

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE–UERN

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO–UFERSA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Edsongley Varela de Almeida

*Relacionamento cruzado entre camadas em redes de sensores
sem fio*

Mossoró

2010

Edsongley Varela de Almeida

*Relacionamento cruzado entre camadas em redes de sensores
sem fio*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Ciência da Computação da UERN–UFERSA,
como requisito parcial para a obtenção do grau de
MESTRE em Ciência da Computação.

Orientadores: Prof. Marcelo Sampaio de Alencar

Prof. Iguatemi Eduardo da Fonseca

Mossoró

2010

Ficha catalográfica preparada pelo setor de classificação e catalogação da Biblioteca “Orlando Teixeira” da UFERSA

A447r Almeida, Edsongley Varela de.

Relacionamento cruzado entre camadas em redes de sensores sem fio/ Edsongley Varela deAlmeida . – Mossoró, 2010. 73f.:il.

Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.

Orientador: Prof. PhD. Marcelo Sampaio de Alencar.

Co-orientador: Prof. PhD. Iguatemi Eduardo da Fonseca.

1.Redes de sensores sem fio. 2.Protocolos
cross-layer. 3.Protocolos de roteamento. I.Título.

CDD 004.67809

Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB15 120

Edsongley Varela de Almeida

*Relacionamento cruzado entre camadas em redes de sensores
sem fio*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Ciência da Computação da UERN–UFERSA,
como requisito parcial para a obtenção do grau de
MESTRE em Ciência da Computação.

Aprovado em 16 de Agosto de 2010

BANCA EXAMINADORA

Prof. Marcelo Sampaio de Alencar

Ph.D.

Prof. Iguatemi Eduardo da Fonseca

D.Sc.

Cláudia Maria Fernandes Araújo Ribeiro

D.Sc.

José Ewerton Pombo de Farias

D.Sc.

*Dedico este trabalho à minha filha, Beatriz, e
a minha esposa, Ivanice, e à todos os outros
integrantes de minha família.*

Agradecimentos

Primeiro de tudo agradeço a Deus pela graça concedida.

Agradeço também aos meus orientadores, Marcelo Sampaio e Iguatemi, pela paciência, pela força, pela ajuda, pelo companheirismo e por outras as qualidades que me ajudaram tanto a terminar este trabalho e pelas grandes lições ensinadas.

À minha família que tanto me dá sustento e motivos para prosseguir;

Agradeço aos amigos que conheci neste período de Mestrado. É uma coisa boa que carregarei pelo resto da vida. Em ordem alfabética, Alexandre(de novo), Alexsandra, Ceres, Carlos Evandro, Cassimiro, Diego, Luana, Luiz Carlos, Marssuel, Perla, Sebastião, Ticiania e Ulisses;

Ao meu amigo "Hermanoteu", que nos fizemos irmãos em Campina Grande. E a Alexsandra pela força que foi dada em Natal. Valeu mesmo. Obrigado mesmo. Me sinto orgulhoso por ser amigo de vocês;

A grande colega Welliana, que me ajudou bastante;

Aos professores do MCC e colaboradores(as) também;

E por último e não menos importante a cafeína das noites sonolentas.

Resumo

As redes de sensores sem fio usam protocolos de rede especializados, de maneira que os escassos recursos dos nós sejam utilizados eficientemente. Podem ser encontrados na literatura vários protocolos de comunicação destinados a redes de sensores sem fio.

Entre os protocolos sugeridos pela comunidade acadêmica encontram-se os protocolos com relacionamento entre camadas. Esses protocolos utilizam interações entre camadas não adjacentes para melhorar o desempenho da rede. Os novos relacionamentos envolvem tanto a implantação de funcionalidades de uma camada em outra, quanto o aproveitamento de informações. Para redes de sensores sem fio, o relacionamento cruzado entre as camadas de rede e de controle de acesso ao meio é considerado como um dos mais promissores.

Neste trabalho é proposto um protocolo que usa o relacionamento entre as camadas de controle de acesso ao meio, rede e aplicação tendo como base o protocolo de acesso múltiplo por divisão de tempo, porém dispondo de intervalos de tempo variáveis. Propõe-se a união das camadas de acesso ao meio e rede, e também o sincronismo com a camada de aplicação. O modelo é simulado com o OMNET++, tendo como métricas de avaliação o atraso e o consumo de energia nos nós.

Palavras chaves: Redes de sensores sem fio, relacionamento cruzado entre camadas, protocolos de rede, protocolos MAC.

Abstract

Wireless sensor networks require specialized protocols for an efficient use of the nodes' scarce resources. Communication protocols, designed for wireless sensor networks, can be found in the literature.

Cross-layer protocols, that use interactions between non-adjacent layers to improve the network performance, have been suggested by the academic community. The new relationships can be obtained by functionalities of one layer that are implemented in another or by the use of information from other layers. Cross-layer integrations between network and MAC are considered more successful for wireless sensor networks.

This dissertation proposes a cross-layer protocol that relates the network, medium access control and application layers using a variant of the time division multiple access protocol. A joint design of the medium access control and network layers is proposed, synchronized with the application layer. The model is simulated on the OMNET++ software, to evaluate the delay and energy consumed by the nodes.

keywords: Wireless Sensor networks, cross-layer, network protocols, MAC protocols.

Sumário

Lista de Figuras	8
Glossário	9
1 Introdução	11
1.1 Contextualização	11
1.2 Proposta de pesquisa	13
1.3 O objetivo do trabalho	14
1.4 Estrutura da dissertação	15
2 Redes de Sensores Sem Fio	16
2.1 Introdução	16
2.2 Arquitetura dos sensores	18
2.2.1 Arquitetura de <i>hardware</i>	18
2.2.2 Arquitetura de <i>software</i>	20
2.3 Aspectos gerais em redes de sensores sem fio	23
2.3.1 Conservação da Energia	23
2.3.2 O ciclo de trabalho dos nós e periodicidade	24
2.3.3 Distribuição e Controle de Topologia	25

3	Relacionamento cruzado entre camadas e trabalhos relacionados	27
3.1	Trabalhos relacionados	28
3.2	Notas sobre relacionamento cruzado entre camadas	32
4	Protocolo com relacionamento cruzado entre camadas	34
4.1	Causas de desperdício de energia	34
4.2	Causas do atraso em redes de sensores sem fio	39
4.3	Implementação	40
4.3.1	Máquina de estados do nó usado como referência	41
4.3.2	Topologia usada como referência	41
4.3.3	Arquitetura de rede: camadas MAC e rede	43
4.3.4	Arquitetura de rede: relacionamentos com a camada de aplicação	45
4.3.5	Algoritmo para alocação de intervalos de tempo	46
4.3.6	Estados do protocolo	48
5	Simulações	52
5.1	Benefícios do efeito entre camadas sobre o atraso	52
5.2	Análise da escalabilidade	54
5.3	Benefícios do efeito entre camadas sobre o consumo de energia	55
5.4	Variando a Periodicidade	57
5.5	Variando o valor de d	58

6	Conclusões e trabalhos futuros	60
	Referências Bibliográficas	62
A	O Simulador OMNET++ e o módulo para mobilidade	67
A.1	Descrição	67
A.1.1	Estrutura do OMNeT++	68
A.1.2	A linguagem NED	69
A.1.3	O módulo para mobilidade	71
A.2	Conceitos básicos	72
B	Publicações e trabalhos realizadas durante o curso	73

