se desloca e interage com a RSSF M² simulada.

5.3 Desempenho da RSSF M²

Esta seção reúne os cenários que avaliam o desempenho da RSSF M² proposta com relação a variações no alcance de transmissão dos nós sensores do perfil MicaZ/PIR, variações no intervalo de sensoriamento dos sensores visuais ao receber uma mensagem *wake up* e variações na velocidade de deslocamento do alvo pelo ambiente monitorado.

Nas simulações e análises um cenário base foi considerado: uma RSSF M² monitorando uma região plana de 120×120 m². Esta rede emprega 150 nós sensores sendo 25 nós do perfil MicaZ/PIR, 100 nós do perfil MicaZ/CMUcam2 e 25 nós do perfil Stargate/Webcam. Os nós sensores foram distribuídos como na Figura 5.3. Devido à magnitude dos valores observados no consumo energético dos elementos sensores da RSSF M², a escala logarítmica é utilizada no eixo das ordenadas dos gráficos apresentados nas seções que seguem.

5.3.1 Alcance de Comunicação

Neste cenário é observado o comportamento da RSSF M² com relação à variação do alcance de comunicação, e conseqüentemente, do alcance das mensagens disseminadas pelos nós sensores do perfil MicaZ/PIR. Foram considerados raios de transmissão iguais a 10, 20, 25 e 40 metros. Nas simulações o alvo se desloca pelo ambiente com uma velocidade de 2,5 m/s e o intervalo de sensoriamento dos sensores visuais foi ajustado para 5 segundos.

É esperado que, à medida que o raio de comunicação dos nós sensores MicaZ/PIR aumente, o consumo energético médio dos sensores da rede tenda a aumentar também. A Figura 5.5 mostra o consumo médio dos nós sensores da rede e também o consumo médio registrado em suas várias camadas. O aumento observado não é linear, quanto maior o alcance, mais nós sensores MicaZ/CMUcam2 são despertados pelas mensagens *wake up* disseminadas. Estes nós sensores visuais extras representam um incremento no consumo energético da segunda camada (nós sensores do perfil MicaZ/CMUcam2) de aproximadamente 150% quando o raio de transmissão é alterado de 25 para 40 metros. Para efeitos de comparação, foi verificado um aumento de 78% no consumo energético amortizado¹ entre os elementos da RSSF M² e um aumento de apenas 7% na camada de nós sensores do perfil Stargate/Webcam (terceira camada).

Os gastos energéticos de toda a RSSF M² e de cada uma de suas camadas no serviço de comunicação (transmissão e recepção de mensagens) relativos às variações no alcance do rádio dos nós sensores MicaZ/PIR são ilustrados na Figura 5.6. O gráfico da Figura 5.6(a) mostra que, com exceção dos nós sensores da primeira camada, houve redução no consumo energético

¹No contexto deste trabalho, os resultados relacionados a toda RSSF M² são referentes a um valor amortizado entre todos os seus nós sensores.

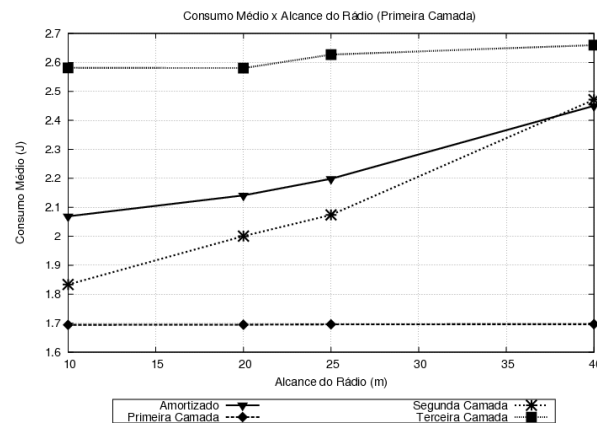


Figura 5.5: Consumo energético (amortizado e por camadas) frente às variações no alcance de transmissão dos nós sensores do perfil MicaZ/PIR.

com a transmissão de mensagens (queda de 14% no desempenho amortizado, 3% na segunda camada e 15% na terceira camada). Esta redução deve ser interpretada como uma perda de eficiência por parte dos nós sensores visuais que, após o *boot up* da RSSF M², disseminam mensagens apenas quando percebem a presença de um alvo sob seus FoVs. O aumento de 58% observado na primeira camada é devido ao aumento na potência de transmissão dos nós sensores. A atividade de recepção de mensagens por outro lado, registrou aumento de consumo em todas camadas com reflexos no desempenho geral da RSSF M² já que, as mensagens *wake up* disseminadas pelos elementos da primeira camada alcançaram uma quantidade maior de sensores da RSSF M² à medida que a potência de seus rádios foi aumentada (ver Figura 5.6(b)). Os nós sensores MicaZ/PIR e MicaZ/CMUcam2 experimentaram aumentos de 22%, enquanto para os nós sensores do perfil Stargate/Webcam o aumento foi de 23% o que era esperado pois, estes elementos apresentam consumo energético superior aos nós sensores da plataforma MicaZ como listado na Tabela 5.1. Para RSSF M² como um todo, o aumento observado foi de aproximadamente 23%.

O grande responsável pelo elevado consumo de recursos energéticos observado na RSSF M² em termos absolutos foi o serviço de sensoriamento (ver Figura 5.7(a)). Com a alteração do alcance de comunicação dos nós sensores MicaZ/PIR de 10 para 40 metros, uma quantidade maior de elementos da rede participa da monitoração do ambiente resultando em um consumo médio extra de 160 joules por nó sensor da RSSF M². O aumento do gasto energético do serviço de sensoriamento nos nós sensores da segunda camada (MicaZ/CMUcam2) é ainda mais significativo, passando de 65 a 290 joules. O serviço de processamento acompanhou a tendência de alta e, novamente, os nós da segunda camada apresentaram o aumento mais representativo, igual 340%. No consumo de recursos energéticos amortizado entre os nós sensores da RSSF M² foi observado um aumento médio no consumo energético do serviço de processamento de 77% uma vez que, a quantidade de dados coletados aumenta proporcionalmente à quantidade de sensores visuais ativos.

Na Figura 5.8 é apresentada a maneira como a taxa de uso efetivo dos sensores visuais da

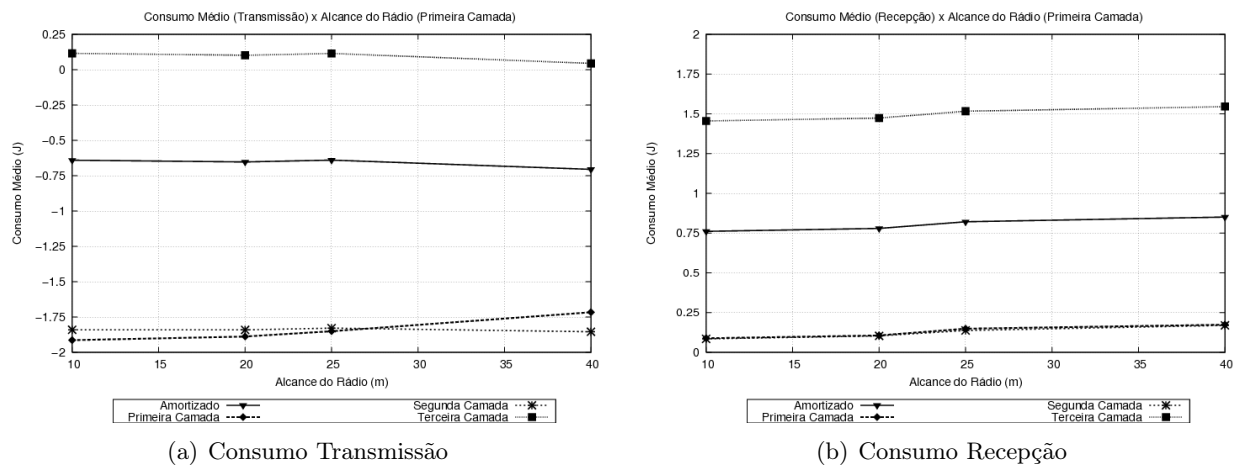


Figura 5.6: Consumo energético dos serviços de *a)* transmissão e *b)* recepção de mensagens frente às variações no alcance de transmissão dos nós sensores do perfil MicaZ/PIR.

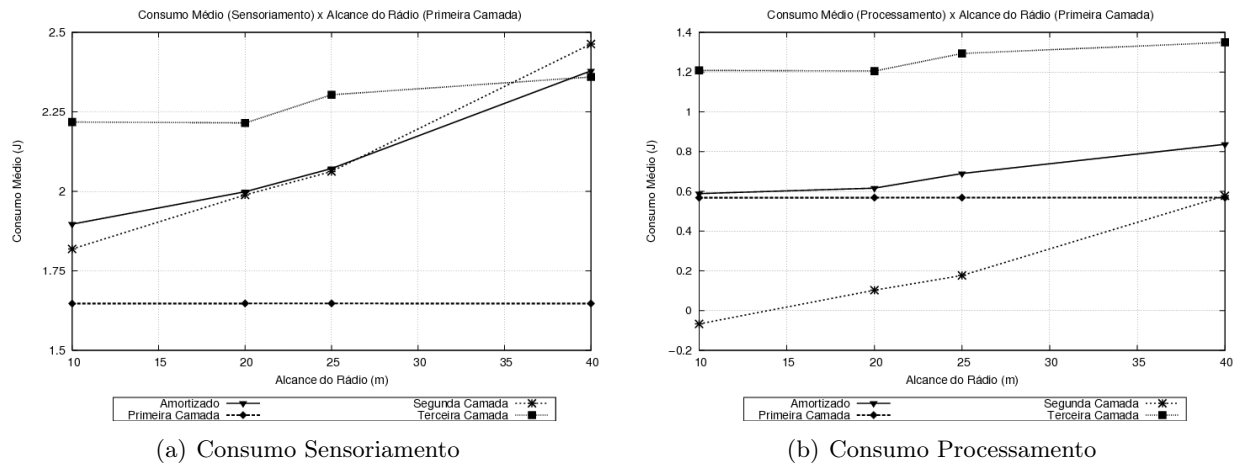


Figura 5.7: Consumo energético dos serviços de *a)* sensoriamento e *b)* processamento de dados coletados frente às variações no alcance de transmissão dos nós sensores do perfil MicaZ/PIR.

RSSF M^2 se comporta com o aumento do alcance de comunicação dos nós sensores MicaZ/PIR. A ativação de mais nós sensores leva a uma queda no rendimento dos sensores visuais uma vez que, nem todos os nós sensores estão próximos ao evento de detecção de intrusos e não irão detectar e observar o deslocamento de alvos pela área de monitoração. Assim, a ativação destes elementos significa desperdício de recursos energéticos. Com relação ao desempenho amortizado entre os elementos da RSSF M^2 , a queda observada foi de 40% em relação ao melhor uso dos sensores (raio de transmissão ajustado para 10 metros). Entre os nós sensores MicaZ/CMUcam2, a queda foi de aproximadamente 78% e entre os sensores Stargate/Webcam igual a 16%.

Por meio da análise conjunta dos gráficos de consumo energético e uso efetivo de sensores visuais apresentados nas Figuras 5.5, 5.7 e 5.8 é possível afirmar que o alcance de comunicação dos nós sensores MicaZ/PIR deve ser ajustado para distâncias entre 10 e 20 metros. Nos grá-

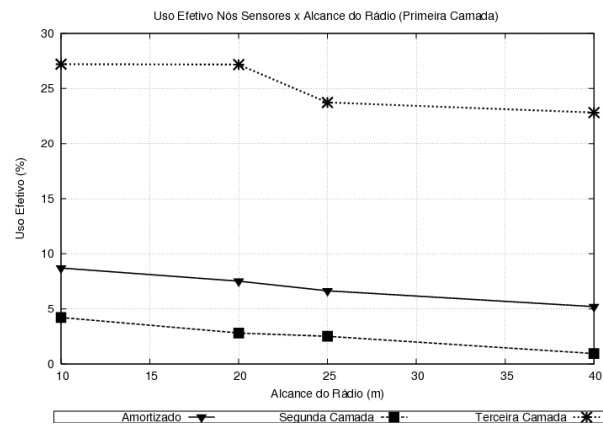


Figura 5.8: Uso efetivo dos sensores visuais da RSSF M^2 (amortizado e por camadas) frente às variações no alcance de transmissão dos nós sensores do perfil MicaZ/PIR.

ficos, o alcance de 20 metros se apresenta como o ponto de corte com relação à qualidade do serviço prestado pela RSSF M^2 , especialmente para os elementos do perfil Stargate/Webcam. A alteração do alcance de comunicação de 10 para 20 metros torna a RSSF M^2 mais vigilante com mais nós sensores visuais ativos, sem apresentar uma redução significativa no uso efetivo dos sensores visuais. A partir deste ponto, um alcance de comunicação maior é inútil para o objetivo de melhorar a vigilância da rede. O consumo adicionado à rede não se traduz em sensoriamento de melhor qualidade, como pôde ser observado pela queda na taxa de uso efetivo dos sensores visuais. A alteração de 20 para 25 metros é significativa neste aspecto, representando uma ruptura na relação entre a quantidade de sensores visuais ativos e a qualidade do serviço prestado.

Os resultados obtidos nos experimentos comprovam quantitativamente a mudança no padrão de consumo energético das RSSFs Visuais e das RSSFs M^2 que empregam sensores visuais, conforme observado no final da Seção 2.2.2. Isto é, o consumo energético com serviços de sensoriamento e processamento não devem ser negligenciados para aplicações desta modalidade de RSSFs.

5.3.2 Tempo de Espera por Alvo

Neste segundo cenário, variações no intervalo de sensoriamento dos nós sensores visuais em busca de intrusos após receberem mensagens *wake up* são consideradas. O termo *tempo de espera por alvo* é empregado no restante da seção para designar estes intervalos. Valores iguais a 2,5, 5,0, 10,0 e 20,0 segundos foram utilizados durante as simulações. A velocidade de deslocamento do alvo foi mantida em 2,5 m/s e o alcance de transmissão dos nós sensores do perfil MicaZ/PIR foi ajustado para 20 metros.

O gasto energético amortizado entre os elementos da RSSF M^2 e de suas camadas individualmente é apresentado no gráfico da Figura 5.9. De maneira geral, o aumento no intervalo de sensoriamento resultou em um maior consumo de energético. Para toda a RSSF M^2 este aumento girou em torno de 119%, na camada de nós sensores do perfil MicaZ/CMUcam2

em torno de 150% e 107% para os nós sensores do perfil Stargate/Webcam. A exceção é encontrada na primeira camada onde uma ligeira redução no consumo de aproximadamente 2% foi observada. Isto porque, para os elementos desta camada, o tempo de espera por alvo representa um período ocioso onde os sensores PIR permanecem desativados poupando recursos (ver Seção 4.3 para detalhes a respeito da relação entre o tempo de espera por alvo e o período ocioso dos sensores PIR).

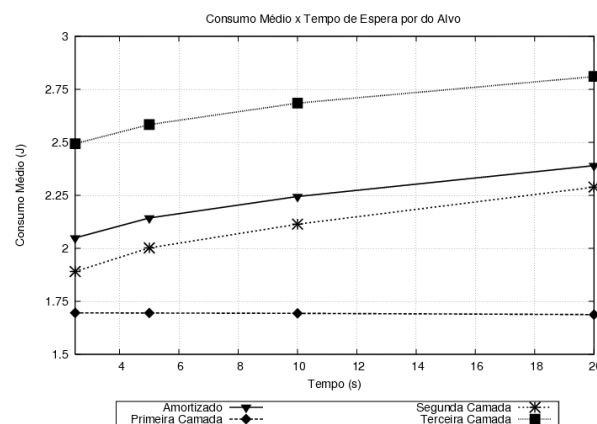


Figura 5.9: Consumo energético médio (amortizado e por camadas) frente às variações no intervalo de sensoriamento após o recebimento de uma mensagem *wake up* e o reconhecimento da mesma com um alarme falso.

A energia despendida na execução dos serviços de transmissão e recepção de mensagens se manteve constante durante as simulações com diferentes intervalos de espera. Desta forma, o serviço de comunicação não contribuiu para as alterações observadas no comportamento da RSSF M² e portanto, os gráficos referentes ao consumo das atividades de transmissão e recepção de mensagens são apresentados no texto.

O mesmo não ocorre com os serviços de sensoriamento e processamento cujos comportamentos são descritos no gráficos da Figura 5.10. Nestes serviços, tempo de espera maiores significam sensores visuais capturando e processando imagens do ambiente por mais tempo, consumindo mais recursos energéticos. A RSSF M² apresentou aumento amortizado do consumo de 127 joules por nó sensor no serviço de sensoriamento (um aumento relativo de 170%). Os nós sensores MicaZ/CMUcam2 e Stargate/Webcam acompanham esta tendência com aumentos no consumo de 153% e 297%, respectivamente (ver Figura 5.10(a)). O consumo energético do serviço de processamento apresentado na Figura 5.10(b), em termos absolutos, experimentou um aumento semelhante ao do serviço de sensoriamento. O gasto absoluto no entanto, foi de apenas 6 joules para cada nó sensor da RSSF M². As segunda e terceira camadas, por sua vez, consumiram 1,5 e 30 joules extras para cada um de seus nós sensores (contra um consumo adicional de 115 e 301 joules no serviço de sensoriamento). Esta diferença no consumo absoluto resulta da presença de um processador exclusivo para o controle e processamento do sensor visual encontrado nos *CMUcam2* e do processamento otimizado da plataforma *Stargate*. Os elementos da primeira camada experimentaram uma redução no consumo dos serviços de sensoriamento e processamento em torno de 2% novamente, devido

ao período ocioso dos sensores PIR.

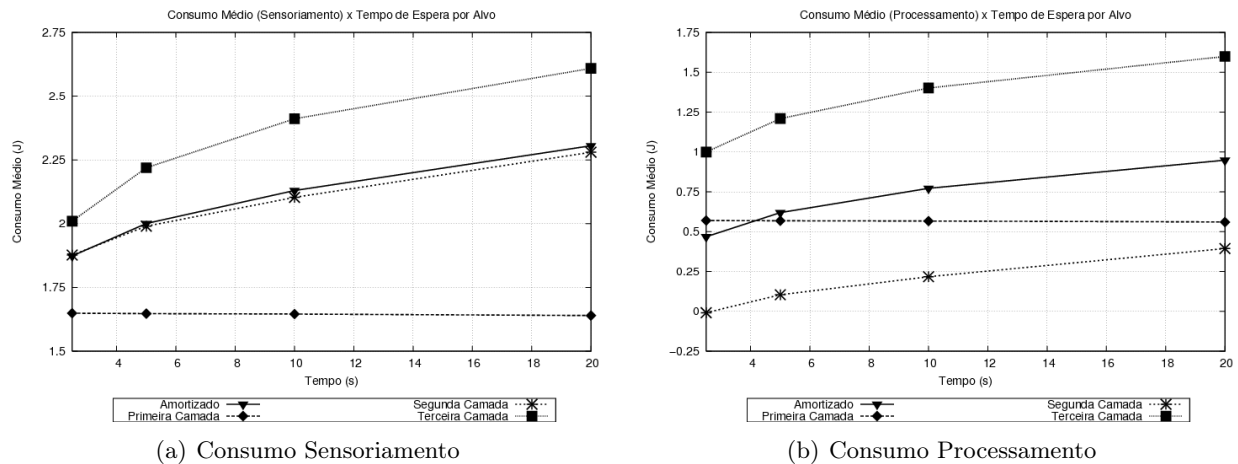


Figura 5.10: Consumo energético dos serviços de *a)* sensoriamento e *b)* processamento de dados coletados frente às variações no intervalo de sensoriamento após o recebimento de uma mensagem *wake up* e o reconhecimento da mesma com um alarme falso.

Observando a Figura 5.11 é possível afirmar que, quanto maior o tempo de espera por um alvo, maior a redução na taxa de uso efetivo dos sensores visuais da RSSF M². Os nós sensores do perfil Stargate/Webcam sofreram a maior redução – de 36% para 17%. A taxa de uso efetivo amortizada entre os elementos da RSSF M² foi pouco superior a 4% quando o intervalo de sensoriamento à espera de um alvo foi ajustado em 20,0 segundos, para os nós sensores MicaZ/CMUcam2, sob as mesmas condições, o uso efetivo observado foi de 1,4%.

Intervalos de sensoriamento com duração entre 2,5 e 5 segundos apresentaram os melhores resultados no consumo de recursos energéticos e na utilização dos sensores visuais. O sensoriamento prolongado em busca de objetos torna ineficiente a utilização dos sensores visuais. Se o alvo não for detectado pelos sensores visuais nos segundos iniciais após o recebimento da mensagem *wake up*, é pouco provável ele venha a estar sob o FoV da câmera no restante do intervalo.

5.3.3 Velocidade do Alvo

Este cenário verifica o comportamento da RSSF M² para monitoração ambiental frente às diferentes velocidades de deslocamento com as quais alvos de interesse podem se locomover pelo ambiente. Foram consideradas velocidades iguais a 1,0, 2,5, 5,0 e 10,0 m/s. Nas simulações, o alcance de transmissão dos nós sensores do perfil MicaZ/PIR foi ajustado para 20 metros e o intervalo de sensoriamento após o recebimento de uma mensagem *wake up* foi ajustado para 5 segundos.

A Figura 5.12 apresenta o desempenho energético da RSSF M² com o aumento da velocidade dos alvos na área monitorada. O consumo energético amortizado entre os elementos da RSSF M², sofreu uma redução de 56% com o aumento da velocidade do alvo (uma economia média por nó sensor igual a 115 joules). Ocorreram ainda, reduções nos gastos das segunda

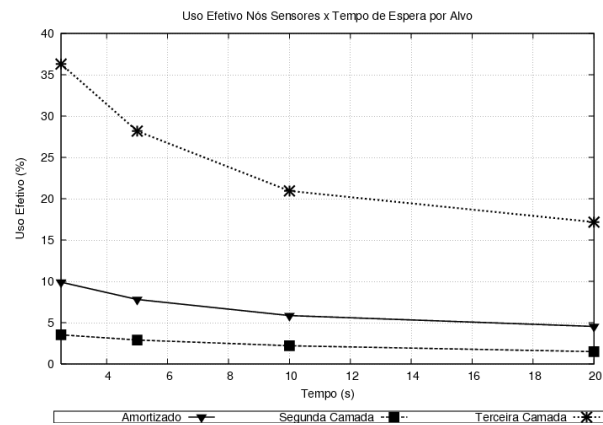


Figura 5.11: Uso efetivo dos sensores visuais da RSSF M² (amortizado e por camadas) frente às variações frente às variações no intervalo de sensoriamento após o recebimento de uma mensagem *wake up* e o reconhecimento da mesma com um alarme falso.

(72%) e terceira (40%) camadas. A energia dispendida pelos nós sensores MicaZ/PIR se manteve constante durante as simulações. Esta característica é resultado do sensoriamento contínuo realizado pelos elementos da primeira camada, o que torna os nós sensores MicaZ/PIR imunes às alterações na velocidade de deslocamento de alvos.

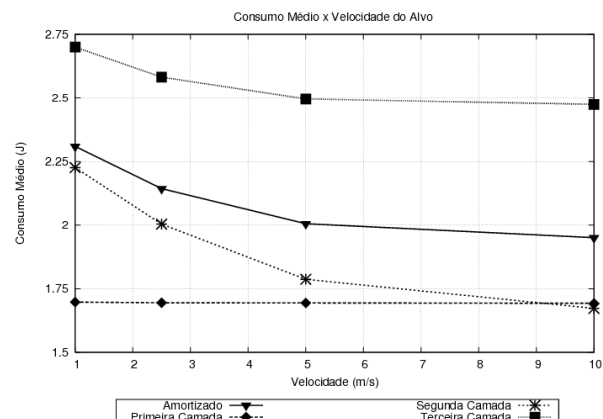


Figura 5.12: Consumo médio (amortizado e por camadas) verificado com o aumento da velocidade de deslocamento do alvo pela região monitorada.

A redução no consumo energético observado na atividade de transmissão de dados embora significativa em termos relativos (68% na RSSF M² como um todo, 40% nas primeira e segunda camadas e 70% na terceira camada), não representa uma economia relevante para o total de joules gastos pela aplicação (ver Figura 5.13(a)). O mesmo não ocorre na atividade de recepção onde uma redução de 59% se traduz em uma economia média de 5 joules no consumo de cada um dos sensores da rede (ver Figura 5.13(b)).

A significativa redução no uso dos recursos energéticos observada na Figura 5.12 foi influenciada principalmente serviço de sensoriamento. O gráfico da Figura 5.14(a) ilustra a redução no consumo para deste serviço, em especial nas segunda (72%) e terceiras (52%)

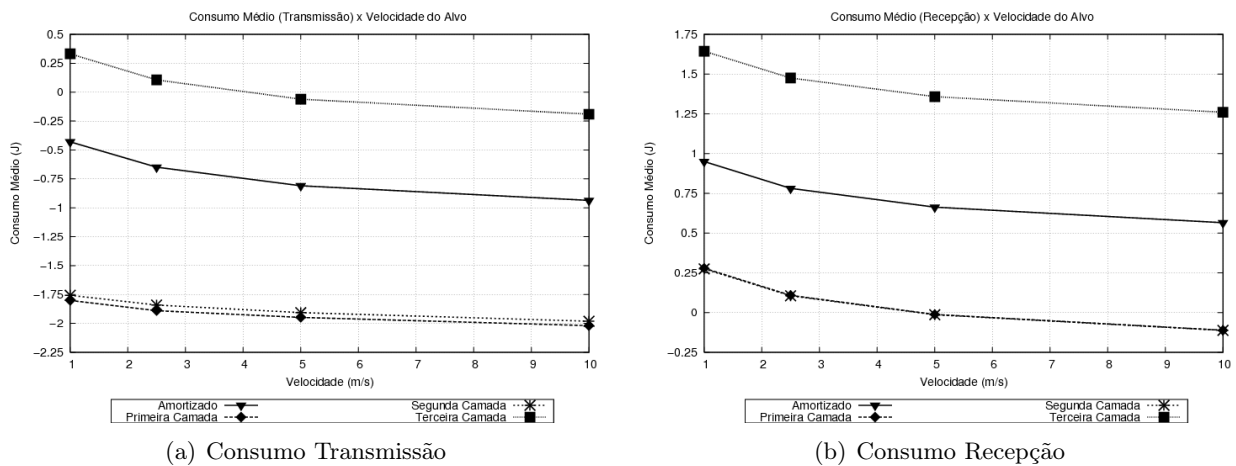


Figura 5.13: Consumo energético dos serviços de *a)* transmissão e *b)* recepção de mensagens frente às variações na velocidade de deslocamento do alvo pela região de monitoração.

camadas com reflexos no desempenho amortizado (64%). Em valores absolutos, o aumento da velocidade de deslocamento do alvo de 1 m/s para 10 m/s levou a uma economia média por sensor da RSSF M² de aproximadamente 100 joules. Este resultado decorre do preceito de utilizar de maneira consciente os serviços da rede e da modelagem do comportamento dos nós sensores visuais. Uma vez que o alvo se move com maior velocidade ele permanece menos tempo sob o FoV das câmeras da RSSF M² e conforme descrito na Seção 4.3, os sensores visuais são desativados assim que o alvo observado deixa seus campos de visão. A redução de consumo no serviço de sensoriamento produziu efeitos também no serviço de processamento onde a redução do gasto energético amortizado foi de 51% (ver Figura 5.14(b)).

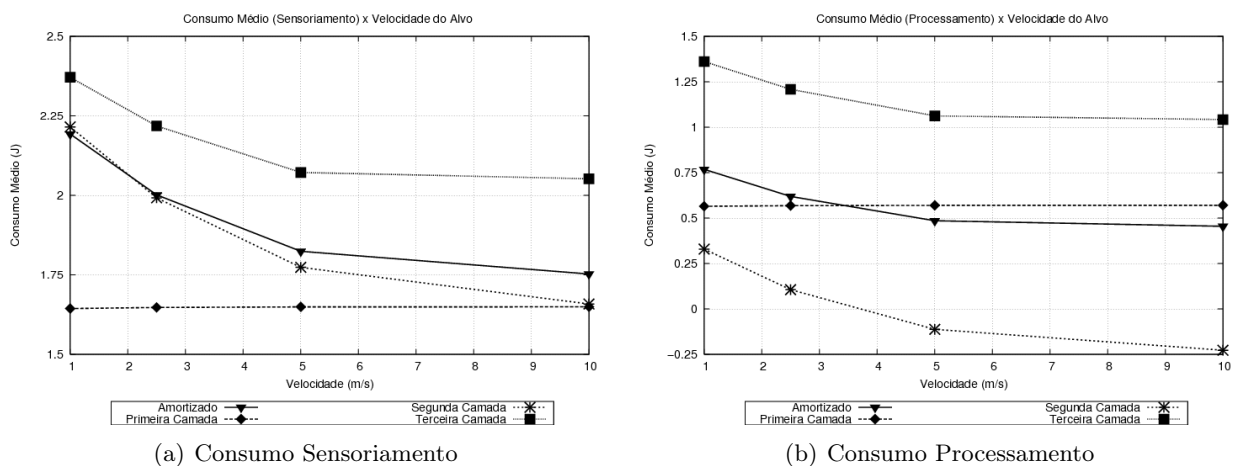


Figura 5.14: Consumo energético dos serviços de *a)* sensoriamento e *b)* processamento de dados coletados frente às variações na velocidade de deslocamento do alvo pela região de monitoração.

O comportamento da taxa de uso efetivo dos sensores visuais da RSSF M² frente ao aumento da velocidade de deslocamento do alvo é apresentado na Figura 5.15. De maneira

geral, o uso efetivo dos sensores visuais foi reduzido com o aumento da velocidade (redução de 83% para a RSSF M² como um todo). Nos elementos do perfil Stargate/Webcam a queda de desempenho foi ainda mais significativa (91%). A latência de ativação das Webcams, superior a 1 segundo, impediu que a notificação da presença de alvos (mensagens *wake up*) fosse traduzida em rastreamento uma vez que, para alvos velozes, após o processo de ativação o alvo já havia deixado o FoV do nó sensor. Mesmo os nós sensores do perfil MicaZ/CMUcam2 que possuem latência de ativação do sensor visual desprezível apresentam redução de 57%, o que é explicado pela baixa frequência de sensoriamento utilizada por estes nós sensores (5 fps).

Como relação ao atraso de primeira observação experimentado pela RSSF M², este se manteve estável em torno de 17 segundos. Isto é, no quesito atraso de primeira observação a RSSF M² é imune ao aumento de velocidade do alvo. Esta característica decorre do sensoriamento contínuo utilizado pelos nós sensores MicaZ/PIR que mantêm os nós sensores visuais sempre alertas à presença de alvo na região monitorada. Na Figura 5.16, o elevado atraso de primeira observação para alvos com velocidade igual a 1 m/s resulta da demora dos mesmos em atingirem a região monitorada.

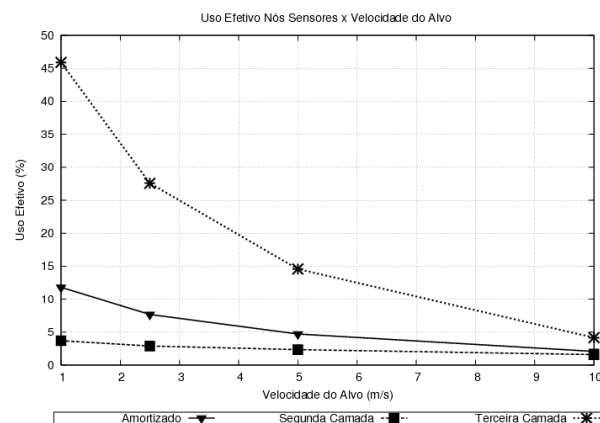


Figura 5.15: Uso efetivo dos sensores visuais da RSSF M²(geral e por camadas) frente às variações na velocidade de deslocamento do alvo pela região de monitoração.

É possível afirmar com base nas análises dos experimentos conduzidos nesta seção que, o aumento da velocidade de deslocamento de um alvo através da área monitorada resulta em comportamentos conflitantes na RSSF M². Se, por um lado o aumento da velocidade é traduzido na economia de recursos energéticos por parte dos nós sensores, por outro, existe o custo associado à redução da funcionalidade da RSSF M² com relação à identificação e rastreamento de um alvo (a detecção é imune uma vez que é realizada pelos nós sensores MicaZ/PIR). Além disso, da mesma forma que um alvo muito veloz não é desejável, alvos muito lentos não possuem um balanceamento satisfatório entre o consumo energético e a funcionalidade da RSSF M². Assim, a rede apresenta melhor desempenho quando detecta, identifica e rastreia alvos com velocidades entre 2,5 e 5,0 m/s.

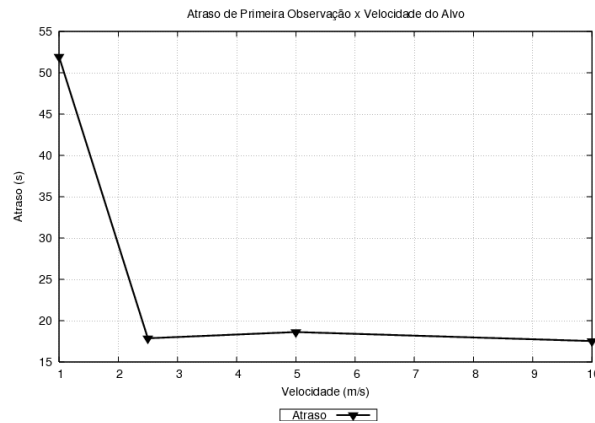


Figura 5.16: Atraso de primeira observação frente às variações na velocidade de deslocamento do alvo pela região de monitoração.

5.4 Desempenho Comparativo

Nesta seção são apresentadas análises comparativas entre a RSSF M^2 proposta neste trabalho e outras duas abordagens encontradas na literatura: uma RSSF Visual Heterogênea Multicamada (ver Seção 5.1.2) e uma RSSF Visual Homogênea (ver Seção 5.1.3). As análises, além de comparar o desempenho destas redes com relação ao consumo amortizado entre os elementos da rede de recursos energéticos, atraso de primeira observação, latência média das mensagens e uso efetivo dos sensores visuais, têm como objetivo também, verificar a escalabilidade das redes. Durante as simulações foram consideradas quatro áreas de monitoração de dimensões iguais a 100×100 , 120×120 , 140×140 e 160×160 m². A Tabela 5.2 lista a quantidade de nós sensores utilizados na monitoração destas áreas por cada uma das redes de sensores consideradas.

Assim como nas avaliações de desempenho da RSSF M^2 (ver Seção 5.3), existem algumas configurações que representam um cenário base para as demais simulações. A velocidade de deslocamento do alvo pelo ambiente foi mantida em 2,5 m/s, o tempo de espera por alvos foi ajustado em 5 segundos e as mensagens *wake up* disseminadas pelos sensores do perfil MicaZ/PIR alcançam 20 metros. Ao contrário das análises da Seção 5.3, nesta seção os gráficos relacionados ao gasto energético são exibidos em escala tradicional.

O gráfico da Figura 5.17 apresenta o consumo energético amortizado entre os elementos das RSSFs em função do tamanho da área monitorada pelas RSSFs consideradas. Em todas as situações o gasto de recursos de energia observado na RSSF M^2 foi ao menos 2,2 vezes inferior ao gasto observado na RSSF Visual Heterogênea Multicamada e ao menos 11 vezes inferior ao gasto observado na RSSF Visual Homogênea. Esta diferença significativa no desempenho demonstra que o comportamento baseado em eventos é superior ao comportamento baseado em ciclo de trabalho para as aplicações de monitoração ambiental que envolvam o rastreamento visual. Além disso, a incorporação de camadas de sensores de diferentes modalidades produzem resultados ainda mais interessantes quando comparados às redes multicamadas que utilizam uma única modalidade de sensoriamento.

| Área Monitorada | Quantidade de Nós Sensores por Cenário | | |
|--------------------------|--|--|--|
| | RSSF M ² | RSSF Visual Heterogênea | RSSF Visual Homogênea |
| 100 × 100 m ² | 96 nós sensores 16 MicaZ/PIR 64 MicaZ/CMUcam2 16 Stargate/Webcam | 80 nós sensores 64 MicaZ/CMUcam2 16 Stargate/Webcam | 64 nós sensores 64 Stargate/Webcam |
| 120 × 120 m ² | 150 nós sensores 25 nós MicaZ/PIR 100 MicaZ/CMUcam2 25 Stargate/Webcam | 125 nós sensores 100 MicaZ/CMUcam2 25 Stargate/Webcam | 100 nós sensores 100 Stargate/Webcam |
| 140 × 140 m ² | 216 nós sensores 36 MicaZ/PIR 144 MicaZ/CMUcam2 36 Stargate/Webcam | 180 nós sensores 144 MicaZ/CMUcam2 36 Stargate/Webcam | 144 nós sensores 144 Stargate/Webcam |
| 160 × 160 m ² | 294 nós sensores 49 MicaZ/PIR 196 MicaZ/CMUcam2 49 Stargate/Webcam | 245 nós sensores 196 MicaZ/CMUcam2 49 Stargate/Webcam | 196 nós sensores 196 Stargate/Webcam |

Tabela 5.2: Quantidade de nós sensores utilizada em cada um dos cenários considerados.