Lista de Figuras

1.1	Arquitetura tradicional [Jurdak 2007]	12
2.1	Arquitetura de <i>hardware</i> do nó(Adaptada de [Karl e Willig 2005]).	19
2.2	Sensor de gases, luminosidade e pressão (retirada de [Libelium Comunicações Distribuidas S.L. 2010]).	20
2.3	Sensor de vibração e temperatura (retirada de [Oceana Sensor 2010]).	20
3.1	Cenário de rede adaptado de [Ruzzelli, O'Hare e Jurdak 2008].	29
3.2	Cenário de rede adaptado de [Van Hoesel, Nieberg e Havinga 2004].	30
3.3	Cenário de rede adaptado de [Cui 2005].	30
3.4	Cenário de rede adaptado de [Sichitiu 2004].	31
4.1	Energia economizada e desperdiçada em transições de estado dos nós [Karl e Willig 2005].	35
4.2	Comparação entre ciclos de trabalho da aplicação e ciclos de trabalhos das camadas de MAC e rede.	36
4.3	Tarefas de aplicação sincronizadas com as de rede e MAC.	37
4.4	Compartilhamento de informação entre a aplicação e as camadas de rede e MAC.	38

4.5	Descoberta de vizinhos.	39
4.6	Controle de Topologia.	39
4.7	Alocação de intervalos de tempo.	39
4.8	Máquina de estados do nó.	42
4.9	Topologia de rede.	42
4.10	A topologia <i>String</i>	43
4.11	Cenário das ligações entre os nós S-3-9-20.	45
4.12	Cenário de alocação de intervalos de tempo entre os nós S-3-9-20.	48
4.13	Estados do protocolo.	50
4.14	Tópicos relacionados ao cálculo de d e alocação de intervalos de tempo. . .	51
5.1	Atraso em uma rede de 6 saltos sem interação entre camadas.	53
5.2	Atraso em uma rede de 6 saltos com interação entre camadas.	53
5.3	Comparação do atraso médio entre as técnicas.	55
5.4	Comparação do atraso das mensagens dos nós mais distantes do sorvedouro. .	56
5.5	Gasto médio de energia dos nós.	56
5.6	Evolução do atraso variando a periodicidade.	57
5.7	Número máximo de nós variando o valor de d	58
5.8	Gasto médio de energia dos nós variando o valor de d	59
5.9	Atraso médio variando o valor de d	59

Glossário

B-MAC: Protocolo de acesso ao meio versátil e de baixo consumo para redes de sensores sem fio, mais conhecido por *Berkeley MAC* , 29

MAC: *Medium Access Control*—Controle de acesso ao meio, 11

MEMS: *Micro Electro-Mechanical Systems* – Sistemas microeletrico-mecânicos, 15

MIPS: Milhões de instruções por segundo, 22

OPER: Protocolo de roteamento sob demanda e eficiente no uso de energia, 29

QoI: *Quality of Information*—Qualidade da informação, 37

QoS: *Quality of Service*—Qualidade de serviço, 11

RSSF: Rede de sensores sem fio, 14

RX: Recepção de dados, 20

TDMA: *Time Division Multiple Access*—Acesso múltiplo por divisão de tempo, 11

TX: Transmissão de dados, 20

1 Introdução

As redes de sensores sem fios têm pequenos dispositivos dotados de capacidades de sensoriamento e um transmissor de curto alcance, para obter dados sobre o ambiente, que colaboram entre si utilizando a comunicação multi-salto [Santi 2006]. Elas têm sido utilizadas de várias maneiras para monitorar regiões ou locais onde a atuação humana é indesejável ou inviável.

No entanto, as redes de sensores sem fio têm uma peculiaridade que as fazem diferentes das outras redes. Seus integrantes, chamados nós, possuem recursos limitados em energia, pois usam baterias pequenas, em memória e em processamento. Outras limitações podem ocorrer, o que atrai a atenção de muitos pesquisadores que estudam como otimizar vários aspectos dessas redes.

1.1 Contextualização

Um dos assuntos abordados para as redes de sensores sem fio é a criação ou aperfeiçoamento de protocolos que minimizem a utilização dos recursos, visto que não é adequado a utilização dos protocolos tradicionais para essas redes [Cordeiro e Agrawal 2006], tornando-se um assunto de grande interesse. Grande parte da pesquisa concentra-se em utilizar a natureza colaborativa e as características de correlação das redes de sensores sem fio [Melodia, Vuran e Pompili 2006].

Contudo, parte dos protocolos propostos para diminuir o consumo de energia

nos nós em redes de sensores sem fio baseia-se na tradicional arquitetura de protocolos em camadas. Enquanto, a arquitetura em camadas pode conseguir alto desempenho nos termos de métricas individuais de cada camada, ela não é otimizada para aumentar o desempenho da rede e usar eficientemente os escassos recursos de energia e taxa de transferência dos nós sensores [Melodia, Vuran e Pompili 2006]. A Figura 1.1 mostra a arquitetura tradicional em camadas.

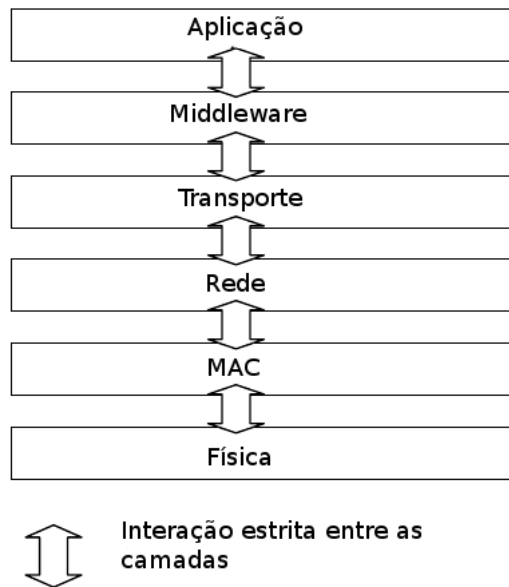


Figura 1.1: Arquitetura tradicional [Jurdak 2007]

A motivação para o desenvolvimento de protocolos de rede que aproveitem a interação entre camadas, chamada *cross-layer design*¹, além dos limitados recursos, é o *overhead*² da arquitetura em camadas que resulta em ineficiência, no requisito consumo energético. Outro fator impulsionador para o desenvolvimento de protocolos com relacionamento cruzado é a abordagem orientada a eventos das redes de sensores sem fio.

¹Neste texto é usado o termo Relacionamento Cruzado entre Camadas em vez do termo em inglês *cross-layer*

²ineficiência causada pela sobreposição das camadas no uso de cabeçalhos em cada uma delas (encapsulamento)

Além disso, estudos empíricos apontam que as propriedades do canal devem ser consideradas no desenvolvimento de protocolos [Melodia, Vuran e Pompili 2006].

A pesquisa em arquiteturas e protocolos que usa relacionamento cruzado entre camadas para redes de sensores sem fio envolvendo a camada MAC e rede tem conseguido bons resultados. No entanto, deve-se observar que:

- Tem sido a um custo de alta complexidade;
- Geralmente não se aborda especificamente fatores como QoS, balanceamento de carga, e outros requisitos desejáveis da camada de rede;
- Apresenta problemas de escalabilidade.

1.2 Proposta de pesquisa

Este trabalho apresenta um protocolo de roteamento utilizando um esquema de acesso múltiplo TDMA (Time Division Multiple Access), com intervalos de tempo³ com tamanhos variáveis, em que a informação de roteamento é adquirida pelo próprio protocolo MAC. Especificamente, propõe-se que seja utilizado o tamanho do intervalo de tempo do TDMA como custo de rotas entre nós sensores. Esse esquema pode ser justificado a partir de uma observação válida para redes de sensores sem fio: os nós próximos ao sorvedouro tendem a encaminhar mais pacotes, por isso, necessitam oferecer intervalos de tempo maiores para que os nós mais distantes possam transmitir todas suas informações. Além disso, necessitam estar por um maior período de tempo aptos a realizar

³Neste texto utilizaremos a expressão intervalos de tempo, ou somente intervalo, em vez do termo inglês *slot*

comunicações [Wu, Chen e Das 2008].