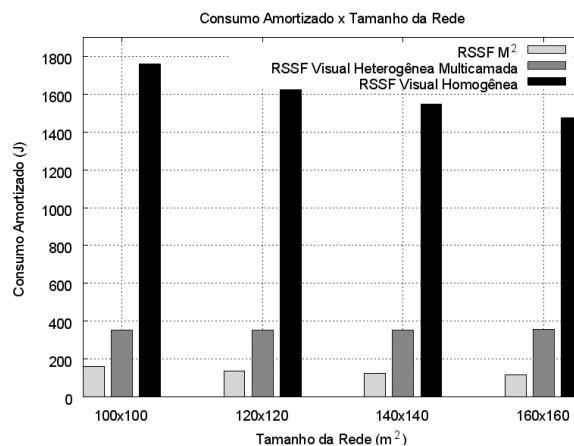


Figura 5.17: Consumo energético amortizado entre os elementos de cada uma das RSSFs consideradas.

Observando a escalabilidade da rede com relação ao consumo energético amortizado, a RSSF M² e a RSSF Visual Homogênea apresentaram redução em seus gastos iguais a 27% e 16%, respectivamente, quando a área de monitoração é expandida de 100 × 100 m² para 160 × 160 m². Os gastos energéticos da RSSF Visual Heterogênea Multicamada permaneceram estáveis nos cenários simulados.

O comportamento do serviço de comunicação (transmissão e recepção de mensagens) das RSSFs objeto de estudos desta análise é descrito nos gráficos da Figura 5.18. Em princípio, pode ser concluído que a RSSF Visual Heterogênea Multicamada obteve um desempenho

superior neste serviço, economizando recursos energéticos. Tal afirmativa porém, é falsa uma vez que esta rede apresentou atraso de primeira observação elevado e baixa taxa de uso de sensores visuais (ver Figuras 5.20 e 5.22). Os resultados observados são portanto, consequência da ineficiência da rede na detecção, identificação e rastreamento (daí a menor quantidade de mensagens disseminadas) e não de uma operação otimizada. Feita esta observação, deve ser destacado o desempenho da RSSF M^2 comparado à RSSF Visual Homogênea, uma redução média de 69% no consumo nas atividades de transmissão e de 81% nas atividades de recepção de mensagens. O alcance de comunicação de 40 metros utilizado pelos nós sensores da RSSF Homogênea contribuiu para este resultado.

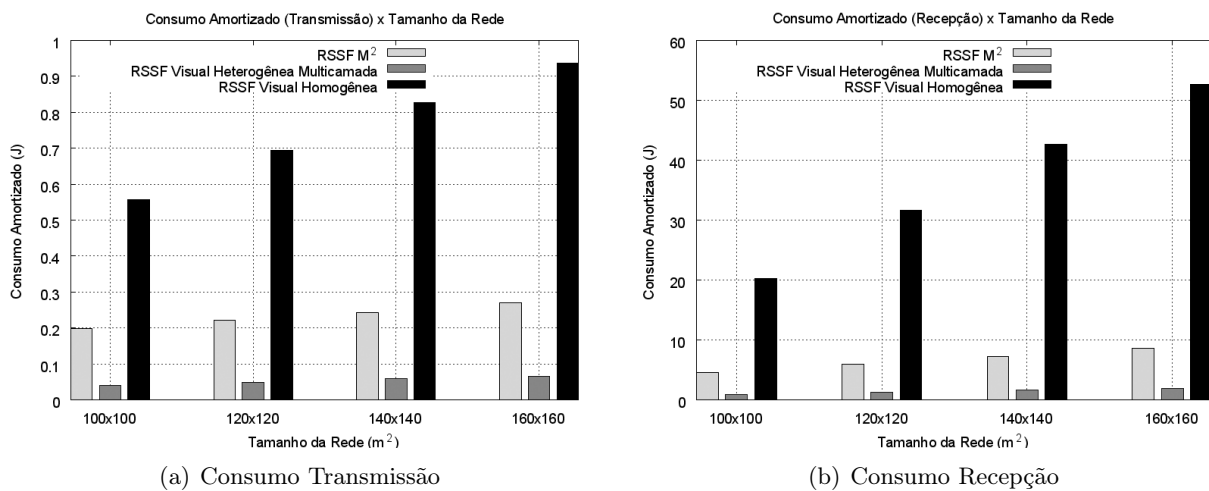


Figura 5.18: Consumo energético dos serviço de comunicação: *a*) transmissão e *b*) recepção de mensagens para as RSSFs consideradas.

A Figura 5.19 apresenta o comportamento dos serviços das atividades de maior consumo de recursos durante o ciclo de vida das RSSFs simuladas: os serviços de sensoriamento e processamento. Em termos absolutos, o sensoriamento dominou o consumo geral e, como pode ser observado no gráfico da Figura 5.19(a) a RSSF M^2 apresentou os menores gastos energéticos quando comparada às demais redes (até 76% inferiores à RSSF Visual Heterogênea Multicamada e 92% inferiores à RSSF Visual Homogênea). Já os gastos com o serviço de processamento (ver Figura 5.19(b)) demonstram a superioridade da abordagem multicamada sobre as redes homogêneas. A ausência do comportamento baseado em eventos fez o consumo com o processamento de dados atingir níveis muito superiores na RSSF Visual Homogênea.

Outro item de comparação entre as RSSFs foi o atraso de primeira observação referente aos nós sensores do perfil Stargate/Webcam apresentado na Figura 5.20. De maneira geral, a RSSF Visual Homogênea observou o menor atraso de primeira observação (17 segundos em média). A RSSF M^2 apresentou atraso médio igual a 25 segundos. Deve ser considerado que nesta rede duas outras camadas de sensores devem ser acionadas antes que algum nó sensor Stargate/Webcam seja ativado para o rastreamento de objetos. O desempenho da RSSF Visual Heterogênea Multicamada foi insatisfatório, sempre com atrasos superiores a 100

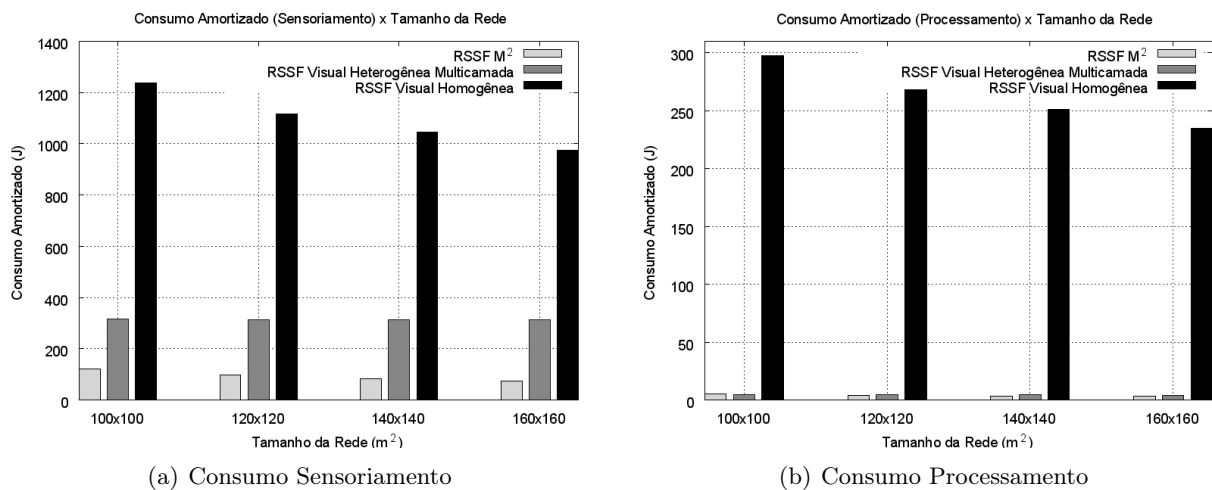


Figura 5.19: Consumo energético dos serviços de *a*) sensoriamento e *b*) processamento dos dados coletados para as RSSFs consideradas.

segundos. A combinação entre ciclo de trabalho (nós sensores MicaZ/CMUcam2) e operação baseada em eventos (nós sensores Stargate/Webcam) foi a principal responsável por atrasos tão significativos.

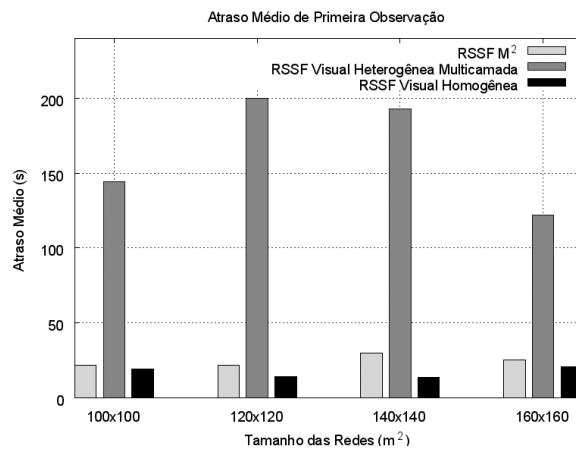


Figura 5.20: Atraso de primeira observação das RSSFs consideradas.

O gráfico da Figura 5.21 apresenta a latência das mensagens disseminadas em direção ao nó sorvedouro amortizada entre os elementos de cada uma das RSSFs consideradas, para cada área de monitoração simulada. Nos resultados não é considerado o tempo para a criação de rotas uma vez que não é objetivo deste trabalho avaliar o desempenho de protocolos de roteamento para RSSFs. De maneira geral, não existe um comportamento padrão para a latência nas redes consideradas, a cada novo cenário um novo comportamento é observado. A RSSF Visual Homogênea no entanto, apresentou sempre as menores latências (0,78 segundos em média) seguida pela RSSF M² (1,06 segundos em média) e finalmente pela RSSF Visual Heterogênea Multicamada (1,62 segundos em média). Este comportamento é justificável uma

vez que a RSSF Visual Homogênea esta distribuída em apenas uma única camada de sensores. O desempenho observado na RSSF M^2 mostrou que a adição de outras camadas não afeta seriamente a disseminação de mensagens pela rede mas, a combinação entre as estratégias de ciclo de trabalho e operação baseada em eventos utilizada na RSSF Visual Heterogênea Multicamada deve ser evitada.

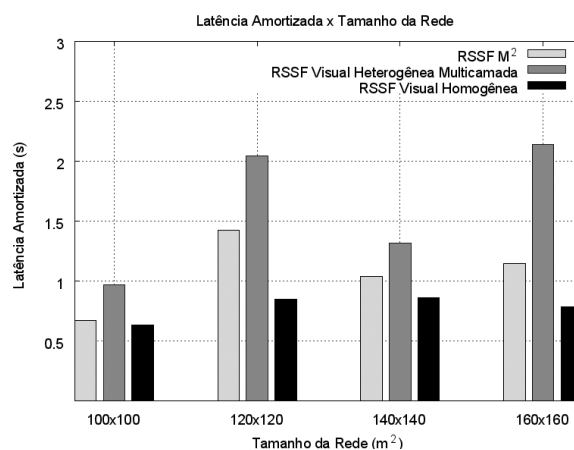


Figura 5.21: Latência das mensagens disseminadas em direção ao nó sorvedouro amortizada entre os elementos de cada uma das RSSFs consideradas.

A Figura 5.22 apresenta o comportamento da taxa de uso efetivo dos sensores visuais frente ao aumento da área de monitoração das redes de sensores empregadas na análise comparativa. A abordagem das RSSFs M^2 se mostrou mais escalável mantendo o uso efetivo de seus sensores visuais em torno de 7,5% nos cenários considerados. O desempenho desta rede foi também, superior às demais abordagens, em especial à RSSF Visual Homogênea (4,94 vezes superior, em média). Tanto a RSSF Visual Heterogênea Multicamada quanto a RSSF Visual Homogênea apresentaram queda de rendimento igual a 25% com o aumento das áreas monitoradas, ou seja, estas soluções não tiveram boa escalabilidade.

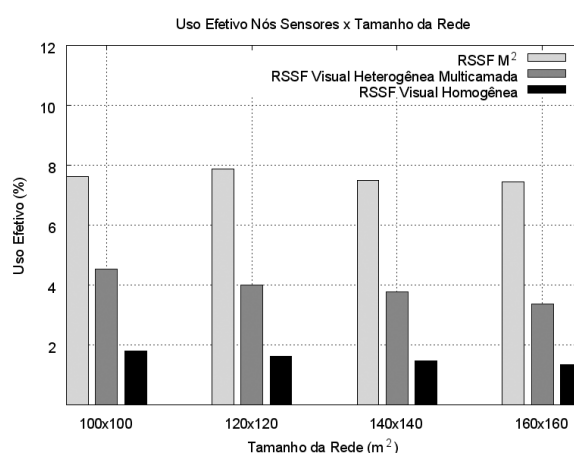


Figura 5.22: Uso efetivo dos sensores visuais das RSSFs consideradas.

5.5 Conclusão

Este capítulo apresentou avaliações da RSSF M^2 projetada e modelada nesta dissertação. Foram realizadas análises do comportamento da rede e análises comparativas entre a RSSF M^2 e duas outras abordagens: uma RSSF Visual Heterogênea distribuída em duas camadas inspirada no trabalho de Kulkarni *et al.* [41] e uma RSSF Visual Homogênea de uma única camada de nós sensores [51].

As análises individuais verificaram o comportamento da RSSF M^2 com relação à alterações no raio de transmissão de nós sensores do perfil MicaZ/PIR (primeira camada), na duração do intervalo de sensoriamento visual em busca de alvos após o recebimento de uma mensagem *wake up* e na velocidade de deslocamento dos alvos pela área monitorada. O maior alcance das mensagens *wake up* disseminadas pelos elementos da primeira camada embora tenha ativado uma quantidade maior de nós sensores MicaZ/CMUcam2 não se traduziu em ganhos na qualidade do sensoriamento. Mais nós sensores visuais ativos significaram gastos extras dos recursos energéticos e baixo uso efetivo dos mesmos. Pela análise consolidada dos experimentos, raios de transmissão variando entre 10 e 20 metros se apresentaram como as melhor opções. Para estes valores, a rede obteve bom uso efetivo dos sensores visuais sem incorrer gastos excessivos de recursos energéticos.

Cenários de simulação em que foram realizadas alterações na duração do intervalo de sensoriamento visual mostraram a influência do serviço de sensoriamento no comportamento da RSSF M^2 . Juntamente com o serviço de processamento estas duas atividades se mostraram as maiores consumidoras de recursos energéticos para a aplicação de monitoração ambiental empregando rastreamento visual. Intervalos superiores a 5 segundos resultaram em gastos excessivos das reservas energéticas (maiores que 100 joules) além de reduzir a taxa de uso efetivo dos sensores visuais (em especial dos nós sensores do perfil Stargate/Webcam).

O terceiro item na avaliação do desempenho da RSSF M^2 , a velocidade de deslocamento do alvo, é um fator externo à RSSF M^2 mas que influencia o comportamento da rede. Os experimentos realizados comprovam que com o aumento da velocidade do alvo, a qualidade do sensoriamento diminuiu resultando no uso ineficiente dos nós sensores visuais uma vez que, estes não foram acionados com a rapidez necessária para realizar a detecção da movimentação de um alvo enquanto este estava sobre seus FoVs. Tal fato se traduziu numa redução dos gastos energéticos da RSSF M^2 . Os nós sensores do perfil MicaZ/PIR se mostraram imunes às variações na velocidade do alvo possibilitando a estabilidade do atraso de primeira observação.

A análise comparativa por sua vez, demonstrou a superioridade da abordagem multicamada, multimodal sobre as demais redes de sensores consideradas. A RSSF M^2 se mostrou mais econômica no uso das reservas energéticas de seus nós sensores otimizando serviços de sensoriamento e processamento. O comportamento baseado em eventos permitiu que os sensores visuais da rede fossem utilizados, em grande parte das vezes, apenas nas situações oportunas, quando haviam objetos próximos ou sob seus campos de visão. Desta forma, a taxa de uso efetivo dos nós sensores da RSSF M^2 foi, em média, duas vezes superior à taxa dos elementos da RSSF Visual Heterogênea Multicamada e praticamente cinco vezes superior

à taxa de uso dos nós sensores da RSSF Visual Homogênea. Em critérios como o atraso de primeira observação e a latência média das mensagens no entanto, a RSSF M^2 apresentou resultados modestos e foi superada pela RSSF Visual Homogênea. Mas, ainda assim, o uso do sensoriamento infravermelho se mostrou superior à rede multicamada que fez uso de sensores visuais apenas.

No capítulo seguinte são descritos o desenvolvimento e implementação de um protótipo da RSSF M^2 para a monitoração ambiental. O protótipo utiliza componentes e dispositivos disponíveis comercialmente como, por exemplo, o dispositivo de sensoriamento visual *CMU-cam2*[58] e os nós sensores da plataforma MicaZ [32]. São apresentados ainda, um conjunto de experimentos para a validação do protótipo.

Capítulo 6

Implementação Real

Este capítulo trata do desenvolvimento de um protótipo da RSSF M² para monitoração ambiental objeto de estudo deste trabalho. São apresentadas configurações e usos de sensores e plataformas de sensoriamento disponíveis comercialmente. O texto descreve ainda, os algoritmos empregados nas tarefas de detecção, identificação e rastreamento de alvos em deslocamento pela área monitorada.

Como apresentado nos capítulos anteriores, a RSSF M² possui três perfis de nós sensores empregando duas modalidades de sensoriamento. Os elementos da primeira camada utilizam sensores infravermelho passivos, modelo RE200b [10], fabricados pela Nippon Ceramic Co. [9]. Estes sensores são acoplados, um por nó sensor, à plataforma *MicaZ* [32] comercializada pela *Crossbow Technology* [34]. Os elementos da segunda camada utilizam o dispositivo de sensoriamento visual *CMUCam2* [58], também acoplados a nós sensores da plataforma *MicaZ*. Os elementos da terceira camada são constituídos por câmeras USB, modelo *Creative Webcam Instant* [45], conectadas a computadores pessoais (arquitetura IBM/PC) que se comportam como plataformas sensoras de propósito geral.

No texto do capítulo, as seções apresentam em detalhes o desenvolvimento e funcionamento dos perfis listados acima. A Seção 6.1 trata dos nós sensores do perfil *MicaZ*/PIR que compõem a primeira camada da RSSF M², a Seção 6.2 trata dos elementos da segunda camada (perfil *MicaZ*/CMUCam2). O desenvolvimento dos elementos da terceira camada, os nós sensores do perfil PC/Webcam, é discutido na Seção 6.3. A validação do protótipo por meio de um experimento controlado é conduzida na Seção 6.4, onde os resultados são também discutidos. A Seção 6.5 encerra o texto apresentando as conclusões do capítulo.

6.1 Primeira Camada

Os nós sensores da primeira camada são responsáveis por detectar a presença de intrusos e disseminar esta informação aos nós sensores visuais da segunda camada próximos ao evento. Os elementos utilizam sensoriamento contínuo de dados em busca de variações no nível de radiação infravermelha observada no ambiente monitorado.

No contexto desta dissertação, o desenvolvimento dos nós sensores *MicaZ*/PIR, bem como

o projeto do circuito de condicionamento de sinais dos sensores infravermelho correspondem ao trabalho de iniciação científica realizado por Michele Mendes Santos sob a orientação da professora Linyer Beatrys Ruiz e supervisão de Carlos Eduardo Rodrigues Lopes [60].

6.1.1 MicaZ/PIR – Aspectos de Hardware

A plataforma de propósito geral para sensoriamento *MicaZ* [32] é atualmente um padrão *de facto* para o desenvolvimento de aplicações da tecnologia de RSSFs. Esta é a terceira geração da família Mica Motes desenvolvida pela Universidade da Califórnia, Berkeley. Como apresentado nas Tabelas 2.1 e 3.1, o *MicaZ* é uma plataforma de sensoriamento de recursos limitados destinada à coleta de dados ambientais e realização de operações simples tais como média aritmética, valores de máximo e mínimo dentre outras.

Uma das vantagens da família Mica Motes está na generalidade de propósito de seus nós sensores. A existência de placas de expansão contendo diferentes modalidades de sensoriamento permitem o uso destes elementos nas mais diversas aplicações. Não existem, no entanto, placas de expansão com os sensores PIR necessários à RSSF M² desenvolvida. Afim de superar tal limitação, componentes eletrônicos disponíveis comercialmente (sensores, capacitores, resistores) foram utilizados na criação de um dispositivo para o sensoriamento de radiação infravermelha próprio para a plataforma *MicaZ*.

O sensor PIR RE200b [10], desenvolvido pela *Nippon Ceramic Co.* [9], foi escolhido para realizar o serviço de sensoriamento de radiação infravermelha. Este sensor apresenta alta sensibilidade com relação à movimentação de seres humanos e animais e é indiferente à mudanças de temperatura no ambiente, vibração do sensor e ruídos óticos. O sensor possui dois elementos piroelétricos e campo de visão de 138° no eixo X e 125° no eixo Y. A resposta fornecida pelo RE200b é um sinal de tensão com valor médio de 0,81 V, quando alimentado com tensão igual a 5,0 Vcc e, uma pequena variação neste sinal (cerca de $\pm 0,10$ V) é percebida no momento em que um objeto é detectado. A pequena variação no sinal de saída pode provocar detecções errôneas ou falsas, o que tornou necessário a criação de circuitos eletrônicos para amplificação e condicionamento das respostas do sensor PIR. Duas abordagens foram consideradas, na primeira foram utilizados amplificadores de instrumentação enquanto que, na segunda um circuito integrado próprio para o controle de sensores PIR foi utilizado.

6.1.1.1 Amplificadores de Instrumentação

Amplificadores de instrumentação são componentes ideais para o condicionamento de sinais de fraca amplitude. Eles possuem uma configuração de amplificador diferencial que apresenta alta impedância de entrada, baixa impedância de saída e baixo ruído. O amplificador de instrumentação empregado neste trabalho é do tipo amplificador integrado com três amp-op.

O circuito eletrônico desenvolvido utilizando amplificadores de instrumentação é apresentado na Figura 6.1. Um amplificador de instrumentação é um componente eletrônico ideal para o condicionamento de sinais de baixa amplitude. O amplificador de instrumentação INA116 [38] da *Texas Instruments Inc.* [37] foi o escolhido para ser utilizado neste circuito

para o condicionamento do sinal do sensor PIR. O resultado obtido com a aplicação deste circuito à saída do sensor RE200b é o mesmo sinal original porém, em uma escala mais ampla de valores.

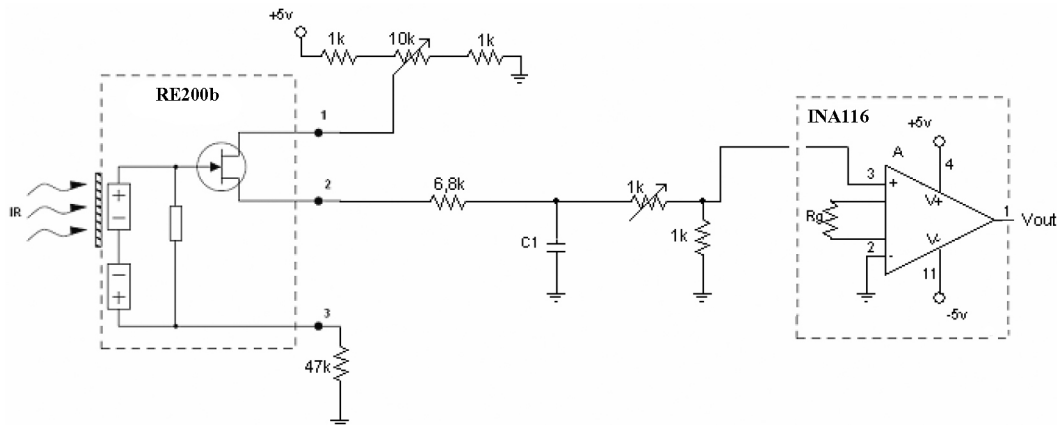


Figura 6.1: Circuito eletrônico para o condicionamento do sinal de resposta fornecido pelo sensor PIR RE200b utilizando amplificadores de instrumentação.

6.1.1.2 Circuito Integrado para Controle PIR

A segunda abordagem utilizou o chip KC778b [47] da *COMedia Ltda* [46] no desenvolvimento do circuito de condicionamento da resposta do sensor PIR. O KC778b é um CI específico para a operação de sensores infravermelho passivos. Este CI possui um conjunto de filtros para ajuste de ganho, cancelamento de ruídos além de permitir o ajuste de sensibilidade do sensor. De acordo com a aplicação desejada algumas ou mesmo todas as funcionalidades do CI podem ser utilizadas. Uma das vantagens deste CI é a redução na quantidade de componentes presentes no circuito final que emprega, além do KC778b, capacitores e resistores para o ajuste dos filtros. O diagrama do circuito de condicionamento utilizando o CI KC778b é apresentado na Figura 6.2.

A resposta fornecida pelo circuito da segunda abordagem é apresentada em dois níveis de tensão, o nível alto (5,0 V) e o nível baixo (0 V). Quando algum objeto é detectado, a saída do circuito é fornecida no nível alto. Quando não são observadas mudanças bruscas de radiação no ambiente, a saída do circuito é fornecida no nível baixo. Esta simplificação na apresentação do sinal elimina a informação a respeito do sentido de movimento do alvo pois não é possível perceber as oscilações na saída do sensor. Foi utilizando também um circuito divisor de tensão aplicado à saída do circuito de condicionamento uma vez que, a porta analógica dos nós sensores MicaZ não suporta tensões superiores a 2,5 V.

6.1.1.3 Experimentos

Com o objetivo de verificar qual das abordagens propostas para o desenvolvimento de um circuito de condicionamento de sinal é mais adequada à aplicação da RSSF M², uma bateria

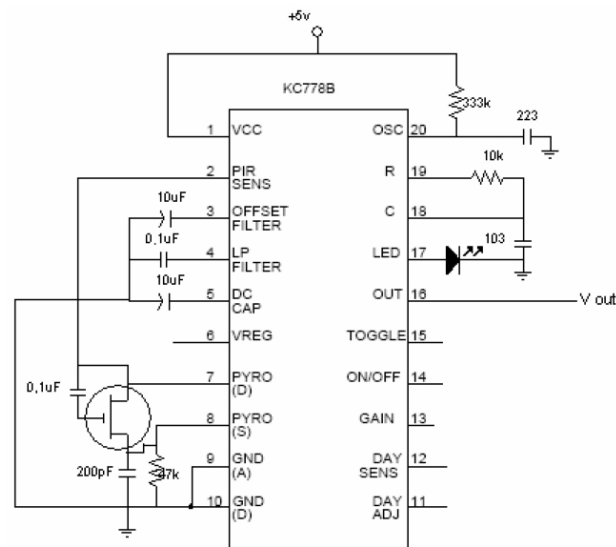


Figura 6.2: Circuito integrado para condicionamento do sinal de resposta fornecido pelo sensor PIR RE200b utilizando o circuito integrado KC778b.

de testes simples foi conduzida em laboratório. A metodologia empregada na verificação da eficiência das propostas consiste na observação da quantidade de detecções corretas realizadas e no número de falso positivos para cada circuito, isto é, na quantidade de vezes que os sensores indicaram a presença de um objeto emitindo radiação infravermelha quando não existiam objetos nenhum.

Na abordagem utilizando amplificadores de instrumentação, é considerada a presença de um objeto sob a área de visada do sensor PIR sempre que o valor sinal coletado for superior 1,25 V ou inferior a 1,10 V (ver Figura 4.2 a respeito da resposta típica de um sensor PIR). Já a abordagem utilizando o CI para controle do sensor PIR considera a presença de um objeto sempre o sinal coletado for superior a 2,0 V.

Nos experimentos, a distância entre os objetos e os sensores foi progressivamente aumentada até ser atingida a distância máxima de 5 metros (largura máxima do laboratório) ou quando a taxa de acertos chegar a 80,0%. Para cada uma das distâncias consideradas foram realizadas 30 medições do deslocamento de objetos em frente ao sensor PIR. Os testes foram realizados sob as mesmas condições para ambos circuitos eletrônicos.

| Distância (m) | Detecções Corretas | Taxa de Acerto | Falso Positivos |
|---------------|--------------------|----------------|-----------------|
| 0,3 | 30 | 100,0% | 1 |
| 0,6 | 29 | 96,7% | 0 |
| 0,9 | 24 | 80,0% | 1 |
| Total | 83 | 92,2% | 2 |

Tabela 6.1: Detecções corretas e falso positivos observados pelo circuito de condicionamento utilizando o amplificador de instrumentação INA116.

A superioridade da segunda abordagem é demonstrada nos resultados apresentados nas

Tabelas 6.1 e 6.2. Enquanto o circuito de condicionamento que utiliza amplificadores de instrumentação não obteve sucesso nas detecções acima de 0.9 metros, os circuito que empregou o CI KC778b detectou objetos a 5 metros de distância mantendo uma taxa de acerto de 90,0%. Com relação aos falso positivos as duas abordagens tiveram desempenhos parecidos (2 falso positivos em todo o experimento) embora, o segundo circuito tenha uma pequena vantagem pois atingiu distâncias superiores.

| Distância (m) | Detecções Corretas | Taxa de Acerto | Falso Positivos |
|---------------|--------------------|----------------|-----------------|
| 0,3 | 30 | 100,0% | 0 |
| 0,6 | 30 | 100,0% | 0 |
| 0,9 | 30 | 100,0% | 1 |
| 2,0 | 30 | 100,0% | 0 |
| 3,0 | 30 | 100,0% | 1 |
| 4,0 | 29 | 96,7% | 0 |
| 5,0 | 27 | 90,0% | 0 |
| Total | 206 | 98,1% | 2 |

Tabela 6.2: Detecções corretas e falso positivos observados pelo circuito de condicionamento utilizando o CI para o controle de sensores infravermelho passivos KC778b.

Assim, o circuito de condicionamento utilizando o CI KC778b foi escolhido para compor os nós sensores do perfil MicaZ/PIR do protótipo da RSSF M². A Figura 6.3 apresenta a configuração final deste componente. Observe a presença do CI KC778b, do sensor RE200b e, ao fundo, a plataforma MicaZ.

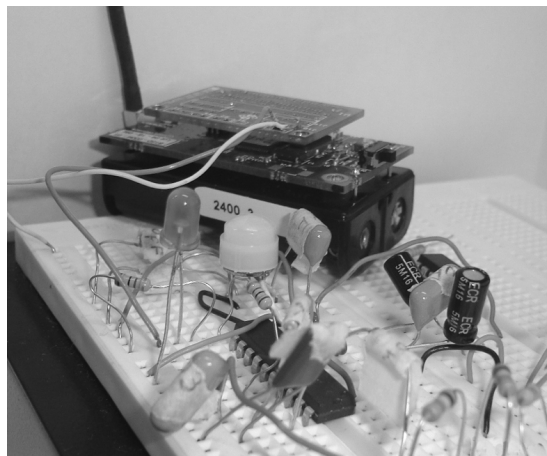


Figura 6.3: Configuração final do conjunto MicaZ/PIR. O circuito de condicionamento apresentado utiliza o CI KC778b.

6.1.2 MicaZ/PIR – Aspectos de Software

O aplicativo embutido em cada um dos nós sensores MicaZ/PIR procurou reproduzir o comportamento descrito no diagrama de transição de estados da Figura 4.4. A linguagem de programação *NesC* [21], uma derivação do C, foi utilizada na codificação deste comportamento.

Esta linguagem é utilizada na implementação do *TinyOS* [42], um sistema operacional desenvolvido para dar suporte à criação de aplicações reais da tecnologia das RSSFs. De maneira semelhante ao ocorrido com a família Mica Motes, o *TinyOS* se tornou um padrão *de facto* no universo das RSSFs por fornecer abstrações ao hardware de diferentes plataformas de nós sensores, apresentar estrutura modular (contando com um coleção diversificada de módulos para a execução de tarefas diversificadas) e utilizar os recursos energéticos dos nós sensores de forma econômica.

O serviço de sensoriamento dos nós MicaZ/PIR foi configurado para ser executado entre intervalos regulares de 125 milissegundos visto que, um sensoriamento realmente contínuo não é passível de realização por dispositivos digitais. Temporizadores disponibilizados por um módulo do *TinyOS* foram utilizados no controle do serviço de sensoriamento. Sempre que o temporizador é disparado, a leitura corrente do sensor PIR é repassada ao *MicaZ* para digitalização e posterior processamento. Este processamento é caracterizado pela verificação da presença ou não de intrusos, o que ocorre quando a leitura do sensor ultrapassa o limiar de 2,0 V. A detecção de um intruso acarreta duas ações, a disseminação de uma mensagem *wake up* e a iniciação de um temporizador para o controle do período ocioso do nó sensor PIR (neste momento, o temporizador de controle do sensoriamento é interrompido).

As diferentes mensagens disseminadas pelos os elementos da RSSF M² forma agrupadas sob um cabeçalho comum. Os campos deste cabeçalho são utilizados de acordo o propósito da informação que se deseja transmitida à rede ou para fora dela. A Figura 6.4 ilustra a estrutura do cabeçalho das mensagens destacando seus campos. Os pacotes enviados pelos nós sensores possuem tamanho máximo igual a 20 bytes, sendo 7 bytes do cabeçalho da camada MAC utilizada pelo *TinyOS*.

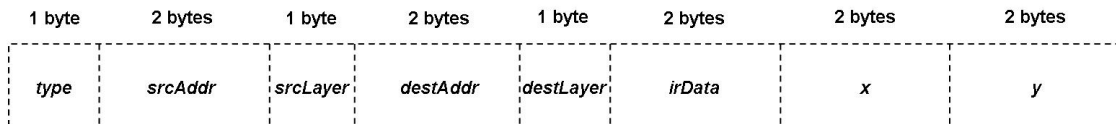


Figura 6.4: Cabelhaço das mensagens disseminadas pelos nós sensores da RSSF M².

As mensagens *wake up* disseminadas pelos nós sensores PIR utilizam os campos descritivos de endereço e camada do nó sensor origem da mensagem, os campos descritivos de endereço e camada do nó sensor destino da mensagem (neste caso *broadcast* e segunda camada, respectivamente) e o campo *irdata* com a tensão obtida do sensor infravermelho passivo. O significado destes e dos demais campos deste cabeçalho são apresentados a seguir.

- **type** – especifica o tipo de mensagem. Foram definidos dois tipos, mensagens *wake up* (`WAKE_WP_MSG`) e mensagens de dados da aplicação (`APP_DATA_MSG`);
- **srcAddr** – especifica o nó sensor origem da mensagem;
- **srcLayer** – especifica a camada a qual pertence o nó sensor origem da mensagem;
- **destAddr** – especifica o nó sensor destino da mensagem;

- `destLayer` – especifica a camada a qual pertence o nó sensor destino da mensagem;
- `irData` – armazena a tensão obtida pelos sensores infravermelho passivos;
- `x` – armazena a coordenada X do alvo rastreado;
- `y` – armazena a coordenada Y do alvo rastreado.

6.2 Segunda Camada

Os elementos da segunda camada compõem, juntamente com os nós sensores da terceira camada, a parte visual da RSSF M² para monitoração ambiental. São funções dos nós sensores desta camada a confirmação da presença de objetos se movimentando pela região monitorada e a identificação dos mesmos. Estes nós sensores devem ainda, ativar os elementos da camada de rastreamento da RSSF M². Os nós MicaZ/CMUcam2 apresentam comportamento reativo ao recebimento de mensagens *wake up* proveniente dos nós sensores PIR.

6.2.1 MicaZ/CMUcam2 – Aspectos de Hardware

Assim como os elementos sensores PIR da primeira camada, a plataforma *MicaZ* é empregada nesta segunda camada para a criação de um nó sensor visual. É sabido que os *MicaZ* não foram projetados e nem possuem os recursos para lidar com dados visuais (ver Seção 2.2.2). Desta forma, o dispositivo de sensoriamento visual *CMUcam2*¹ [58] foi utilizado em conjunto com esta plataforma de sensoriamento. A existência de um processador específico para o controle das tarefas de coleta e processamento de imagens reduz a carga sobre o microcontrolador do *MicaZ*. O conjunto completo MicaZ/CMUcam2 é apresentado na Figura 6.5. Observe a presença da placa de prototipagem utilizada para a expansão de recursos do *MicaZ* e o cabo para a conexão entre os dispositivos.

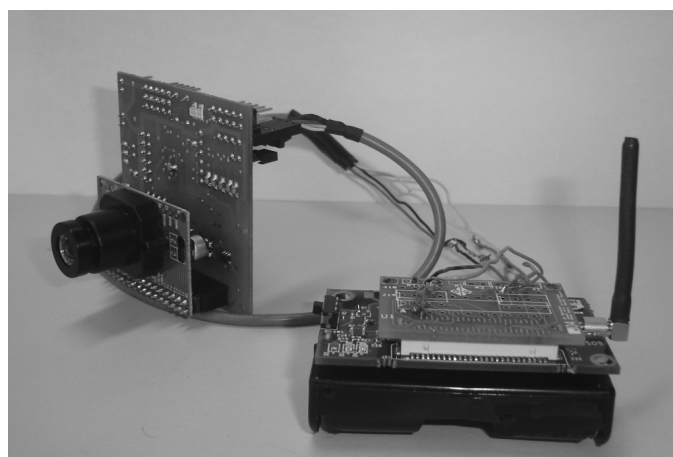


Figura 6.5: Configuração final do conjunto MicaZ/CMUcam2.

¹Para maiores detalhes técnicos a respeito do hardware do dispositivo de sensoriamento visual *CMUcam2* ver Seção 3.2.2.