Dentre as vantagens desta proposta pode-se citar a direta aquisição de rotas à partir da aquisição de nós vizinhos, ficando desnecessário a troca de mensagens na camada de rede para descoberta de rota.

Este trabalho apresenta o problema da alocação de intervalos de tempo não somente no intuito de auxiliar na decisão de roteamento mas também para ponderar o algoritmo de roteamento, como meio para reduzir o consumo de energia e reduzir o atraso⁴. O problema do comprimento ótimo de cada enlace entre os nós foi analisado previamente [Cui 2005, Cui et al. 2005].

1.3 O objetivo do trabalho

O objetivo principal do trabalho é o desenvolvimento de um protocolo com relacionamento cruzado entre camadas com o objetivo de reduzir o atraso das informações e o consumo de energia nos nós em redes de sensores sem fio.

Alguns temas relacionados as camadas estudadas não foram abordados, mas podem ser estudados em outros trabalhos. Entre eles pode-se citar: modulação adaptativa, aplicações e suas periodicidades ou ainda, balanceamento de carga, outras métricas de QoS além do atraso.

⁴Neste texto o termo *delay* e suas variações serão substituídos por atraso

1.4 Estrutura da dissertação

O restante deste trabalho está organizado como a seguir. No Capítulo 2 é feita uma introdução às redes de sensores sem fio, mostrando seus aspectos básicos. O Capítulo 3 aborda os protocolos com relacionamento cruzado entre camadas e uma revisão bibliográfica dos assuntos correlacionados com este trabalho. No Capítulo 4 é apresentado o protocolo proposto e métricas utilizadas para avaliar o protocolo. O Capítulo 5 mostra o resultado da análise das simulações realizadas usando o simulador OMNeT++. O Capítulo 6 apresenta conclusões sobre o trabalho e indica possíveis trabalhos futuros. O Anexo A mostra o funcionamento do simulador OMNeT++ e do módulo para mobilidade. Finalizando a dissertação, o Anexo B mostra os artigos e trabalhos realizados durante o curso.

2 Redes de Sensores Sem Fio

Este capítulo introduz o conceito de redes de sensores sem fio, apresentando apenas aspectos relevantes ao trabalho. Para uma pesquisa completa é aconselhada a leitura da referência Karl e Willig (2005).

2.1 Introdução

O processamento de informação geralmente é associado à operação em larga escala, em dispositivos de uso genérico, de grandes computadores a dispositivos portáteis. Em muitas aplicações, esses dispositivos são utilizados para processar informações de um usuário do sistema, na melhor das hipóteses indiretamente relacionadas ao ambiente. Em uma outra classe de aplicações o ambiente físico é o foco da atenção, e a interação humana não é fundamental [Karl e Willig 2005].

Dentre as formas mais comuns de interação de um sistema computacional com o ambiente, figuram os sistemas de monitoração, em que a informação sobre uma propriedade do ambiente é observada e armazenada para posterior análise ou para tomada de ação por sistemas de controle.

Nessa classe de aplicações estão as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), que consistem de nós (uma unidade computacional independente) individuais capazes de interagir com o ambiente, e que medem quantidades físicas, como pressão, temperatura, entre outras, ou seja, possuem capacidade de sensoramento.

Além disso, os nós precisam colaborar uns com os outros para realizar suas tarefas, visto que um só nó não seria capaz de abranger uma larga área [Karl e Willig 2005]. Com isso, surge a necessidade de comunicação. No entanto, essa comunicação geralmente se dá por meio sem fio (*wireless*), pois nem sempre é possível espalhar cabos pelo ambiente a ser estudado.

As RSSFs representam um novo paradigma de monitoração com muitas aplicações em potencial. Formadas tipicamente por unidades, dezenas, centenas ou até milhares de nós sensores [Araújo 2008], elas chamam a atenção devido a sua flexibilidade e variedade de cenários que podem ser aplicadas, de sensores no corpo humano até monitoramento de animais.

Uma das aplicações mais conhecidas das RSSFs é a de monitoramento florestal, em que geralmente os parâmetros obtidos do ambiente são a temperatura e a umidade. As informações captadas podem ser usadas, por exemplo, para prevenção de incêndios florestais, desta maneira desempenhando importante papel ecológico. Outras aplicações serão expostas ao longo do texto.

Entre outros fatores que auxiliaram a proliferação das RSSFs foi o avanço ocorrido nas áreas de microprocessadores, desenvolvimento de novos materiais de sensoriamento, microssistemas eletro-mecânicos (MEMS – *Micro Electro-Mechanical Systems*) e comunicação sem fio que permitiram a criação de sensores de baixo custo, baixo consumo e multifuncionais; de tamanho cada vez menor e que permitem a comunicação em distâncias curtas. As projeções feitas pela indústria eletrônica é de que esses dispositivos custem no máximo US\$ 1 (um dólar estadunidense) [Teixeira 2005] e tamanhos milimétricos.

Outros exemplos de aplicações citadas são: prédios inteligentes, rodovias in-

teligentes, agricultura de precisão, detecção de veículos e animais em ambientes, rastreamento de animais e objetos. O trabalho de Loureiro et al. (2003) cita outros exemplos de aplicações.

2.2 Arquitetura dos sensores

A aplicação e os dados são a parte mais importante na construção de uma RSSF. Os nós são projetados para servirem ao propósito de prover informação. Porém, é necessário conhecer a arquitetura do nó para entender como as RSSFs desempenham suas funções.

2.2.1 Arquitetura de *hardware*

Os componentes básicos que podem ser encontrados em um nó são mostrados na Figura 2.1, sendo que:

- Dispositivo de comunicação — também chamado de transceptor ou transceiver é responsável pelo meio de comunicação com os outros nós;
- Memória — para armazenar dados;
- Processador — dispositivo capaz de interpretar instruções de baixo nível;
- Sensor — dispositivo pelo qual é possível obter dados sobre o ambiente;
- Bateria — item que fornece energia necessária para o funcionamento do nó.

Este trabalho não descreve detalhadamente estes itens, apenas menciona como estes afetam a vida útil de um nó. Karl e Willig (2005) descrevem esses itens com informações mais detalhadas.

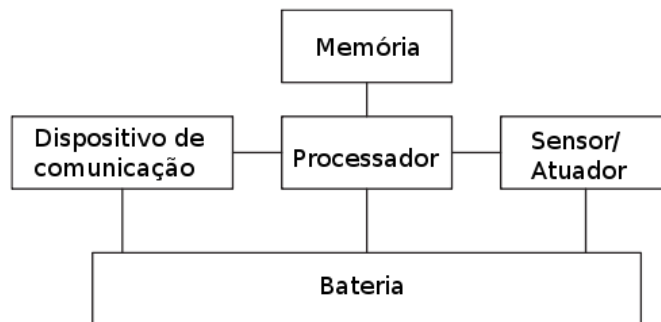


Figura 2.1: Arquitetura de *hardware* do nó(Adaptada de [Karl e Willig 2005]).

Geralmente considera-se que a vida útil de um nó é o tempo duração de sua bateria, visto que nem sempre é possível recarregá-las. Portanto, é necessário que os outros itens de *hardware* do nó façam uso adequado dessa fonte de energia. Nota-se que os maiores consumidores de energia do nó são o dispositivo de comunicação e o processador.