O grande desafio imposto à criação do nó sensor visual MicaZ/CMUcam2 esteve relacionado à comunicação e conexão entre os dois dispositivos. O modelo *request/reply* foi utilizado como base para esta comunicação. O MicaZ requisita ao dispositivo *CMUcam2* a execução de operações de coleta e processamento de imagens e este responde ao nó sensor com os resultados obtidos. Para conexão física entre os dispositivos foram empregadas as interfaces seriais de ambos equipamentos, UART no *MicaZ* e TTL no *CMUcam2*. As configuração dos parâmetros para esta comunicação serial são listadas na Tabela 6.3

| Parâmetro | Valor |
|---------------------|--------|
| <i>Baud Rate</i> | 57.600 |
| <i>Data bits</i> | 8 |
| <i>Stop Bit</i> | 1 |
| <i>Paridade</i> | Não |
| <i>Flow Control</i> | Não |

Tabela 6.3: Parâmetros para a comunicação serial entre a plataforma MicaZ e o dispositivo de sensoriamento visual *CMUcam2*.

6.2.2 MicaZ/CMUcam2 – Aspectos de Software

O comportamento do aplicativo utilizado pelos nós sensores MicaZ/CMUcam2 reproduziu os estados e transições descritos no diagrama da Figura 4.5. A codificação foi realizada na linguagem *nesC* e foi destinada ao sistema operacional *TinyOS*. Aqui também, os temporizadores desempenharam um importante papel no controle do sensoriamento e do envio de comandos ao dispositivo *CMUcam2*.

Ao receber uma mensagem *wake up* de algum nó sensor MicaZ/PIR (primeira camada), um temporizador representando o intervalo de sensoriamento à procura de objetos se deslocando sob FoV do sensor visual é iniciado. Durante os 5 segundos de vigência deste temporizador, comandos para a execução de rotinas de subtração de *background* são submetidas ao *CMUcam2* a uma frequência de um comando a cada 100 milissegundos. Se o temporizador for disparado, nenhum intruso foi detectado e o sensor visual pode ser desativado. Por outro lado, se um objeto for detectado, o temporizador é interrompido e rotinas de rastreamento de cores são enviadas ao *CMUcam2* para a identificação do objeto (também a uma frequência de um comando a cada 100 ms). Após a execução de 50 comandos de rastreamento onde a identificação do alvo tenha sido nula o sistema desativa o sensor visual e retorna ao seu estado inicial. Uma identificação positiva leva à disseminação de uma mensagem *wake up* destinada à terceira camada.

As mensagens *wake up* disseminadas pelos nós sensores MicaZ/CMUcam2 também empregam o cabeçalho da Figura 6.4 e, além dos campos descritivos de endereço e camada da origem da mensagem e dos campos descritivos de endereço e camada do destino da mensagem utilizam os campos *mx* e *my* contendo as coordenadas² do centróide do alvo identificado no

²Os valores dos campos *mx* e *my* são apresentados e disseminados no sistema de coordenadas da câmera.

rastreamento de cores.

Na implementação do método de subtração de *background* utilizado pelo *CMUcam2*, o quadro ou imagem de referência é representado por um arranjo de 8×8 bytes. O valor de cada célula deste arranjo é o resultado da média aritmética dos *pixels* da região correspondente na imagem original. Quando um novo quadro é capturado, ele é também convertido em um arranjo 8×8 e cada célula é subtraída da célula correspondente do arranjo do quadro de referência. Se a diferença for superior a 15, o limiar estabelecido para a aplicação, uma mudança é sinalizada e, por consequência, a presença de um intruso é detectada. O limiar igual a 15 foi utilizado por ser o valor médio no intervalo definido como ideal pelos criadores do *CMUcam2* (intervalo entre 10 – 20).

Já o algoritmo de rastreamento de cores utilizado pelo *CMUcam2* requer do programador a definição de valores máximos e mínimos para as três componentes do modelo de cores RGB. Durante o rastreamento, o algoritmo examina os *pixels* da imagem capturada, linha por linha. Se o *pixel* inspecionado se encontra dentro dos limites especificados, suas coordenadas são comparadas àquelas do *bounding box* que contém os *pixels* da região rastreada (coordenadas x , y do canto superior esquerdo e inferior direito). Este *bounding box* é ampliado todas as vezes que as coordenadas do *pixel* examinado estão fora de seus limites. O algoritmo armazena ainda, o total de *pixels* inspecionados que estão dentro dos limites de cor especificados e a soma de suas coordenadas vertical e horizontal. Assim, ao final do processamento da imagem, as coordenadas do centróide do alvo rastreado são computadas por meio da divisão destas somas pelo total de *pixels* rastreados. Outra informação fornecida pela *CMUcam2* e utilizada na aplicação embutida nos elementos sensores MicaZ/CMUcam2 é o valor de confiança do rastreamento, resultado da divisão do total de *pixels* dentro dos limites de cor especificados pela área do *bounding box* obtido. Um objeto observado por um nó sensor MicaZ/CMUcam2 é considerado um alvo de interesse para a RSSF M² sempre que o valor de confiança de rastreamento retornado pelo *CMUcam2* for superior a 35. Este valor foi definido empiricamente observando a resposta do sensor na etapa de calibração do dispositivo.

6.3 Terceira Camada

Os nós sensores da terceira camada são responsáveis pelo rastreamento de alvos de interesse para a aplicação identificados na segunda camada da RSSF M². Assim como os elementos MicaZ/CMUcam2, os nós sensores PC/Webcam possuem comportamento reativo uma vez que, apresentam o perfil energético de consumo mais significativo.

6.3.1 PC/Webcam – Aspectos de Hardware

A criação dos elementos sensores da terceira camada empregou três dispositivos distintos. Um IBM/PC fez as vezes de microcontrolador, coordenando as atividades de todo o conjunto, processando as informações visuais em um algoritmo de rastreamento. Uma Creative Instant Webcam [45] é utilizada como sensor visual do conjunto. Esta *webcam* possui sensor CIF CMOS com resolução igual a 352 X 288 *pixels*, frequência de sensoriamento de 30 fps e é

conectada ao IBM/PC via porta USB. O terceiro dispositivo utilizado é responsável pela comunicação destes elementos de rede com os nós sensores MicaZ/PIR e MicaZ/CMUcam2. Trata-se do MIB510 Serial Interface [30] comercializado pela Crossbow Technology Inc. [34]. Este dispositivo é conectado ao IBM/PC por meio de uma interface serial e quando munido de um nó sensor da família Mica Motes se comporta como um *gateway* para as RSSFs.

A configuração final de um nó sensor visual PC/Webcam pode ser observada na Figura 6.6. Note a presença dos três componentes: o IBM/PC ao fundo, a Webcam à esquerda e a interface MIB510 juntamente com um nó sensor MicaZ atuando na comunicação destes elementos com os nós sensores MicaZ/PIR e MicaZ/CMUcam2.



Figura 6.6: Configuração final do conjunto PC/Webcam.

6.3.2 PC/Webcam – Aspectos de Software

A reprodução do comportamento esperado para os nós sensores PC/Webcam da maneira como foi idealizado no diagrama de transição de estados da Figura 4.6 exigiu a utilização de três linguagens de programação no desenvolvimento de aplicativos para duas plataformas.

O aplicativo *TOSBase* distribuído juntamente com o sistema operacional *TinyOS* foi desenvolvido na linguagem *nesC* e atua como o elo de comunicação entre o PC/Webcam e os nós sensores MicaZ/PIR e MicaZ/CMUcam2. Este aplicativo é embutido em nós sensores MicaZ acoplados ao MIB510 e recebe mensagens provenientes de outros nós sensores e as encaminha, via conexão serial, ao IBM/PC para posterior análise. Ele é também responsável pela comunicação no sentido contrário, isto é, disseminar mensagens originadas no IBM/PC e destinadas aos demais nós sensores da RSSF M^2 .

Já o aplicativo *visualCam* é responsável pelo comportamento dos elementos PC/Webcam em resposta às mensagens recebidas. Desenvolvido na linguagem de programação *Java* [36], ele

atua no acionamento do sensor visual e das rotinas de rastreamento assim que uma mensagem *wake up* proveniente dos nós sensores MicaZ/CMUcam2 é recebida.

O serviço de processamento executado pelos nós sensores visuais PC/Webcam compreende às etapas do algoritmo de rastreamento CamShift (*Continuously Adaptive Mean-Shift*) [4]. O CamShift é um algoritmo popular originalmente desenvolvido para o rastreamento do movimento da face humana utilizando histogramas unidimensionais de canais quantizados do espaço de cores HSV. Ele é baseado em uma adaptação do algoritmo *Mean-Shift* [11]. Dada uma imagem de distribuição de probabilidade, o algoritmo encontra a moda da distribuição iterando na direção do máximo incremento da distribuição de probabilidade. O CamShift opera sobre distribuições de probabilidade dinâmicas (isto é, distribuições que devem ser recalculadas a cada novo quadro). Esta característica é encontrada em sequências de vídeo onde objetos sob rastreamento estão em movimento alterando seu tamanho e distribuição de probabilidade ao longo do tempo. O comportamento do algoritmo pode ser resumido da seguinte forma:

1. Escolher a região de interesse (RoI) da imagem de distribuição de probabilidade como sendo todo o quadro.
2. Escolher a localização inicial da janela de busca *Mean-Shift*. A área selecionada representa a distribuição a ser rastreada.
3. Determinar a distribuição de probabilidade de cor da região centrada na janela de busca *Mean-Shift*.
4. Iterar o algoritmo *Mean-Shift* afim de determinar a localização média (*mean location*, ou centróide) da imagem de distribuição de probabilidade. Armazenar o momento de ordem zero e a localização do centróide.
5. Para o quadro seguinte, centralizar a janela de busca na localização média determinada no Passo 4 e ajustar o tamanho da janela de busca em função do momento de ordem zero. Retornar ao Passo 3.

A imagem de distribuição de probabilidade é determinada utilizando métodos que associem ao valor de cada *pixel* da imagem uma probabilidade deste pertencer ao alvo rastreado. O CamShift utiliza o método de histograma *back-projection* [64]. Um histograma unidimensional do alvo de interesse é calculado no Passo 1 do algoritmo (o canal *hue* do modelo de cores HSV é utilizado). O histograma *back-projection* é um método que associa os *pixels* da imagem ao valor correspondente de cada uma das categorias do histograma (*bins*). O *back-projection* do histograma do alvo de interesse com os quadros capturados pelo sensor visual produzem imagens de distribuição de probabilidade onde o valor de cada *pixel* representa a probabilidade do pixel de entrada pertencer ao histograma utilizado.

A localização média na janela de busca *Mean-Shift* (Passo 4 do algoritmo) é determinada por meio dos momentos da imagem de distribuição de probabilidade. Seja $I(x, y)$ a intensidade da imagem de distribuição de probabilidade na posição (x, y) da janela de busca.

a) Calcular o momento de ordem zero

$$M_{00} = \sum_x \sum_y I(x, y) \quad (6.1)$$

b) Encontrar os momentos de primeira ordem para x e y

$$M_{10} = \sum_x \sum_y xI(x, y) \quad (6.2)$$

$$M_{01} = \sum_x \sum_y yI(x, y) \quad (6.3)$$

c) Calcular a localização média na janela de busca

$$x_c = \frac{M_{10}}{M_{00}}; y_c = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (6.4)$$

O componente *mean-shift* do algoritmo CamShift é implementado no cálculo repetido de novos valores (x_c, y_c) para o posicionamento da janela de busca obtida em quadros anteriores até não ocorrem deslocamentos significativos entre quadros, ou seja, quando o algoritmo convergir.

O aplicativo `camShift` embutido nos elementos sensores do perfil PC/Webcam foi desenvolvida na linguagem de programação C++ utilizando a biblioteca de visão computacional OpenCV [13]. Esta biblioteca apresenta rotinas otimizadas para o processamento digital de imagens e visão computacional, além contar com uma implementação nativa do algoritmo CamShift. O aplicativo permanece em execução enquanto for percebida a presença de um alvo de interesse para a RSSF M² sob o FoV da *webcam*, sendo encerrado quando esta premissa não é mais verdadeira. A Figura 6.7 apresenta exemplos de telas do aplicativo `camShift` realizando o rastreamento de um alvo simulado. As imagens são apresentadas em tons-de-cinza para dar maior destaque ao resultado gerado pelo `camShift`.

6.4 Protótipo e Validação

Apresentados os elementos sensores, sua criação e comportamento, resta distribuí-los em um ambiente controlado para a criação do protótipo da RSSF M² desenvolvida neste trabalho. As dependências do Laboratório de Redes e Sistemas Distribuídos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais foram utilizadas como área de monitoração para os experimentos conduzidos para a validação do protótipo. A sala é caracterizada por uma área retangular de dimensões 5×8 m² onde é encontrado um mobiliário típico de um laboratório de pesquisa com armários, estações de trabalho e mesa para reuniões.

No ambiente descrito foram distribuídos três nós sensores (um para cada perfil descrito nas Seções 6.1, 6.2 e 6.3). Os nós sensores foram posicionados ao longo de uma das paredes de maior comprimento da sala, de forma a monitorar o espaço contrário contrário à mesma.



Figura 6.7: Telas do aplicativo `camShift` apresentando o rastreamento de um alvo simulado.

A Figura 6.8 apresenta o diagrama da sala contemplando a distribuição em linha dos nós sensores do protótipo da RSSF M^2 .

A deposição dos elementos sensores considerou a sobreposição de seus campos de visão, em especial os FoV dos nós sensores visuais. Desta forma, a possibilidade da RSSF M^2 “perder” o objeto/alvo rastreado entre as transições de camadas é reduzida. Uma imagem da parte da área monitorada que é observada pelas lentes do dispositivo de sensoriamento visual *CMUcam2* é mostrada na Figura 6.9(a). De maneira semelhante, na Figura 6.9(b) é apresentada a região observada pelo sensor visual do conjunto PC/Webcam. Observe a sobreposição entre os FoV destes dois elementos.

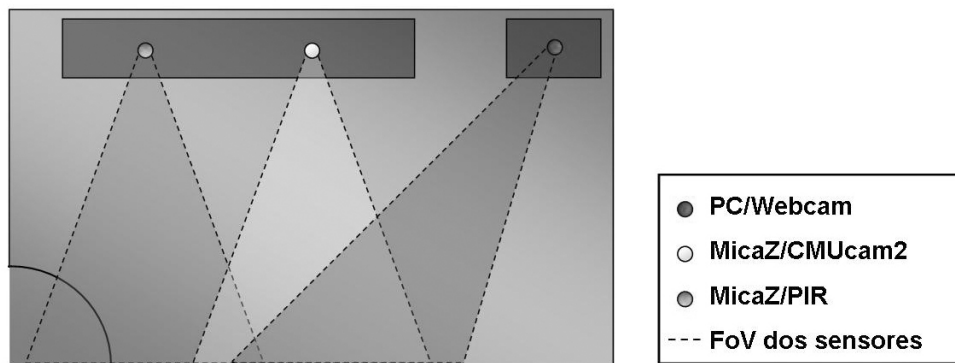


Figura 6.8: Distribuição dos nós sensores do protótipo da RSSF M^2 para monitoração ambiental em uma área retangular de $5 \times 8 \text{ m}^2$.



(a) Região observada pelo MicaZ/CMUcam2



(b) Região observada pelo PC/Webcam

Figura 6.9: Regiões observadas através das lentes dos sensores visuais utilizados pelos nós sensores dos perfis MicaZ/CMUcam2 e PC/Webcam.

Assim como nos experimentos utilizados para determinar o circuito de condicionamento mais eficaz (ver Seção 6.1.1.3) e, por causa da distribuição em linha dos nós sensores, a validação do protótipo da RSSF M^2 foi bastante simples. Objetos caracterizados como alvos de interesse para a aplicação de rastreamento implementada pela rede se deslocando em paralelamente aos nós sensores, à distâncias pré-definidas. O alvo foi definido como um ser humano (emitindo radiação infravermelha) portando um objeto de cor predominante laranja. Foram consideradas distâncias até os nós sensores iguais a 1,0, 2,0 e 3,0 metros. Além disso, para cada distância foram realizados 33 deslocamentos consecutivos sempre na mesma direção isto é, partindo do nó sensor MicaZ/PIR indo em direção ao nó sensor PC/Webcam. Os resultados observados após a execução deste experimento estão sumarizados na Tabela 6.4.

Os resultados mostram uma taxa média de acertos igual a 93,94% e tempo médio de 9,79 segundos para o início das atividades de rastreamento da RSSF M^2 , desde a detecção realizada pelos nós sensores MicaZ/PIR, passado pela identificação da camada MicaZ/CMUcam2 até a ativação dos elementos da terceira camada. O melhor desempenho do protótipo foi observado para os alvos em movimento a 2,0 metros dos sensores (monitoração correta em 100,0%

| | 1 metro | 2 metros | 3 metros |
|------------------------------|---------|----------|----------|
| <i>Monitoração Correta</i> | 28 | 33 | 32 |
| <i>Monitoração Incorreta</i> | – | – | – |
| <i>Detecção Falha</i> | 5 | – | 1 |
| <i>Taxa de Acerto</i> | 84,85% | 100% | 96,97% |
| <i>Tempo Médio</i> | 11,04s | 9,05s | 9,28s |

Tabela 6.4: Resultados experimentais condensados apresentando quantidade de monitorações bem sucedidas, detecções falhas, taxa de acerto médio e tempo médio até o rastreamento do alvo.

dos casos). Este comportamento pode ser explicado com base no FoV e nas limitações dos sensores visuais. Quanto mais próximo ao sensor, menor o tempo que o alvo permanece visível³ justificando as cinco detecções falhas observadas nos experimentos com alvos se deslocando a 1,0 metro do nó sensor. Por outro lado, a uma distância excessiva do sensor, os alvos podem não ser identificados uma vez que, a área ocupada por eles na imagem formada no sensor visual é reduzida. Deste fato decorre a detecção falha observada nos experimento cujo alvo se desloca a 3,0 metros dos nós sensores. De maneira geral, o protótipo da RSSF M² não realizou nenhuma monitoração incorreta. Monitorações incorretas não devem ser confundidas com detecções falhas, no primeiro caso a rede detecta, identifica e rastreia alvos que não são do interesse da aplicação equanto que, a segunda classe está relacionada à não detecção de alvos em movimento pela área monitorada.

Outro experimento considerado na validação do protótipo está relacionado ao tempo de iniciação do sensor visual dos nós sensores PC/Webcam. Uma série de 33 procedimentos de ativação do sensor visual foram realizados, isto é, mensagens *wake up* disseminadas para estes nós sensores. Em média, o algoritmo *camShift* levou 1,89 segundos para dar início ao rastreamento. Este atraso decorre principalmente do tempo para a iniciação e o carregamento de *drivers* da *webcam*, confirmando a afirmação apresentada em Margi *et al.* [51].

6.5 Conclusão

Este capítulo apresentou o desenvolvimento de nós sensores a partir de plataformas existentes, o desenvolvimento de extensões para nós sensores e a implantação de um protótipo para RSSF M² destinada à monitoração ambiental objeto de estudo deste trabalho. Utilizando componentes eletrônicos, plataformas e sensores disponíveis comercialmente, foram apresentados elementos de rede para todas as camadas da aplicação.