Apesar de todo avanço na produção de dispositivos com taxas de consumo menores, os nós não podem passar o tempo todo ligados. E também, não precisam estar ligados o tempo todo [Karl e Willig 2005] sendo melhor colocá-los em um estado de menor consumo e somente voltar quando necessário.

Por isso, define-se que os possíveis estados em que podemos encontrar um nó em uma RSSF são:

- Ativo — No estado ativo o nó está ligado e executa tarefas diversas sejam tarefas relacionadas a operações de rede ou da aplicação. Nesse estado quase todos os circuitos estão ligados. O nó não deve permanecer por tempo prolongado nesse estado pois trata-se do estado de maior consumo de energia, no entanto não pode ser evitado pois é também nele que o nó realiza as suas funções primordiais. Então, o nó deve de tempos em tempos mudar para um estado de menor consumo.

- **Dormência** — Todos os nós devem permanecer neste estado a maior parte do tempo, pois representa o estado em que a energia é conservada. Nesse estado apenas os circuitos mais elementares estão ligados, e, portanto, o nó não pode ser usado pela rede ou executar tarefas de aplicação;
- **Inativo** — Estado em que o nó tem toda sua energia gasta e não mais pode ser aproveitado devendo ser substituído ou descartado. Por se tratar de um estado em que o nó se torna inutilizado.

As Figuras 2.2 e 2.3 mostram exemplos de *hardware* para sensores.



Figura 2.2: Sensor de gases, luminosidade e pressão (retirada de [Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L. 2010]).

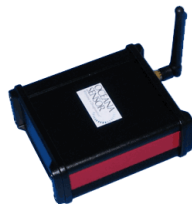


Figura 2.3: Sensor de vibração e temperatura (retirada de [Oceana Sensor 2010]).

2.2.2 Arquitetura de *software*

Entre os componentes de *software*, destacam-se a aplicação e a pilha de protocolos de rede. Esses dois componentes são responsáveis por realizar operações de captura e transporte dos dados.

A camada de aplicação

A aplicação é a camada que realiza operações nos dados para que desses possam se deduzir alguma informação. As operações envolvidas nessa camada são dependentes do ambiente estudado. Por exemplo, decidir que variação de temperatura deve ser reportada, entre outros exemplos. No entanto, descrever as aplicações e seus tipos está fora do escopo deste trabalho, sendo importante apenas os estados da aplicação, que são fases distintas do ciclo de execução da aplicação. Os principais estados da aplicação são:

- Ler dados do sensor — nesta tarefa a aplicação efetua atividades para coleta de informações do meio ambiente;
- Agregar dados — esta tarefa é considerada opcional e é usada para compor informações tendo como base um grupo maior de informações. A agregação pode economizar energia e otimizar a carga da rede [Matos, Brayner e Maia 2008];
- Transmitir dados — Transmitir os dados lidos ou agregados para que as camadas mais baixas remetam as informações aos destinatários.

Ruiz et al. (2004) classifica as aplicações de acordo com a configuração, ou seja, com o modo como é feita a coleta das informações do meio físico:

- Periódica — Os nós coletam dados sobre os fenômenos em intervalos regulares;
- Reativa — Os nós sensores coletam dados quando ocorrem eventos de interesse ou quando solicitado pelo operador;
- Contínua — Os nós sensores coletam dados continuamente;

- Tempo Real — Os nós sensores coletam a maior quantidade de informações possível no menor intervalo de tempo.

O detalhe a ser observado é que essas tarefas, ou estados da aplicação, somente podem ser realizadas quando o nó estiver em estado Ativo. Sendo assim, a aplicação e o modo como as informações são obtidas definem o comportamento da rede. Como será visto a seguir, esta importante característica é levada em consideração na elaboração dos protocolos propostos nesta dissertação.

Protocolos de rede

Os protocolos de rede distribuem os dados obtidos, ou seja, realizam o trabalho de comunicação entre os nós. Geralmente, divide-se os protocolos em camadas, como na Figura 1.1, sendo que se representa essas tarefas como pertencentes a qualquer camada de rede. As tarefas de rede são:

- TX — Quando o nó está transmitindo alguma informação;
- RX — Quando o nó está recebendo alguma informação;
- Dormência – Quando não há tarefas a serem executadas.

É importante notar que as tarefas de aplicação e de rede somente podem ser executadas enquanto o nó está no estado Ativo. Sendo assim, torna-se importante realizar todas as tarefas de forma sincronizada evitando assim desperdício de energia. Note também que os estados TX e RX são consumidores de energia, portanto deve-se diminuir a quantidade de informações que trafega pela rede.

Diz-se que as camadas MAC e rede em RSSFs têm um relacionamento próximo, uma depende da outra para se tornar eficiente [Barrett, Marathe e Drozda 2002]. Com a variedade de topologias, usos e formas de instalação, não há uma combinação e um protocolo MAC com um protocolo de roteamento que se torne melhor em todos os cenários. Por isso, não há como imaginar esses protocolos como duas camadas independentes. Então, o desempenho da rede pode ser melhorado com o desenvolvimento conjunto dessas duas camadas [Barrett, Marathe e Drozda 2002].

2.3 Aspectos gerais em redes de sensores sem fio

Esta seção aborda assuntos que apesar de não serem o foco do trabalho, afetam diretamente a proposta e seus objetivos.

2.3.1 Conservação da Energia

O mais importante dos desafios em redes de sensores sem fio é a conservação da energia. Devido a razões como o tamanho reduzido dos sensores e limitações impostas pelas aplicações como impossibilidade de acesso do homem, mobilidade, meio físico no qual estão inseridos, ou ainda, métodos de implantação, não é possível acoplar nesses dispositivos uma fonte de energia cabeada ou de longa duração. Por isso, esses nós têm uma quantidade de energia limitada, que geralmente é fornecida por baterias. Embora hajam avanços tecnológicos no desenvolvimento de baterias com maior duração, esse avanço não está sendo ao mesmo ritmo dos microprocessadores. A ênfase dos projetos dos microprocessadores está sendo dada ao desenvolvimento de dispositivos com maior capacidade. Por isso, o consumo de energia e potência estão se tornando restrições importantes e estão

sendo estudadas em vários níveis, desde da arquitetura do hardware, até os protocolos e algoritmos [Teixeira 2005]. O consumo de energia pode ser dividido em três domínios: sensoriamento, comunicação e processamento dos dados. A unidade de sensoriamento e seus componentes dependem da complexidade da detecção do evento. Aumentos nos níveis de ruído ambiente podem elevar a complexidade de detecção. A energia gasta para o processamento dos dados é muito menor que a energia necessária para a comunicação. Considerando uma interferência tipo Rayleigh e uma perda de potência elevada a quarta potência com relação à distância, o custo em energia para se transmitir 1kB por uma distância de 100m é aproximadamente o mesmo que executar 3 milhões de instruções em um processador com capacidade de processamento de 100 MIPS/W. Dessa forma, o processamento local e distribuído, em vez de centralizado, é crucial para minimizar o consumo de potência em uma rede de sensores com múltiplos saltos [Teixeira 2005, Karl e Willig 2005].

2.3.2 O ciclo de trabalho dos nós e periodicidade

Neste ponto é importante apresentar os conceitos de:

- Periodicidade — Refere-se ao intervalo de tempo entre dois períodos de leitura.
Exemplo: em aplicações de monitoramento ambiental a periodicidade varia de 5 minutos a 1 dia;
- Ciclo de trabalho — É o período de tempo em que o nó permanece no estado Ativo.
Exemplo: o tempo em que o nó está lendo dados do sensor.