Elementos de rede da plataforma MicaZ equipados com sensores infravermelho passivos RE200b executaram as tarefas relacionadas aos nós sensores da primeira camada da RSSF M². A inexistência de sensores PIR específicos para a família Mica Motes tornou necessário o desenvolvimento de circuitos eletrônicos para o condicionamento dos sinais coletados pelo

³Esta afirmação é válida para o posicionamento do nós sensores utilizados nos experimentos, em um posicionamento *overhead* tal afirmação não se sustenta.

RE200b. Duas abordagens foram propostas, uma empregando o amplificador de instrumentação INA116 da Texas Instruments e outra empregando o CI próprio para o controle de sensores PIR KC778b. Através da realização de experimentos em laboratório foi demonstrada a superioridade da segunda abordagem que possui detecções mais precisas, isto é, como maior taxa de acertos e à distâncias superiores.

Nós sensores MicaZ equipados com dispositivos de sensoriamento visual *CMUcam2* foram utilizados na composição dos elementos da segunda camada de sensores. A conexão destes equipamentos, via porta serial, permitiu a execução de rotinas de processamento digital de imagens e visão computacional embutidas no *CMUcam2*. Rotinas como a subtração de *background* e a identificação de alvos por meio do atributo de baixo nível cor foram necessárias à implementação do comportamento esperado para os nós sensores MicaZ/*CMUcam2*.

Computadores pessoais (arquitetura IBM/PC) foram utilizados como plataformas de sensoriamento para os elementos da terceira camada da RSSF M². O serviço de sensoriamento foi realizado pela *webcam* Creative Instant e a comunicação destes elementos com as demais camadas utilizou a interface serial MIB510. O serviço de processamento, em especial a tarefa de rastreamento contou com a implementação do algoritmo CamShift.

Estes três perfis de nós sensores foram organizados em três camadas para o desenvolvimento do protótipo da RSSF M². Experimento de monitoração em um ambiente simulado apresentaram bons resultados com taxas de acerto relacionando detecção, identificação e rastreamento corretos, da ordem de 84,85% no pior caso chegando a 100,0% na melhor configuração do cenário (alvos a 2,0 metros de distância dos sensores). A tarefa de rastreamento no protótipo levou em média 9,79 segundos para ser iniciada considerando-se todas as etapas da rede.

Capítulo 7

Conclusão

Este capítulo condensa os esforços empregados na criação de uma RSSF M^2 para monitoração ambiental apresentados no decorrer desta dissertação. Conclusões e algumas observações a respeito do trabalho são apresentadas, assim como, oportunidades de pesquisa futuras.

As aplicações da tecnologia das RSSFs têm se beneficiado dos avanços nas comunicações sem fio, circuitos integrados e microeletrônica observados ao longo da última década. De aplicações de coleta de parâmetros ambientais simples como temperatura e umidade, as RSSFs atualmente vêm incorporando o sensoriamento de áudio e vídeo a suas aplicações. A abordagem tradicional para o desenvolvimento de aplicações da tecnologia das RSSFs, de modo geral, tem sido baseada na criação de redes que utilizam nós sensores homogêneos e que empregam apenas uma modalidade de sensoriamento. No contexto das aplicações visuais, esta abordagem requer o uso de elementos de rede de maior capacidade computacional, de consumo energético elevado e de custo monetário superior ao dos nós sensores mais simples. A abordagem das RSSFs M^2 , conforme definida por Kulkarni *et. al* [40], explora a variedade de plataformas e dispositivos de sensoriamento desenvolvendo aplicações que utilizam elementos heterogêneos, hierarquicamente organizados, empregando diferentes modalidades de sensoriamento. Desta forma, em uma aplicação baseada nas RSSFs M^2 são utilizados nós sensores simples que são responsáveis por acionar elementos de rede de maior capacidade que executam as tarefas mais complexas (como o processamento de dados audiovisuais, por exemplo).

Neste trabalho, foram considerados o projeto, a modelagem e o desenvolvimento de uma RSSF M^2 para monitoração ambiental. Uma aplicação de rastreamento visual foi utilizada como estudo de caso para a rede e comprovou não apenas a superioridade da abordagem multicamada, multimodal com relação a outras abordagens encontradas na literatura como também, a viabilidade da criação de aplicações reais desta recente especialização das RSSFs.

Durante a etapa de projeto da RSSF M^2 , foi definida a utilização do sensoriamento de radiação infravermelha e de informações visuais por meio de câmeras de vídeo. A rede foi organizada em três camadas que empregam nós sensores distintos. Na primeira camada, foram utilizados nós sensores *MicaZ* [32] equipados com sensores infravermelho passivos (PIR), sensores visuais inteligentes *CMUcam2* [58] foram acoplados a nós sensores *MicaZ* criando os elementos da segunda camada da RSSF M^2 . Os nós sensores da terceira camada foram

definidos como elementos da plataforma *Stargate* [33] equipados com *webcams*.

As principais tarefas referentes a uma aplicação de rastreamento visual foram distribuídas entre as camadas da RSSF M^2 da seguinte forma: *i*) a detecção de possíveis alvos de rastreamento foi atribuída à primeira camada; *ii*) a identificação dos alvos e posterior confirmação destes como alvos de interesse para a monitoração ficou sob a responsabilidade dos elementos da segunda camada e *iii*) o rastreamento dos alvos foi realizado na terceira camada da RSSF M^2 .

Na modelagem da rede, o comportamento dos nós sensores de cada uma das camadas foi descrito por máquinas de estados finitos estendidas e comunicantes (MEFECs) onde os estados representam um conjunto de ações para serem desempenhadas e as transições são desencadeadas por eventos que levam à execução destas ações. Esta representação permitiu aplicar aos diferentes nós sensores que formam a RSSF M^2 para monitoração ambiental, comportamentos que se adequam aos usos e requisitos das tarefas por eles desempenhadas. Os nós sensores da primeira camada foram configurados para realizar sensoriamento contínuo sendo os responsáveis por alertar o restante da RSSF M^2 a respeito de possíveis alvos para monitoração. Nos elementos da segunda e terceira camadas foi adotado o comportamento reativo a eventos, no caso a detecção de objetos e a identificação destes como alvos a serem monitorados.

Com relação ao processamento das informações visuais na segunda camada, foi empregado um algoritmo embutido no dispositivo de sensoriamento visual *CMUcam2* que examina as imagens capturadas em busca de *pixels* contíguos de uma mesma faixa de cores para a identificação de objetos com base no atributo de cor. Para o rastreamento visual, realizado pelos elementos da terceira camada, foi empregado o algoritmo CamShift [4] que se adapta dinamicamente ao deslocamento de alvos sob o seu FoV.

A avaliação do desempenho da RSSF M^2 para monitoração ambiental foi realizada em duas frentes, uma relacionada à implementação da aplicação de rastreamento em um ambiente simulado e outra relacionada à implementação da aplicação de rastreamento utilizando componentes, sensores e plataformas disponíveis comercialmente.

Na avaliação simulada, extensões foram incorporadas ao arcabouço MannaSim [43], utilizado para a simulação de aplicações da tecnologia das RSSFs no ambiente de simulação NS-2 [55], permitindo a avaliação da RSSF M^2 para monitoração ambiental. Foi verificado que a RSSF M^2 reduz o consumo de suas reservas energéticas através da otimização dos serviços de sensoriamento e processamento. Os experimentos comprovam que estes serviços não devem ser negligenciados no que diz respeito ao consumo energético, com acontece em análises de RSSFs que monitoram parâmetros simples como temperatura e umidade.

O comportamento baseado em eventos permitiu que os sensores visuais da rede fossem utilizados, em grande parte das vezes, apenas nas situações oportunas. Assim, a taxa de uso efetivo dos nós sensores da RSSF M^2 foi, em média, duas vezes superior à taxa dos elementos de uma RSSF Visual Heterogênea e praticamente cinco vezes superior à taxa de uso dos nós sensores da RSSF Visual Homogênea. Em critérios como o atraso de primeira observação e a latência média das mensagens no entanto, a RSSF M^2 apresentou resultados modestos e foi

superada pela RSSF Visual Homogênea. Mas, ainda assim, o uso do sensoriamento infravermelho se mostrou superior à rede multicamada que fez uso de sensores visuais apenas. A RSSF M^2 se mostrou imune ainda, às variações na velocidade de deslocamento do alvo monitorado, mantendo um comportamento constante com relação ao atraso de primeira observação.

Para a avaliação utilizando dispositivos, plataformas e sensores comerciais foram necessários o projeto e desenvolvimento de um dispositivo de sensoriamento infravermelho (contendo sensor e circuito de condicionamento) uma vez que, não existem sensores infravermelho passivos projetados especificamente para aplicações da tecnologia das RSSFs, em especial para a plataforma *MicaZ*. Duas abordagens para o desenvolvimento do circuito para o condicionamento dos sinais provenientes do sensor PIR foram utilizadas, amplificadores de instrumentação e um circuito integrado próprio para o controle de sensores PIR. A segunda abordagem foi superior, detectando alvos a distâncias de até 5 metros e com confiabilidade superior a 98%. Além deste elemento, foram utilizados ainda dispositivos *CMUcam2* conectados a nós sensores *MicaZ* e um IBM/PC equipado com um sensor visual do tipo *webcam* (em substituição à plataforma *Stargate* não disponíveis nos laboratório do Grupo Manna).

Um experimento de monitoração em um ambiente simulado revelou taxas de acerto relacionando detecção, identificação e rastreamento corretos, da ordem de 84,85% no pior caso chegando a 100,0% na melhor configuração do cenário (alvos a 2,0 metros de distância dos sensores). A tarefa de rastreamento no protótipo levou em média 9,79 segundos para ser iniciada considerando-se todas as etapas da rede.

Opções de pesquisa futuras que podem estender este trabalho são várias. De imediato, é possível estender a RSSF M^2 para suportar mais de um alvo se deslocando pela região monitorada, com diferentes trajetórias e aceleração. O sistema de identificação visual da aplicação de rastreamento pode se tornar mais robusto se forem incorporados elementos de sistemas de Recuperação de Informação com Base no Conteúdo [16] como por exemplo, bases de atributos visuais. Outra oportunidade de pesquisa a ser explorada futuramente esta no desenvolvimento e incorporação de protocolos de roteamento específicos para o controle e disseminação de informação visual em uma RSSF M^2 . Com relação ao protótipo desenvolvido, o desafio imediato é encontrado na substituição dos elementos da terceira camada que empregam como plataforma de sensoriamento computadores pessoais por uma verdadeira plataforma de sensoriamento como o *Stargate* [33] por exemplo. Nesta transição, o algoritmo de rastreamento visual CamShift [4] deve ser preterido em favor de um algoritmo próprio para aplicações de RSSFs Visuais como o COBMAT [54]. Os sensores visuais e infravermelho passivo podem, também, ser combinados em um único elemento sensor agrupando as camadas da RSSFs M^2 e desta forma minimizar a perda de mensagens.

Apêndice A

Lista de Abreviações

| | |
|--------|--|
| CCD | Charge Coupled Device |
| CI | Circuitio integrado |
| CIF | Common Intermediate Format |
| CMOS | Complementary Metal-Oxide Semiconductor |
| COBMAT | Color-Based Multiple Agent Tracking |
| FFT | Fast Fourier Transform |
| FPGA | Field Programmable Gate Array |
| FoV | Field of View |
| fps | Frames per second |
| IBM | International Business Machines |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| JPEG | Joint Photographic Experts Group |
| MAC | Media Access Control |
| MEF | Máquina de Estados Finitos |
| MEFEC | Máquina de Estados Finitos Estendida e Comunicante |
| MEMS | Micro-Electro-Mechanical Systems. |
| PA | Ponto de Acesso |
| PC | Personal Computer |
| PIR | Passive Infrared |

| | |
|-------------|--|
| QCIF | Quarter CIF |
| QoS | Quality of Service |
| RGB | Red Green Blue |
| RoI | Region of Interest |
| RSSF | Rede de Sensores Sem Fio |
| RSSF | M ² Redes de Sensores Sem Fio Multicamada, Multimodal |
| RSSF Visual | Redes de Sensores Sem Fio Visual |
| RSSI | Received Signal Strength Indicator |
| TTL | Transistor-Transistor Logic |
| UART | Universal Asynchronous Receiver/Transmitter |
| USB | Universal Serial Bus |
| VGA | Video Graphics Array |
| WSN | Wireless Sensor Networks |
| WSN | M ² Multi-tier, Multimodal Wireless Sensor Networks |

Apêndice B

Resultados dos Experimentos Simulados

Este apêndice apresenta os resultados obtidos através de experimentos realizados no ambiente de simulação NS-2 [55] em conjunto com o arcabouço MannaSim [43]. Os experimentos tiveram por objetivos, a avaliação do comportamento da RSSF M^2 para monitoração ambiental proposta neste trabalho e a comparação do desempenho da mesma frente a duas outras abordagens encontradas na literatura: as RSSFs Visuais Heterogêneas Multicamada e as RSSF Visuais Homogêneas.

As simulações são descritas em detalhes na Seção 5.1. Os resultados, apresentados nas tabelas a seguir, correspondem à média aritmética de trinta e três execuções dos cenários apresentados nas Seções 5.3 e 5.4. São fornecidos, ainda, os desvios padrão (σ) obtidos para os cada um valores informados. Os cenários foram parametrizados de acordo com os seguintes itens:

- alcance de comunicação dos elementos da primeira camada;
- tempo de espera por um alvo;
- velocidade do alvo;
- dimensões da região monitorada e, por conseqüência, a quantidade de nós sensores presentes (ver Tabela 5.2);

A Seção B.1 condensa os resultados relativos ao desempenho da RSSF M^2 com relação à variação dos três primeiros parâmetros listados acima. Na Seção B.2 os resultados correspondem à análise comparativa entre a RSSF M^2 e duas outras abordagens para o desenvolvimento de RSSFs visuais.

B.1 Desempenho da RSSF M²

B.1.1 Alcance de Comunicação

Neste cenário é observado o comportamento da RSSF M² com relação à variação do alcance de comunicação dos nós sensores do perfil MicaZ/PIR que representam a primeira camada da RSSF M². Configuração dos parâmetros para o cenário:

- **alcance de comunicação:** 10, 20, 25 e 40 m;
- **tempo de espera por alvo:** 5 s;
- **velocidade do alvo:** 2,5 m/s;
- **região monitorada:** 120 × 120 m².

| Alcance do Rádio × Consumo Energético | | | | | | | | |
|---------------------------------------|---------|----------|-----------------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|
| Alcance do Rádio | Amort. | σ | Primeira Camada | σ | Segunda Camada | σ | Terceira Camada | σ |
| 10 m | 117,202 | 2,943 | 49,467 | 0,019 | 68,138 | 2,458 | 381,192 | 8,202 |
| 20 m | 138,371 | 3,544 | 49,537 | 0,026 | 100,119 | 3,421 | 380,211 | 8,137 |
| 25 m | 157,904 | 4,222 | 49,658 | 0,031 | 118,526 | 4,173 | 423,662 | 9,366 |
| 40 m | 281,783 | 8,576 | 49,741 | 0,028 | 295,988 | 10,688 | 457,004 | 10,073 |

Tabela B.1: Consumo de recursos energéticos amortizado e por camada da RSSF M² frente às variações no alcance de comunicação dos nós sensores da primeira camada. Consumo expresso em *joules*.

| Alcance do Rádio × Consumo Energético - Transmissão | | | | | | | | |
|---|--------|----------|-----------------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|
| Alcance Rádio | Amort. | σ | Primeira Camada | σ | Segunda Camada | σ | Terceira Camada | σ |
| 10 m | 0,229 | 0,007 | 0,012 | 0,000 | 0,014 | 0,000 | 1,304 | 0,037 |
| 20 m | 0,222 | 0,007 | 0,013 | 0,000 | 0,014 | 0,000 | 1,263 | 0,043 |
| 25 m | 0,229 | 0,009 | 0,014 | 0,000 | 0,015 | 0,000 | 1,302 | 0,049 |
| 40 m | 0,197 | 0,006 | 0,019 | 0,001 | 0,014 | 0,000 | 1,107 | 0,032 |

Tabela B.2: Consumo de recursos energéticos, no serviço de comunicação (transmissão), amortizado e por camada da RSSF M² frente às variações no alcance de comunicação dos nós sensores da primeira camada. Consumo expresso em *joules*.

| Alcance do Rádio \times Consumo Energético - Recepção | | | | | | | | |
|---|--------|----------|-----------------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|
| Alcance Rádio | Amort. | σ | Primeira Camada | σ | Segunda Camada | σ | Terceira Camada | σ |
| 10 m | 5,766 | 0,169 | 1,226 | 0,036 | 1,216 | 0,036 | 28,507 | 0,837 |
| 20 m | 6,019 | 0,192 | 1,277 | 0,041 | 1,269 | 0,041 | 29,760 | 0,950 |
| 25 m | 6,625 | 0,232 | 1,408 | 0,049 | 1,372 | 0,048 | 32,856 | 1,148 |
| 40 m | 7,095 | 0,211 | 1,493 | 0,044 | 1,479 | 0,044 | 35,161 | 1,045 |

Tabela B.3: Consumo de recursos energéticos, no serviço de comunicação (recepção), amortizado e por camada da RSSF M² frente às variações no alcance de comunicação dos nós sensores da primeira camada. Consumo expresso em *joules*.

| Alcance do Rádio \times Consumo Energético - Sensoriamento | | | | | | | | |
|--|---------|----------|-----------------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|
| Alcance Rádio | Amort. | σ | Primeira Camada | σ | Segunda Camada | σ | Terceira Camada | σ |
| 10 m | 78,868 | 2,577 | 44,379 | 0,021 | 65,900 | 2,395 | 165,232 | 6,296 |
| 20 m | 99,676 | 3,125 | 44,397 | 0,020 | 97,419 | 3,342 | 163,986 | 5,960 |
| 25 m | 117,934 | 3,804 | 44,388 | 0,020 | 115,487 | 4,077 | 201,265 | 7,427 |
| 40 m | 239,272 | 8,080 | 44,379 | 0,020 | 290,566 | 10,511 | 228,989 | 7,984 |

Tabela B.4: Consumo de recursos energéticos, no serviço de sensoriamento, amortizado e por camada da RSSF M² frente às variações no alcance de comunicação dos nós sensores da primeira camada. Consumo expresso em *joules*.

| Alcance do Rádio \times Consumo Energético - Processamento | | | | | | | | |
|--|--------|----------|-----------------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|
| Alcance Rádio | Amort. | σ | Primeira Camada | σ | Segunda Camada | σ | Terceira Camada | σ |
| 10 m | 3,879 | 0,121 | 3,698 | 0,002 | 0,857 | 0,031 | 16,147 | 0,615 |
| 20 m | 4,132 | 0,123 | 3,700 | 0,002 | 1,267 | 0,043 | 16,025 | 0,582 |
| 25 m | 4,896 | 0,151 | 3,699 | 0,002 | 1,502 | 0,053 | 19,669 | 0,726 |
| 40 m | 6,865 | 0,209 | 3,698 | 0,002 | 3,779 | 0,137 | 22,378 | 0,780 |

Tabela B.5: Consumo de recursos energéticos, no serviço de sensoriamento, amortizado e por camada da RSSF M² frente às variações no alcance de comunicação dos nós sensores da primeira camada. Consumo expresso em *joules*.

| Alcance do Rádio \times Uso Efetivo dos Sensores Visuais | | | | | | | |
|--|--------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|--|
| Alcance Rádio | Amort. | σ | Segunda Camada | σ | Terceira Camada | σ | |
| 10 m | 0,087 | 0,003 | 0,042 | 0,001 | 0,272 | 0,015 | |
| 20 m | 0,075 | 0,003 | 0,028 | 0,001 | 0,272 | 0,014 | |
| 25 m | 0,066 | 0,002 | 0,025 | 0,001 | 0,237 | 0,011 | |
| 40 m | 0,052 | 0,003 | 0,009 | 0,000 | 0,228 | 0,012 | |

Tabela B.6: Uso efetivo dos sensores visuais amortizado e por camada da RSSF M² frente às variações no alcance de comunicação dos nós sensores da primeira camada.