Como citado na Subseção 2.2.2 as camadas de rede possuem o ciclo de trabalho. Porém, em geral a leitura de dados necessita por conseguinte de alguma atividade dos proto-

colos abaixo da aplicação. Observa-se então que a aplicação influencia diretamente nas atividades das outras camadas e por conseguinte no consumo de energia do nó.

2.3.3 Distribuição e Controle de Topologia

De acordo com o tipo de fenômeno a ser estudado e com a topologia do local onde a rede será implantada, pode-se classificar as redes de sensores sem fio conforme como os nós poderão estar distribuídos:

- Regular — A rede apresenta distribuição uniforme na área monitorada. Geralmente esse tipo de distribuição é conseguido com a implantação manual dos nós. Em alguns casos a agricultura de precisão apresenta esse tipo de distribuição;
- Irregular — A distribuição dos nós apresenta espaçamentos aleatórios. Em alguns casos os nós são simplesmente jogados por helicópteros sobre a área [Ruiz et al. 2004].

Levando em conta o método de distribuição dessas redes, percebe-se que podem existir diferentes densidades de nós, e que nas distribuições irregulares a densidade pode variar para regiões distintas.

Dependendo da densidade e do alcance do radio transmissor utilizado nos sensores, a densidade dos nós irá influenciar a eficiência dos protocolos MAC e de roteamento e também no consumo de energia. Pois, com muitos nós ao alcance, o protocolo MAC deverá coordenar mais nós competindo pelo meio de transmissão.

O protocolo de roteamento, por sua vez, terá mais nós vizinhos e maior será a tabela de roteamento de cada nó. Nesse caso, se um determinado nó possui muitos outros

nós vizinhos a distâncias distintas, este nó pode reduzir sua potência de transmissão e assim reduzir o número de nós vizinhos. A esse algoritmo é dado o nome de controle de topologia [Santi 2006].

3 Relacionamento cruzado entre camadas e trabalhos relacionados

A tradicional arquitetura em camadas é reconhecida por separar as tarefas de comunicação em várias camadas, usando uma clara divisão de funcionalidades para cada uma. Essas camadas são unidas usando interfaces bem definidas, que ligam apenas camadas vizinhas. Analisando a Figura 1.1, que mostra o modelo da arquitetura tradicional, pode-se ver que essa arquitetura não contempla relacionamentos diretos entre camadas não adjacentes [Mahalik 2007].

Com o advento das tecnologias sem fio esse paradigma mostrou-se ineficiente pois a utilização desse meio físico para comunicações trouxe novos modelos de comunicações e também novos problemas a serem resolvidos. No tocante a redes de sensores sem fio, a ineficiência é mais perceptível, já que a arquitetura tradicional não tem a economia de energia como uma das metas principais.

Para suprir essas deficiências, muitos autores sugerem uma nova organização desse modelo em camadas para permitir que camadas não adjacentes possam trocar informações. Essa nova organização é chamada de modelo com relacionamento cruzado entre camadas [Srivastava 2005].

Existem vários documentos abordando relacionamentos com diversas camadas e sub-camadas, tais como: as camadas de rede e física, MAC e física, transporte e física, transporte e rede, controle de topologia e gerenciamento de energia, etc. No entanto,

foge ao escopo deste documento descrevê-las em profundidade. Essas e outras abordagens podem ser encontradas nas referências [Mahalik 2007, Melodia, Vuran e Pompili 2006, Jurdak 2007, Zuniga e Krishnamachari 2004]. Neste documento, serão abordados apenas os trabalhos que envolvem as camadas de rede e MAC, por serem relacionados à proposta.

3.1 Trabalhos relacionados

Pode-se encontrar na literatura uma abordagem que utiliza um esquema baseado em um sistema TDMA, em que os intervalos de tempo são dinamicamente associados em regiões circulares, chamadas de *time zones*, conforme a proximidade do nó sorvedouro. Então, a organização dos intervalos de tempo é usada pelo algoritmo de roteamento para definição do próximo salto e até mesmo para planejar transferência e recepção de pacotes, a fim de diminuir os efeitos da interferência entre nós [Ruzzelli, O'Hare e Jurdak 2008]. Um exemplo do cenário de rede estudado é mostrado na Figura 3.1.

Nesta abordagem verifica-se que definição das *time zones* facilita a configuração de rotas e também otimiza o ciclo de trabalho dos nós que estão na mesma *time zone*. No entanto, nessa proposta observa-se a impossibilidade de um nó atuar como roteador de outros nós sem que haja competição pelo meio, ou seja, para que dois ou mais nós pertencentes à *time zone* $N + 1$ possam usar um outro nó na *time zone* N é necessário que estes entrem em competição para enviar dados.

Há uma outra arquitetura para o TDMA que se relaciona com o protocolo de roteamento. Nessa arquitetura, o problema da alocação dos intervalos de tempo pelos nós sensores é estudado em conjunto com o algoritmo de roteamento e o ciclo de trabalho dos nós para diminuir a interferência entre nós e para que nós que pertencem ao cam-

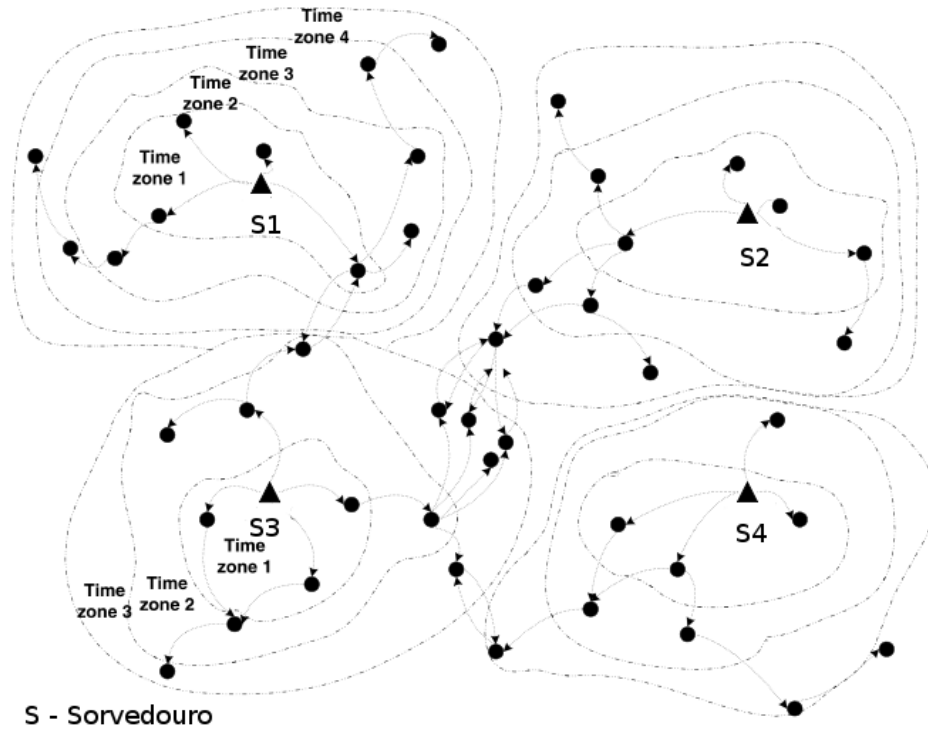


Figura 3.1: Cenário de rede adaptado de [Ruzzelli, O'Hare e Jurdak 2008].

inho traçado pelas rotas tenham o ciclo de trabalho sincronizado com o algoritmo [Van Hoesel, Nieberg e Havinga 2004]. As simulações numéricas mostram que essa arquitetura consegue resultados expressivos comparados com abordagens tradicionais. O cenário de rede estudado é mostrado na Figura 3.2.