B.1.2 Tempo de Espera por Alvo

Neste cenário, variações no intervalo de sensoriamento dos nós sensores visuais em busca de intrusos após receberem mensagens *wake up* são consideradas. O termo *tempo de espera por alvo* é empregado designar estes intervalos. Configuração dos parâmetros para o cenário:

- **tempo de espera por alvo:** 2,5, 5,0, 10,0, e 20,0 s;
- **alcance de comunicação:** 20 m;
- **velocidade do alvo:** 2,5 m/s;
- **região monitorada:** $120 \times 120 \text{ m}^2$.

| Tempo de Espera por Alvo \times Consumo Energético | | | | | | | | |
|--|---------|----------|-----------------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|
| Espera por Alvo | Amort. | σ | Primeira Camada | σ | Segunda Camada | σ | Terceira Camada | σ |
| 2,5 s | 111,992 | 2,497 | 49,639 | 0,026 | 77,692 | 2,583 | 311,548 | 4,983 |
| 5,0 s | 139,106 | 2,995 | 49,530 | 0,024 | 100,417 | 2,842 | 383,435 | 7,412 |
| 10,0 s | 175,536 | 5,037 | 49,349 | 0,024 | 129,933 | 4,209 | 484,134 | 14,198 |
| 20,0 s | 245,536 | 6,507 | 48,678 | 0,031 | 194,463 | 5,359 | 646,683 | 19,870 |

Tabela B.7: Consumo de recursos energéticos amortizado e por camada da RSSF M^2 frente às variações no tempo de espera por alvo. Consumo expresso em *joules*.

| Tempo de Espera por Alvo \times Consumo Energético - Transmissão | | | | | | | | |
|--|--------|----------|-----------------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|
| Espera por Alvo | Amort. | σ | Primeira Camada | σ | Segunda Camada | σ | Terceira Camada | σ |
| 2,5 s | 0,214 | 0,007 | 0,013 | 0,000 | 0,014 | 0,000 | 1,213 | 0,040 |
| 5,0 s | 0,224 | 0,007 | 0,013 | 0,000 | 0,014 | 0,000 | 1,274 | 0,039 |
| 10,0 s | 0,226 | 0,008 | 0,013 | 0,000 | 0,014 | 0,000 | 1,284 | 0,047 |
| 20,0 s | 0,227 | 0,007 | 0,013 | 0,000 | 0,014 | 0,000 | 1,291 | 0,041 |

Tabela B.8: Consumo de recursos energéticos, no serviço de comunicação (transmissão), amortizado e por camada da RSSF M^2 frente às variações no tempo de espera por alvo. Consumo expresso em *joules*.

| Tempo de Espera por Alvo \times Consumo Energético - Recepção | | | | | | | | |
|---|--------|----------|-----------------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|
| Espera por Alvo | Amort. | σ | Primeira Camada | σ | Segunda Camada | σ | Terceira Camada | σ |
| 2,5 s | 5,794 | 0,183 | 1,229 | 0,039 | 1,222 | 0,039 | 28,647 | 0,906 |
| 5,0 s | 6,023 | 0,173 | 1,278 | 0,037 | 1,270 | 0,036 | 29,778 | 0,853 |
| 10,0 s | 6,062 | 0,206 | 1,287 | 0,044 | 1,278 | 0,043 | 29,973 | 1,018 |
| 20,0 s | 6,062 | 0,182 | 1,287 | 0,039 | 1,278 | 0,038 | 29,970 | 0,899 |

Tabela B.9: Consumo de recursos energéticos, no serviço de comunicação (recepção), amortizado e por camada da RSSF M² frente às variações no tempo de espera por alvo. Consumo expresso em *joules*.

| Tempo de Espera por Alvo \times Consumo Energético - Sensoriamento | | | | | | | | |
|--|---------|----------|-----------------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|
| Espera por Alvo | Amort. | σ | Primeira Camada | σ | Segunda Camada | σ | Terceira Camada | σ |
| 2,5 s | 74,687 | 2,168 | 44,535 | 0,015 | 75,326 | 2,515 | 102,284 | 3,336 |
| 5,0 s | 100,151 | 2,637 | 44,388 | 0,018 | 97,711 | 2,773 | 165,674 | 5,509 |
| 10,0 s | 134,902 | 4,487 | 44,214 | 0,025 | 126,840 | 4,115 | 257,841 | 11,321 |
| 20,0 s | 202,053 | 5,976 | 43,595 | 0,040 | 190,542 | 5,259 | 406,556 | 17,051 |

Tabela B.10: Consumo de recursos energéticos, no serviço de sensoriamento, amortizado e por camada da RSSF M² frente às variações no tempo de espera por alvo. Consumo expresso em *joules*.

| Tempo de Espera por Alvo \times Consumo Energético - Processamento | | | | | | | | |
|--|--------|----------|-----------------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|
| Espera por Alvo | Amort. | σ | Primeira Camada | σ | Segunda Camada | σ | Terceira Camada | σ |
| 2,5 s | 2,938 | 0,074 | 3,711 | 0,001 | 0,980 | 0,033 | 9,996 | 0,326 |
| 5,0 s | 4,162 | 0,110 | 3,699 | 0,001 | 1,271 | 0,036 | 16,190 | 0,538 |
| 10,0 s | 5,913 | 0,216 | 3,684 | 0,002 | 1,650 | 0,054 | 25,197 | 1,106 |
| 20,0 s | 8,879 | 0,314 | 3,633 | 0,003 | 2,478 | 0,068 | 39,730 | 1,666 |

Tabela B.11: Consumo de recursos energéticos, no serviço de processamento, amortizado e por camada da RSSF M² frente às variações no tempo de espera por alvo. Consumo expresso em *joules*.

| Tempo de Espera por Alvo \times Uso Efetivo dos Sensores Visuais | | | | | | | |
|--|--------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|--|
| Espera por Alvo | Amort. | σ | Segunda Camada | σ | Terceira Camada | σ | |
| 2,5 s | 0,099 | 0,004 | 0,035 | 0,001 | 0,363 | 0,016 | |
| 5,0 s | 0,078 | 0,003 | 0,029 | 0,001 | 0,282 | 0,013 | |
| 10,0 s | 0,059 | 0,003 | 0,022 | 0,001 | 0,209 | 0,015 | |
| 20,0 s | 0,045 | 0,004 | 0,015 | 0,001 | 0,172 | 0,018 | |

Tabela B.12: Uso efetivo dos sensores visuais amortizado e por camada da RSSF M² frente às variações no tempo de espera por alvo.

B.1.3 Velocidade do Alvo

Este cenário verifica o comportamento da RSSF M² para monitoração ambiental frente às diferentes velocidades de deslocamento com as quais alvos de interesse podem se locomover pelo ambiente. Configuração dos parâmetros para o cenário:

- **alcance de comunicação:** 20 m;
- **tempo de espera por alvo:** 5,0 s;
- **velocidade do alvo:** 1,0, 2,5, 5,0 e 10,0 m/s;
- **região monitorada:** 120 × 120 m².

| Velocidade do Alvo × Consumo Energético | | | | | | | | |
|---|---------|----------|-----------------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|
| Velocidade do Alvo | Amort. | σ | Primeira Camada | σ | Segunda Camada | σ | Terceira Camada | σ |
| 1,0 m/s | 204,027 | 4,289 | 49,816 | 0,044 | 168,323 | 4,474 | 501,058 | 9,318 |
| 2,5 m/s | 139,120 | 3,825 | 49,535 | 0,031 | 100,897 | 3,736 | 381,593 | 8,368 |
| 5,0 m/s | 101,293 | 2,257 | 49,429 | 0,023 | 61,252 | 1,998 | 313,319 | 5,979 |
| 10,0 m/s | 89,277 | 2,043 | 49,263 | 0,019 | 47,044 | 1,620 | 298,223 | 5,959 |

Tabela B.13: Consumo de recursos energéticos amortizado e por camada da RSSF M² frente às variações na velocidade de deslocamento do alvo. Consumo expresso em *joules*.

| Velocidade do Alvo × Consumo Energético - Transmissão | | | | | | | | |
|---|--------|----------|-----------------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|
| Velocidade do Alvo | Amort. | σ | Primeira Camada | σ | Segunda Camada | σ | Terceira Camada | σ |
| 1,0 m/s | 0,371 | 0,012 | 0,016 | 0,000 | 0,018 | 0,001 | 2,143 | 0,073 |
| 2,5 m/s | 0,224 | 0,009 | 0,013 | 0,001 | 0,014 | 0,001 | 1,276 | 0,050 |
| 5,0 m/s | 0,155 | 0,005 | 0,011 | 0,000 | 0,012 | 0,000 | 0,870 | 0,028 |
| 10,0 m/s | 0,116 | 0,004 | 0,010 | 0,000 | 0,010 | 0,000 | 0,643 | 0,023 |

Tabela B.14: Consumo de recursos energéticos, no serviço de comunicação (transmissão), amortizado e por camada da RSSF M² frente às variações na velocidade de deslocamento do alvo. Consumo expresso em *joules*.

| Velocidade do Alvo \times Consumo Energético - Recepção | | | | | | | | |
|---|--------|----------|-----------------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|
| Velocidade do Alvo | Amort. | σ | Primeira Camada | σ | Segunda Camada | σ | Terceira Camada | σ |
| 1,0 m/s | 8,911 | 0,276 | 1,902 | 0,059 | 1,884 | 0,058 | 44,031 | 1,362 |
| 2,5 m/s | 6,044 | 0,231 | 1,283 | 0,049 | 1,275 | 0,049 | 29,882 | 1,141 |
| 5,0 m/s | 4,607 | 0,149 | 0,973 | 0,032 | 0,970 | 0,032 | 22,788 | 0,739 |
| 10,0 m/s | 3,674 | 0,131 | 0,774 | 0,028 | 0,773 | 0,028 | 18,179 | 0,648 |

Tabela B.15: Consumo de recursos energéticos, no serviço de comunicação (recepção), amortizado e por camada da RSSF M² frente às variações na velocidade de deslocamento do alvo. Consumo expresso em *joules*.

| Velocidade do Alvo \times Consumo Energético - Sensoriamento | | | | | | | | |
|--|---------|----------|-----------------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|
| Velocidade do Alvo | Amort. | σ | Primeira Camada | σ | Segunda Camada | σ | Terceira Camada | σ |
| 1,0 m/s | 155,928 | 3,828 | 44,051 | 0,023 | 164,111 | 4,370 | 235,069 | 7,065 |
| 2,5 m/s | 100,395 | 3,363 | 44,390 | 0,021 | 98,181 | 3,643 | 165,256 | 6,164 |
| 5,0 m/s | 66,674 | 1,978 | 44,586 | 0,013 | 59,355 | 1,947 | 118,040 | 4,662 |
| 10,0 m/s | 56,572 | 1,806 | 44,622 | 0,011 | 45,530 | 1,574 | 112,690 | 4,742 |

Tabela B.16: Consumo de recursos energéticos, no serviço de sensoriamento, amortizado e por camada da RSSF M² frente às variações na velocidade de deslocamento do alvo. Consumo expresso em *joules*.

| Velocidade do Alvo \times Consumo Energético - Processamento | | | | | | | | |
|--|--------|----------|-----------------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|
| Velocidade do Alvo | Amort. | σ | Primeira Camada | σ | Segunda Camada | σ | Terceira Camada | σ |
| 1,0 m/s | 5,863 | 0,144 | 3,671 | 0,002 | 2,134 | 0,057 | 22,972 | 0,690 |
| 2,5 m/s | 4,159 | 0,129 | 3,699 | 0,002 | 1,277 | 0,047 | 16,150 | 0,602 |
| 5,0 m/s | 3,056 | 0,090 | 3,716 | 0,001 | 0,772 | 0,025 | 11,535 | 0,456 |
| 10,0 m/s | 2,850 | 0,090 | 3,718 | 0,001 | 0,592 | 0,020 | 11,013 | 0,463 |

Tabela B.17: Consumo de recursos energéticos, no serviço de processamento, amortizado e por camada da RSSF M² frente às variações na velocidade de deslocamento do alvo. Consumo expresso em *joules*.

| Velocidade do Alvo \times Uso Efetivo dos Sensores Visuais | | | | | | |
|--|--------|----------|----------------|----------|-----------------|----------|
| Velocidade do Alvo | Amort. | σ | Segunda Camada | σ | Terceira Camada | σ |
| 1,0 m/s | 0,118 | 0,003 | 0,037 | 0,001 | 0,459 | 0,015 |
| 2,5 m/s | 0,077 | 0,003 | 0,029 | 0,001 | 0,276 | 0,015 |
| 5,0 m/s | 0,047 | 0,003 | 0,024 | 0,001 | 0,146 | 0,013 |
| 10,0 m/s | 0,021 | 0,002 | 0,016 | 0,001 | 0,042 | 0,008 |

Tabela B.18: Uso efetivo dos sensores visuais amortizado e por camada da RSSF M² frente às variações na velocidade de deslocamento do alvo.

| Primeira Observação | | |
|---------------------|--------|----------|
| Velocidade do Alvo | Atraso | σ |
| 1,0 m/s | 51,949 | 17,129 |
| 2,5 m/s | 17,864 | 6,072 |
| 5,0 m/s | 18,621 | 6,265 |
| 10,0 m/s | 17,527 | 3,520 |

Tabela B.19: Atraso de primeira observação frente às variações na velocidade de deslocamento do alvo. Atraso expresso em *segundos*.

B.2 Desempenho Comparativo

Os cenários considerados nesta seção tem por objetivo verificar o desempenho da RSSF M² com relação às RSSFs Visual Heterogênea Multicamada e às RSSFs Visual Homogênea. São avaliados, o consumo de recursos energéticos amortizado entre os elementos das redes, o atraso de primeira observação, a latência média das mensagens e o uso efetivo dos sensores visuais, além da escalabilidade das redes. Configuração dos parâmetros para os cenários:

- **alcance de comunicação:** 20 m;
- **tempo de espera por alvo:** 5,0 s;
- **velocidade do alvo:** 2,5 m/s;
- **região monitorada:** $100 \times 100 \text{ m}^2$, $120 \times 120 \text{ m}^2$, $140 \times 140 \text{ m}^2$, $160 \times 160 \text{ m}^2$.

| Dimensões da Área Monitorada \times Consumo Energético | | | | | | |
|--|---------------------|----------|-------------------------|----------|-----------------------|----------|
| Área Monitorada | RSSF M ² | | RSSF Visual Heterogênea | | RSSF Visual Homogênea | |
| | RSSF M ² | σ | RSSF Visual Heterogênea | σ | RSSF Visual Homogênea | σ |
| 100 \times 100 m ² | 159,144 | 4,649 | 353,062 | 0,526 | 1759,685 | 39,721 |
| 120 \times 120 m ² | 137,025 | 3,414 | 353,416 | 0,610 | 1621,806 | 35,624 |
| 140 \times 140 m ² | 123,040 | 3,064 | 354,269 | 0,539 | 1547,674 | 23,304 |
| 160 \times 160 m ² | 116,710 | 3,058 | 355,720 | 0,574 | 1476,050 | 23,921 |

Tabela B.20: Consumo de recursos energéticos amortizado frente às variações nas dimensões da área monitorada. Consumo expresso em *joules*.

| Dimensões da Área Monitorada × Consumo Energético - Transmissão | | | | | | |
|---|---------------------|----------|-------------------------|----------|-----------------------|----------|
| Área Monitorada | RSSF M ² | σ | RSSF Visual Heterogênea | σ | RSSF Visual Homogênea | σ |
| 100 × 100 m ² | 0,199 | 0,008 | 0,040 | 0,003 | 0,556 | 0,024 |
| 120 × 120 m ² | 0,221 | 0,008 | 0,048 | 0,004 | 0,695 | 0,030 |
| 140 × 140 m ² | 0,242 | 0,009 | 0,058 | 0,003 | 0,826 | 0,033 |
| 160 × 160 m ² | 0,270 | 0,010 | 0,065 | 0,005 | 0,936 | 0,035 |

Tabela B.21: Consumo de recursos energéticos, no serviço de comunicação (transmissão), amortizado frente às variações nas dimensões da área monitorada. Consumo expresso em *joules*.

| Dimensões da Área Monitorada × Consumo Energético - Recepção | | | | | | |
|--|---------------------|----------|-------------------------|----------|-----------------------|----------|
| Área Monitorada | RSSF M ² | σ | RSSF Visual Heterogênea | σ | RSSF Visual Homogênea | σ |
| 100 × 100 m ² | 4,607 | 0,171 | 0,863 | 0,068 | 20,221 | 0,869 |
| 120 × 120 m ² | 5,938 | 0,198 | 1,207 | 0,092 | 31,609 | 1,383 |
| 140 × 140 m ² | 7,225 | 0,255 | 1,612 | 0,092 | 42,679 | 1,728 |
| 160 × 160 m ² | 8,638 | 0,316 | 1,922 | 0,135 | 52,656 | 1,984 |

Tabela B.22: Consumo de recursos energéticos, no serviço de comunicação (recepção), amortizado frente às variações nas dimensões da área monitorada. Consumo expresso em *joules*.

| Dimensões da Área Monitorada × Consumo Energético - Sensoriamento | | | | | | |
|---|---------------------|----------|-------------------------|----------|-----------------------|----------|
| Área Monitorada | RSSF M ² | σ | RSSF Visual Heterogênea | σ | RSSF Visual Homogênea | σ |
| 100 × 100 m ² | 121,247 | 4,218 | 314,744 | 0,2310 | 1236,945 | 30,740 |
| 120 × 120 m ² | 98,445 | 2,999 | 314,155 | 0,1763 | 1115,255 | 26,864 |
| 140 × 140 m ² | 83,222 | 2,598 | 313,814 | 0,1192 | 1044,830 | 17,050 |
| 160 × 160 m ² | 75,273 | 2,442 | 313,588 | 0,1146 | 976,146 | 17,293 |

Tabela B.23: Consumo de recursos energéticos, no serviço de sensoriamento, amortizado frente às variações nas dimensões da área monitorada. Consumo expresso em *joules*.

| Dimensões da Área Monitorada × Consumo Energético - Processamento | | | | | | |
|---|---------------------|----------|-------------------------|----------|-----------------------|----------|
| Área Monitorada | RSSF M ² | σ | RSSF Visual Heterogênea | σ | RSSF Visual Homogênea | σ |
| 100 × 100 m ² | 5,036 | 0,168 | 4,371 | 0,0250 | 297,621 | 7,396 |
| 120 × 120 m ² | 4,085 | 0,122 | 4,300 | 0,0206 | 268,341 | 6,464 |
| 140 × 140 m ² | 3,494 | 0,104 | 4,263 | 0,0127 | 251,396 | 4,102 |
| 160 × 160 m ² | 3,172 | 0,096 | 4,233 | 0,0125 | 234,870 | 4,161 |

Tabela B.24: Consumo de recursos energéticos, no serviço de processamento, amortizado frente às variações nas dimensões da área monitorada. Consumo expresso em *joules*.

| Dimensões da Área Monitorada × Atraso de Primeira Observação | | | | | | |
|--|---------------------|----------|-------------------------|----------|-----------------------|----------|
| Área Monitorada | RSSF M ² | σ | RSSF Visual Heterogênea | σ | RSSF Visual Homogênea | σ |
| 100 × 100 m ² | 21,761 | 6,131 | 144,117 | 62,2981 | 19,407 | 9,056 |
| 120 × 120 m ² | 21,575 | 6,542 | 200,075 | 82,8016 | 14,330 | 7,525 |
| 140 × 140 m ² | 29,649 | 8,222 | 192,787 | 108,7927 | 13,463 | 5,751 |
| 160 × 160 m ² | 25,560 | 7,963 | 122,078 | 27,2399 | 20,568 | 7,134 |

Tabela B.25: Atraso de primeira observação frente às variações nas dimensões da área monitorada. Atraso expresso em *segundos*.

| Dimensões da Área Monitorada × Latência | | | | | | |
|---|---------------------|----------|-------------------------|----------|-----------------------|----------|
| Área Monitorada | RSSF M ² | σ | RSSF Visual Heterogênea | σ | RSSF Visual Homogênea | σ |
| 100 × 100 m ² | 0,669 | 0,366 | 0,968 | 0,1705 | 0,634 | 0,286 |
| 120 × 120 m ² | 1,425 | 0,603 | 2,046 | 0,7963 | 0,846 | 0,352 |
| 140 × 140 m ² | 1,035 | 0,364 | 1,315 | 0,2755 | 0,860 | 0,381 |
| 160 × 160 m ² | 1,145 | 0,418 | 2,137 | 0,8327 | 0,782 | 0,271 |

Tabela B.26: Latência das RSSFs frente às variações nas dimensões da área monitorada. Latência expressa em *segundos*.

| Dimensões da Área Monitorada × Uso Efetivo dos Sensores Visuais | | | | | | |
|---|---------------------|----------|-------------------------|----------|-----------------------|----------|
| Área Monitorada | RSSF M ² | σ | RSSF Visual Heterogênea | σ | RSSF Visual Homogênea | σ |
| 100 × 100 m ² | 0,076 | 0,003 | 0,045 | 0,0058 | 0,018 | 0,000 |
| 120 × 120 m ² | 0,079 | 0,003 | 0,040 | 0,0045 | 0,016 | 0,000 |
| 140 × 140 m ² | 0,075 | 0,003 | 0,038 | 0,0026 | 0,015 | 0,000 |
| 160 × 160 m ² | 0,074 | 0,003 | 0,034 | 0,0029 | 0,013 | 0,000 |

Tabela B.27: Uso efetivo dos sensores visuais amortizado frente às variações nas dimensões da área monitorada.

Referências Bibliográficas

- [1] Anish Arora, Prabal Dutta, Sandip Bapat, Vinod Kulathumani, Hongwei Zhang, Vinayak Naik, Vineet Mittal, Hui Cao, Murat Demirbas, Mohamed G. Gouda, Young ri Choi, Ted Herman, Sandeep S. Kulkarni, Umamaheswaran Arumugam, Mikhail Nesterenko, Adnan Vora, and Mark Miyashita. A line in the sand: a wireless sensor network for target detection, classification, and tracking. *Computer Networks*, 46(5):605–634, 2004.
- [2] Helen P. Assunção, Linnyer B. Ruiz, and Antônio A. Loureiro. A service management approach for self-healing wireless sensor networks. *Autonomic Networking / Lecture Notes in Computer Science*, 4195:215 – 228, September 2006.
- [3] J. Boice, X. Lu, C. Margi, G. Stanek, G. Zhang, R. Manduchi, and K. Obraczka. Meerkats: A power-aware, self-managing wireless camera network for wide area monitoring. Technical Report ucsc-crl-05-04, Department of Computer Science, University of California, Santa Cruz, 2005.
- [4] Gary R. Bradski. Real time face and object tracking as a component of a perceptual user interface. In *Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV'98)*, pages 214–219, 1998.
- [5] YoungJoon Byun, Beverly A. Sanders, and Chang-Sup Keum. Design patterns of communicating extended finite state machines in sdl. In *8th Conference on Pattern Languages of Programs*, Monticello, Illinois, USA, September 2001.
- [6] Ed Callaway, Paul Gorday, Lance Hester, José A. Gutierrez, Marco Neave, Bob Heile, and Venkat Bahl. Home networking with ieee 802.15.4: A developing standard for low-rate wireless personal area networks. *IEEE Communication Magazine*, 40(8):70–77, August 2002.
- [7] Zhi-Yan Cao, Zheng-Zhou Ji, and Ming-Zeng Hu. An image sensor node for wireless sensor networks. In *International Conference on Information Technology: Coding and Computing (ITCC'05)*, volume 2, pages 740 – 745, April 2005.
- [8] Wu chi Feng, Brian Code, Ed Kaiser, Mike Shea, and Wu chang Feng. Panoptes: Scalable low-power video sensor networking technologies. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, 1(2):151 – 167, May 2005.

- [9] Nippon Ceramic Co. Infrared sensors. Available on the Web: <http://www.nicera.co.jp/>, Accessed: November de 2006.
- [10] Nippon Ceramic Co. Re200b datasheet - general purpose dual element sensor. Disponível na WWW: <http://www.nicera.co.jp/pro/ip/pdf/pdfip001.pdf>, Acessado: Setembro de 2006.
- [11] Dorin Comaniciu and Peter Meer. Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(5):603 – 609, May 2002.
- [12] Intel Corporation. Intel research. Disponível na WWW: <http://www.intel.com/research/>, Acessado: Novembro de 2006.
- [13] Intel Corporation. Open source computer vision library. Disponível na WWW: <http://opencvlibrary.sourceforge.net/>, Acessado: Novembro de 2006.
- [14] Brian P. Crow, Indra Widjaja, Jeong Geun Kim, and Prescott T. Sakai. Ieee 802.11 wireless local area networks. *IEEE Communications Magazine*, 35(9):116–126, September 1997.
- [15] Vilar Fiuza da Camara Neto. Calibração de fontes de luz pontuais baseada em sombras. Master’s thesis, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Junho 2005.
- [16] Arnaldo A. de Araújo and Sílvio Jamil F. Guimarães. Recuperação de informação visual com base no conteúdo em imagens e vídeos digitais. *Edição Especial em Computação Gráfica e Processamento de Imagens, Revista de Informática Teórica e Aplicada*, 7(2):43–72, 2000.
- [17] Rede Globo de Televisão. Alerta vermelho no iguaçu. Disponível na WWW: <http://globoporter.globo.com/>, Exibido: Abril de 2007.
- [18] Sebastiaan de Vlaam. Object tracking in a multi sensor network. Master’s thesis, Computer Engineering, Parallel and Distributed Systems, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, August 2004.
- [19] Ian Downes, Leili Baghaei Rad, and Hamid Aghajan. Development of a mote for wireless image sensor networks. In *COGNITIVE systems with Interactive Sensors (COGIS)*, March 2006.
- [20] Prabal Dutta, Mike Grimmer, Anish Arora, Steven Bibyk, and David Culler. Design of a wireless sensor network platform for detecting rare, random, and ephemeral events. In *Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks*, Los Angeles, California, 2005.

- [21] David Gay, Philip Levis, J. Robert von Behren, Matt Welsh, Eric A. Brewer, and David E. Culler. The nesc language: A holistic approach to networked embedded systems. In *ACM SIGPLAN 2003 Conference on Programming Language Design and Implementation*, pages 1 – 11, San Diego, California, USA, June 2003.
- [22] Eren Gürses and Özgür Akan. Multimedia communication in wireless sensor networks. *Annals of Telecommunications*, 60(7–8):799–827, July–August 2005.
- [23] Chao Gui and Prasant Mohapatra. Power conservation and quality of surveillance in target tracking sensor networks. In *International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 129–143, Philadelphia, Pennsylvania, USA, October 2004.
- [24] Tian He, Sudha Krishnamurthy, John A. Stankovic, Tarek Abdelzaher, Liqian Luo, Radu Stoleru, Ting Yan, Lin Gu, Jonathan Hui, and Bruce Krogh. Energy-efficient surveillance system using wireless sensor networks. In *2nd international conference on Mobile systems, applications, and services*, pages 270–283, Boston, MA, USA, 2004.
- [25] Stephan Hengstler and Hamid Aghajan. A smart camera mote architecture for distributed intelligent surveillance. In *ACM SenSys Workshop on Distributed Smart Cameras*, October 2006.
- [26] John L. Hennessy and David A. Patterson. *Computer Architecture: A Quantitative Approach*. Morgan Kaufmann, third edition, 2002.
- [27] Jason D. Hill and David E. Culler. Mica: a wireless platform for deeply embedded networks. *IEEE Micro*, 22(6):12 – 24, November/December 2002.
- [28] Weiming Hu, Tieniu Tan, Liang Wang, and Steve Maybank. A survey on visual surveillance of object motion and behaviors. *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, 34(3):334 – 352, August 2004.
- [29] Wen Hu, Van Nghia Tran, Nirupama Bulusu, Chun Tung Chou, Sanjay Jha, and Andrew Taylor. The design and evaluation of a hybrid sensor network for cane-toad monitoring. In *Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2005)*, pages 503–508, April 2005.
- [30] Crossbow Technology Inc. Mib510 serial interface board datasheet. Disponível na WWW: <http://www.xbow.com>, Acessado: Outubro de 2006.
- [31] Crossbow Technology Inc. Mica2 wireless measurement system datasheet. Disponível na WWW: <http://www.xbow.com>, Acessado: Outubro de 2006.
- [32] Crossbow Technology Inc. Micaz wireless measurement system datasheet. Disponível na WWW: <http://www.xbow.com>, Acessado: Outubro de 2006.
- [33] Crossbow Technology Inc. Stargate x-scale, processor plataforma datasheet. Disponível na WWW: <http://www.xbow.com>, Acessado: Outubro de 2006.

- [34] Crossbow Technology Inc. Wireless sensor networks. Disponível na WWW: <http://www.xbow.com>, Acessado: Setembro de 2005.
- [35] Free Software Foundation Inc. Gnu general public license. Disponível na WWW: <http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html>, Acessado: Janeiro de 2007.
- [36] Sun Microsystems Inc. Java technology. Disponível na WWW: <http://java.sun.com/>, Acessado: Dezembro de 2006.
- [37] Texas Instruments Inc. Analog technologies; semiconductors, digital signal processing. Disponível na WWW: <http://www.ti.com>, Acessado: Janeiro de 2007.
- [38] Texas Instruments Inc. Ina116 datasheet – ultra low input bias current instrumentation amplifier. Disponível na WWW: <http://http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ina116.pdf>, Acessado: Janeiro de 2007.
- [39] Ralph M. Kling. Intel mote: An enhanced sensor network node. In *Proceedings of the International Workshop on Advanced Sensors*, Keio, Japan, November 2003.
- [40] Purushottam Kulkarni, Deepak Ganesan, and Prashant Shenoy. The case for multi-tier camera sensor networks. In *Proceedings of the International Workshop on Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video*, pages 141 – 146, June 13 – 14 2005.
- [41] Purushottam Kulkarni, Deepak Ganesan, Prashant Shenoy, and Qifeng Lu. Senseye: A multi-tier camera sensor network. In *Proceedings of the ACM Multimedia*, Singapore, November 6 – 11 2005.
- [42] Philip Levis, Sam Madden, Joseph Polastre, Robert Szewczyk, Kamin Whitehouse, Alec Woo, David Gay, Jason Hill, Matt Welsh, Eric Brewer, and David Culler. *Ambient Intelligence*, volume II, chapter TinyOS: An Operating System for Sensor Networks, pages 115 – 148. Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [43] Carlos Eduardo R. Lopes, Júlio César e Melo, Helen P. de Assunção, Fabrício S. Aguiar, Thais R. M. Braga, Linnyer B. Ruiz, Antônio A. Loureiro, and José Marcos S. Nogueira. Mannasim: Simulando redes sensores sem fio. In *Salão de Ferramentas do XXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC2006)*, Curitiba, Brazil, Maio – Junho 2006.
- [44] Carlos Eduardo R. Lopes, Fernando D. Linhares, Michelle M. Santos, and Linnyer B. Ruiz. A multi-tier, multimodal wireless sensor network for environmental monitoring. *Lecture Notes in Computer Science, Ubiquitous Intelligence and Computing 2007*, 4611:589 – 598, July 2007.
- [45] Creative Technology Ltd. Webcam instant. Disponível na WWW: <http://www.creative.com/products/webcams/>, Acessado: Outubro de 2006.

- [46] COMedia Ltda. Semiconductor factory and design house. Available on the Web: <http://www.comedia.com.hk/>, Accessed: Janeiro de 2007.
- [47] COMedia Ltda. Kc778b datasheet – master pir control chip. Disponível na WWW: <http://http://www.robotstorehk.com/PIRController.pdf>, Acessado: Janeiro de 2007.
- [48] Dimitrios Lymberopoulos and Andreas Savvides. Xyz: a motion-enabled, power aware sensor node platform for distributed sensor network applications. In *Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks*, Los Angeles, California, 2005.
- [49] Alan Mainwaring, David Culler, Joseph Polastre, Robert Szewczyk, and John Anderson. Wireless sensor networks for habitat monitoring. In *ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, pages 88–97, Atlanta, Georgia, USA, 2002.
- [50] Ali Maleki-Tabar, Arezou Keshavarz, and Hamid Aghajan. Smart home care network using sensor fusion and distributed vision-based reasoning. In *ACM Multimedia Workshop On Video Surveillance and Sensor Networks (VSSN)*, pages 145–154, Santa Barbara, California, USA., October 2006.
- [51] Cíntia B. Margi, Roberto Manduchi, and Katia Obraczka. Consumption tradeoffs in visual sensor networks. In *XXIV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC2006)*, Curitiba, Brazil, Maio – Junho 2006.
- [52] Shinichi Masuda and Tetsuo Hattori. Flexibly configurable multivision remote monitoring system. In *Proceedings of the IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, volume 1, pages 301 – 304, 2004.
- [53] Katia Obraczka, Roberto Manduchi, and J.J. Garcia-Luna-Aveces. Managing the information flow in visual sensor networks. In *5th International Symposium Wireless Personal Multimedia Communicationson*, volume 3, pages 1177 – 1181, October 2002.
- [54] Emre Oto, Frances Lau, and Hamid Aghajan. Color-based multiple agent tracking for wireless sensor networks. In *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems (ACIVS'06)*, pages 299–310, Antwerp, Belgium, September 2006.
- [55] The VINT Project. The network simulator (ns-2). Disponível na WWW: <http://nslam.isi.edu/nslam/>, Acessado: Outubro de 2006.
- [56] Mohammad Rahimi, Rick Baer, Obimdinachi I. Iroezi, Juan C. Garcia, Jay Warrior, Deborah Estrin, and Mani Srivastava. Cyclops: in situ image sensing and interpretation in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems, SenSys '05*, pages 192–204, San Diego, California, USA, 2005.

- [57] Anthony Rowe, Charles Rosemberg, and Illah Nourbakhsh. A low cost embedded color vision system. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, volume 1, pages 208 – 213, September – October 2002.
- [58] Anthony Rowe, Charles Rosemberg, and Illah Nourbakhsh. A second generation low cost embedded color vision system. In *Embedded Computer Vision Workshop (CVPR)*, San Diego, USA, June 2005.
- [59] Linnyer Beatrys Ruiz. *MANNA: A Management Architecture for Wireless Sensor Network*. PhD thesis, Computer Science Department, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, December 2003.
- [60] Michelle Mendes Santos. Detecção e rastreamento de animais utilizando redes de sensores sem fio. Monografia do Projeto de Final de Curso apresentado junto ao Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Minas Gerais., Dezembro de 2006.
- [61] Thereza Christina Carvalho Santos and João Batista Drummond Câmara. *GEO Brasil 2002 – Perspectivas do Meio Ambiente no Brasil*. Edições IBAMA, 2002.
- [62] Stanislava Soro and Wendi Heinzelman. On the coverage problem in video-based wireless sensor networks. In *Second IEEE/CreateNet Workshop on Broadband Advanced Sensor Networks (BaseNets'05)*, Bostom, MA, USA, October 2005.
- [63] Roger T. Stevens. *Computer Graphics Dictionary*. Charles River Media, Inc., first edition, 2002.
- [64] Michael Swain and Dana Ballard. Color indexing. *International Journal of Computer Vision*, 7(1):11 – 32, November 1991.
- [65] Vlasios Tsiatsis, Ram Kumar, and Mani B. Srivastava. Computation hierarchy for in-network processing. *ACM Mobile Networks and Applications*, 10(4):505–518, January 2005.
- [66] Gregory K. Wallace. The jpeg still picture compression standard. *Communications of the ACM*, 34(4):30–44, April 1991.
- [67] Brett Warneke, Matt Last, Brian Liebowitz, and Kristofer S. J. Pister. Smart dust: Communicating with a cubic–millimeter computer. *IEEE Computer*, 34(1):44 – 51, 2001.
- [68] Zixiang Xiong, Angelos D. Liveris, and Samuel Cheng. Distributed source coding for sensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 21:80–94, September 2004.
- [69] Alan Cherem Zorkot, Helen Peters de Assunção, and Linnyer Beatriz Ruiz. Uma ferramenta para detecção de movimentos utilizando redes de sensores sem fio. In *Workshop de Computação de Aplicações (WCOMPA'06) / Seminário Integrado de Software e Hardware (SEMISH'06)*, Campo Grande, MS, Brasil, 2006.