O algoritmo desenvolvido por Van Hoesel, Nieberg e Havinga (2004) consegue resolver o problema da alocação dos intervalos de tempo de forma eficiente evitando que dois nós vizinhos assumam o mesmo intervalo de tempo. Com isso, esse algoritmo usa o reuso espacial dos intervalos de tempo. Contudo, com a atribuição aleatória de intervalos de tempo não otimiza o ciclo de trabalho dos nós.

Estudos envolvendo não somente as camadas MAC e de rede, mas também as camadas de enlace, física, estratégia de modulação e o consumo de energia dos circuitos podem ser encontrados em [Cui 2005, Madan et al. 2005, Cui et al. 2005]. Esses estu-

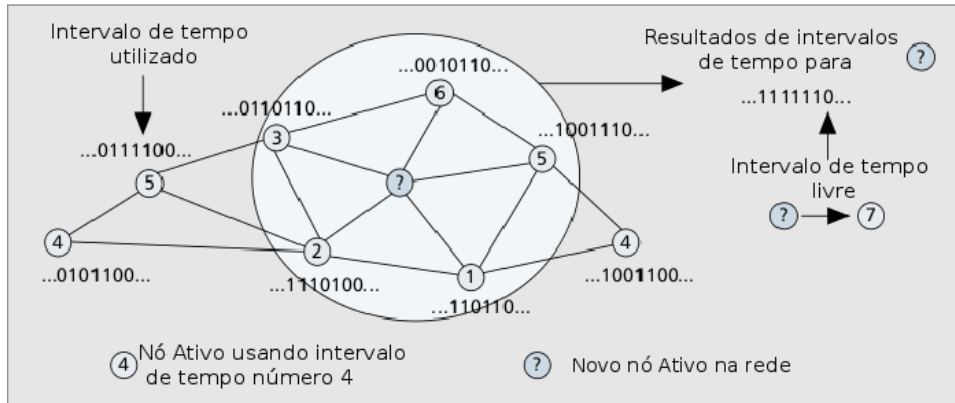


Figura 3.2: Cenário de rede adaptado de [Van Hoesel, Nieberg e Havinga 2004].

dos utilizam novamente um esquema de acesso múltiplo TDMA com os tamanhos dos intervalos de tempo variáveis em conjunto com o protocolo de roteamento. A alocação e o cálculo do tamanho dos intervalos de tempo são feitas para que se tenha o tamanho considerado ótimo. O cenário de rede estudado é exemplificado na Figura 3.3.

A análise das camadas de enlace e física feitas por Cui (2005) demonstrou que é possível calcular tamanho do intervalo de tempo considerado ótimo e que nem sempre a comunicação multi-salto é a mais eficiente. No entanto, é dito que esse problema é não-linear e sua complexidade é $O(n^3)$ e o número de variáveis cresce com $O(v^2)$, em que v é o número de nós vizinhos e, além disso, limita-se o tamanho da rede para poucos nós [Cui 2005, Madan et al. 2005, Cui et al. 2005].

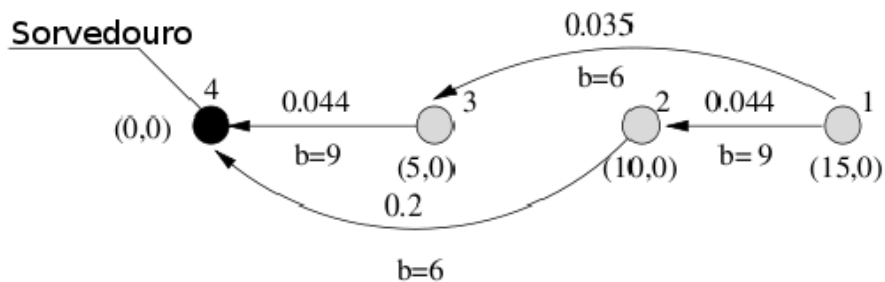


Figura 3.3: Cenário de rede adaptado de [Cui 2005].

Em outro estudo é desenvolvida uma abordagem envolvendo as camadas MAC e rede com base no protocolo IEEE 802.11. Apesar de usar como modelo o protocolo MAC IEEE 802.11, que é considerado um protocolo de acesso ao meio por contenção, essa abordagem cria escalonamentos entre os nós para os períodos de transmissão e recepção de dados. Resultados obtidos por simulações mostram que o consumo de energia e o atraso podem ser significativamente reduzidos comparados com o protocolo tradicional. O esquema é mostrado na Figura 3.4.

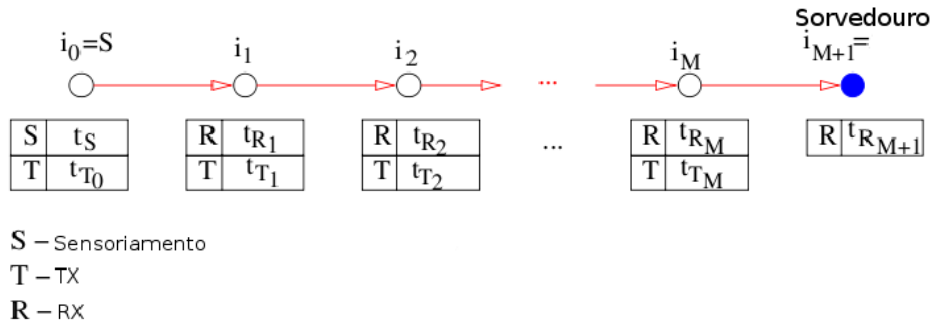


Figura 3.4: Cenário de rede adaptado de [Sichitiu 2004].

Também há outra importante contribuição envolvendo as camadas MAC, rede e aplicação, em que os autores usam uma variante do protocolo B-MAC (*Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks*) junto com o OPER (*On-Demand power-efficient Routing protocol*). Como resultado os autores demonstram que puderam reduzir o atraso e o consumo de energia, chegando a até eliminar alguns tipos de mensagens [Souto, Aschoff e Kelner 2007].

Os autores Souto, Aschoff e Kelner (2007) mostram que pode-se fazer o relacionamento cruzado da camada de aplicação com as outras camadas. Todavia, os autores baseiam-se em um protocolo de acesso ao meio por contenção e não mencionam o atraso como métrica e o ciclo de trabalho dos nós.

Wu, Luo e Xue (2006) propõem um esquema com relacionamento cruzado entre camadas para o problema da sincronização dos nós sensores. É proposto pelos autores a separação das atividades dos nós em fases e que em cada fase apenas uma camada deveria realizar tarefas. Também é proposto um algoritmo distribuído para a sincronização dos relógios dos nós. Por intermédio de simulações numéricas é mostrado que essa abordagem chega a economizar mais de 50% da energia dos nós [Wu, Luo e Xue 2006].

No entanto, Wu, Luo e Xue (2006) não abordam como os protocolos devem ser integrados e assuntos como o efeito do controle de topologia afetaria essa abordagem.

3.2 Notas sobre relacionamento cruzado entre camadas

Apesar de existirem vários trabalhos usando relacionamento cruzado entre camadas, é possível identificar alguns fatores que justificam, ou não, o uso desses protocolos. Dentre as quais pode-se citar vantagens e desvantagens:

A vantagem citada por diversos autores, e que justifica a utilização de protocolos com relacionamento cruzado entre camadas, é a melhoria no desempenho ao analisar determinadas métricas, como por exemplo o atraso médio.

Outras vantagens mencionadas são:

- A definição de novas interfaces possibilita melhores interações;
- Camadas com funcionalidades dependentes podem ser unidas;
- Adaptação a novos problemas, como a necessidade de comunicações que necessitem de uso eficiente da energia.

É sempre advertido que a adoção desses protocolos leva à perda de modularidade. E se várias violações da arquitetura original são feitas, ela pode perder o significado, podendo não ser mais usada como referência. Os protocolos com relacionamento cruzado entre camadas devem ser usados como uma extensão da arquitetura em camadas e não para substituir essa arquitetura [Srivastava 2005, Ruzzelli, O'Hare e Jurdak 2008, Jurdak 2007, Van Hoesel, Nieberg e Havinga 2004, Sichitiu 2004, Zuniga e Krishnamachari 2004, Souto, Aschoff e Kelner 2007, Madan et al. 2005].

Outras desvantagens comumente apresentadas são:

- A existência de novas interações requer que novas interfaces entre as camadas sejam criadas, porém não há padronização de quais interfaces devem existir, nem que aspectos devem ser abordados;
- Não existe especificação definindo como propostas de protocolos com relacionamentos entre camadas diferentes possam coexistir na mesma arquitetura ao mesmo tempo.

4 Protocolo com relacionamento cruzado entre camadas

Ye e Heidemann (2003) analisaram os principais fatores, atributos e métricas para os protocolos MAC nas redes de sensores sem fio. Na lista dos atributos estão os seguintes: redução de colisões, eficiência no uso da energia, escalabilidade e adaptabilidade, utilização do canal, latência ou atraso, taxa de transferência e justiça¹ [Ye e Heidemann 2003].

Este capítulo apresenta o protocolo desenvolvido e discute as métricas de eficiência do uso de energia e atraso.

4.1 Causas de desperdício de energia

Dentre as tarefas dos nós sensores, as funções de processamento interno de informações, transmissão e recepção de informações e sensoriamento são colocadas como as que mais elevam o consumo de energia [Karl e Willig 2005]. Porém, é afirmado que essas tarefas não podem ser evitadas completamente, apenas ter seu uso reduzido.

Como exposto no Capítulo 2, o processamento de informações dos nós sensores é feito de forma periódica para que os nós possam mudar seu estado para um estado de menor consumo de energia. No entanto, as mudanças de estado somente são proveitosas se o nó permanecer no estado de menor consumo por um período de tempo que compense

¹O autor define justiça como a propriedade do protocolo MAC de tratar todos os nós vizinhos com igualdade

a energia gasta para realizar a transição. A Figura 4.1 demonstra essa afirmação. Sendo que:

- T1 — O nó inicia o processo de mudança de estado de Ativo para Dormência;
- T2 — O nó termina a transição de estado;
- T3 — O nó inicia o processo de transição de Dormência para Ativo;
- T4 — O nó termina a transição de estado.

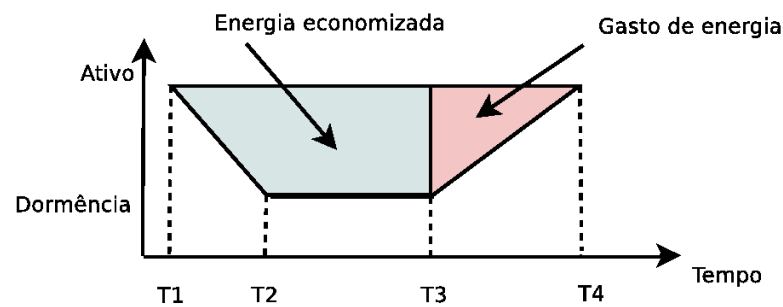


Figura 4.1: Energia economizada e desperdiçada em transições de estado dos nós [Karl e Willig 2005].

Nota-se que o período T2-T3 deve ser prolongado, e somente voltar ao estado ativo quando necessário. Porém, as tarefas dos nós citadas na Subseção 2.2.2 são fundamentais e precisam ser feitas de tempos em tempos, por isso, o intervalo T2-T3 é reduzido.

O ponto chave para conter o gasto de energia é avaliar o comportamento das camadas em conjunto. Quando se analisa unicamente a camada de aplicação pode-se afirmar que ela consegue otimizar o tempo que o nó passa no estado de Dormência, mas quando se estuda outras camadas em conjunto, observa-se a deficiência da separação entre

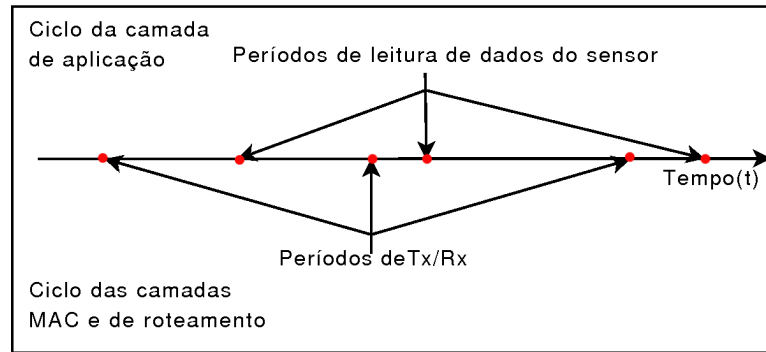


Figura 4.2: Comparação entre ciclos de trabalho da aplicação e ciclos de trabalhos das camadas de MAC e rede.

as camadas. A Figura 4.2 mostra um exemplo dos períodos de atividade das camadas de rede e da camada de aplicação.

O modelo tradicional separa as camadas por funcionalidade, isso dá modularidade e escalabilidade à arquitetura, pois cada camada apenas necessita conhecer as interfaces das camadas superior e inferior e não como elas são implementadas [Souto, Aschoff e Kelner 2007]. No entanto, neste problema deve-se analisar as tarefas de cada camada, e principalmente uma forma de coordená-las para que tenham os seus ciclos ajustados e sincronizados.

Dentre as funcionalidades da aplicação, está a leitura de dados do sensor. Essa funcionalidade varia de ambiente a ambiente, porém, é comum que a leitura de dados do sensor seja feita de forma periódica, como por exemplo em aplicações de monitoramento ambiental.

Após a leitura, a fase de processamento do dado lido e posteriormente o envio dos dados. Por outro lado, as camadas de rede e MAC também tem um ciclo semelhante pois são ativadas pela camada de aplicação. Porém, observa-se que os nós também podem ser utilizados para encaminhar os dados de outros nós para o sorvedouro, ou seja, os

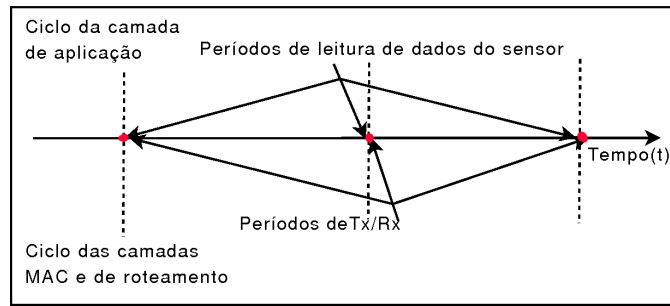


Figura 4.3: Tarefas de aplicação sincronizadas com as de rede e MAC.

períodos de atividade da camada de rede e MAC também são afetados pelos ciclos dos nós vizinhos.

Então torna-se objeto de estudo deste trabalho o desenvolvimento de um algoritmo com relacionamento cruzado entre camadas para otimizar o período de atividade dos nós sensores fazendo o relacionamento das camadas de Aplicação, rede e MAC para otimizar os tempos de atividade como mostrado na Figura 4.3.

Para isso propõe-se que o relacionamento entre camadas seja feito por compartilhamento de informações entre a camada de Aplicação e camada MAC. Dentre os protocolos de controle de acesso ao meio comumente utilizados pela literatura, o protocolo TDMA é o que melhor se encaixa para a proposta pois possui sincronização. Sendo assim, compartilha-se a informação do intervalo TDMA. Observe que apesar de usar a variante com intervalos de tamanho variável do TDMA, nesse caso, a informação utilizada é somente o instante de tempo que inicia o intervalo. A utilização do esquema TDMA com intervalos de tempo de tamanho variável é discutida com detalhes na Sub-seção 4.2. Esse relacionamento da camada de aplicação e as camadas de rede e MAC pode ser analisado pela Figura 4.4.

Para entender como esse relacionamento pode ser implementado, ou simulado, é necessário compreender as fases de configuração do protocolos MAC [Santi 2006], que

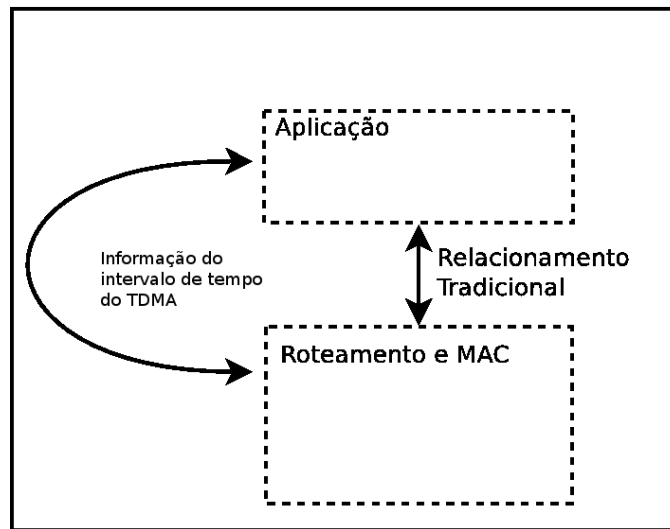


Figura 4.4: Compartilhamento de informação entre a aplicação e as camadas de rede e MAC.

são três:

- **Descoberta de vizinhos** — A descoberta de vizinhos é a fase em que os nós interagem para descobrir quais outros nós estão ao alcance formando-se vizinhanças, mostrado na Figura 4.5;
- **Controle de topologia** — O controle de topologia reduz o número de vizinhanças entre os nós excluindo alguns nós das lista de nós vizinhos, como forma de ajuste de potência de transmissão, que também é uma forma de economia de energia, como mostrado na Figura 4.6;
- **Alocação de intervalos de tempo** — A alocação dos intervalos de tempo é a fase na qual dois nós negociam o instante de tempo periódico no qual irão transmitir dados de um para o outro. Após o término desta última fase, a informação do intervalo de tempo negociado é compartilhada pelas duas camadas, exemplificado na Figura 4.7.

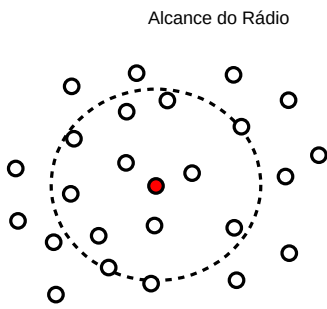


Figura 4.5: Descoberta de vizinhos.



Figura 4.6: Controle de Topologia.

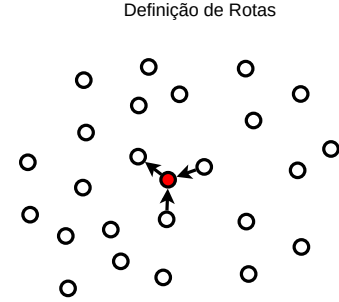


Figura 4.7: Alocação de intervalos de tempo.

4.2 Causas do atraso em redes de sensores sem fio

O segundo fator a ser melhorado é o atraso. Atraso, ou latência, é definido como o tempo entre a produção da informação e a chegada da informação ao seu destino final.

Para redes de sensores sem fio, o atraso pode ser muito importante ou não dependendo da aplicação. Em geral, a importância dada ao atraso é proporcional a velocidade do objeto ou evento a ser sensoriado. Por exemplo, em aplicações do tipo agricultura de precisão pode-se tolerar algum atraso. De outra forma, o atraso deve ser sempre evitado.

Bisdikian, Goeckel e Towsley afirmam que o atraso é um dos critérios para a avaliação do QoI (*Quality of Information*), ou seja, embora o atraso seja tolerável, a presença dele faz com que a informação sensoriada tenha sua utilidade reduzida [Bisdikian, Goeckel e Towsley 2010].

Neste trabalho é analisado o atraso nas três camadas envolvidas no protocolo proposto, sendo estas causas apontadas como as principais fontes do atraso nas redes de sensores sem fio:

MAC — Na camada MAC o atraso pode ocorrer, por exemplo: pela competição ao

meio em protocolos por contenção; pela espera pelo intervalo de tempo associado ao nó em protocolos baseados no TDMA, ou ainda, por protocolos que não garante justiça [Ye e Heidemann 2003];

Rede — Em protocolos ditos como sob demanda, a fase de estabelecimento inicial da rota impõe um atraso à informação, ou até, fases de manutenção de rotas também são apontados como causas;

Aplicação — Na camada de aplicação pode-se citar como causa do atraso a falta de sincronismo entre os processos da camada de aplicação e as camadas mais baixas que também pode ser visto na Figura 4.2.

O esquema proposto na Seção 4.1 também é usado para reduzir o atraso. Na camada MAC o uso do esquema baseado em TDMA oferece referência do tempo em que os eventos de TX/RX poderão acontecer e o relacionamento com a camada de aplicação oferece a sincronia com as camadas mais baixas.

4.3 Implementação

Para fins de implementação assume-se como constantes as seguintes características dos nós visando simplificar o ambiente de simulação:

- Nós Homogêneos — todos os nós possuem a mesma capacidade de processamento e o mesmo modelo de rádio;
- Topologia de rede — Supõe-se que a topologia da rede seja bem distribuída e que o algoritmo de controle de topologia leve em conta o valor m na Inequação 4.1 que será explicada a seguir;

- Nó sorvedouro — Considera-se que o consumo de energia no nó sorvedouro pode ser desprezado e, além disso, que esse nó não gera informação na rede;
- Outros nós — Todos os outros nós geram informação e podem ser utilizados para encaminhar dados para o sorvedouro;
- Flexibilidade da aplicação — assume-se que seja possível para a camada de aplicação mudar ou deslocar no tempo os seus períodos de leitura. Assim, esse esquema torna-se válido apenas para determinadas aplicações como monitoração de eventos.

4.3.1 Máquina de estados do nó usado como referência

O Capítulo 2 mostra os componentes de *hardware* e *software* dos nós sensores. No entanto, para conseguir o relacionamento entre as camadas citadas é necessário alterar a forma como as camadas são acopladas. O modelo de nó usado como referência neste trabalho é mostrado na Figura 4.8.

4.3.2 Topologia usada como referência

Nessa abordagem é usado um esquema TDMA com intervalos de tempo variáveis. As motivações para a proposta desse esquema são baseadas em observações feitas em topologias de rede para RSSFs, como a topologia mostrada na Figura 4.9, na qual as setas apontam caminhos de roteamento.

A rede pode ser segmentada para simplificar a análise de cada caminho de roteamento. Por exemplo, o caminho formado pelos nós S-3-9-20. Estes nós formam um caminho conhecido com topologia *string*, mostrado na Figura 4.10.

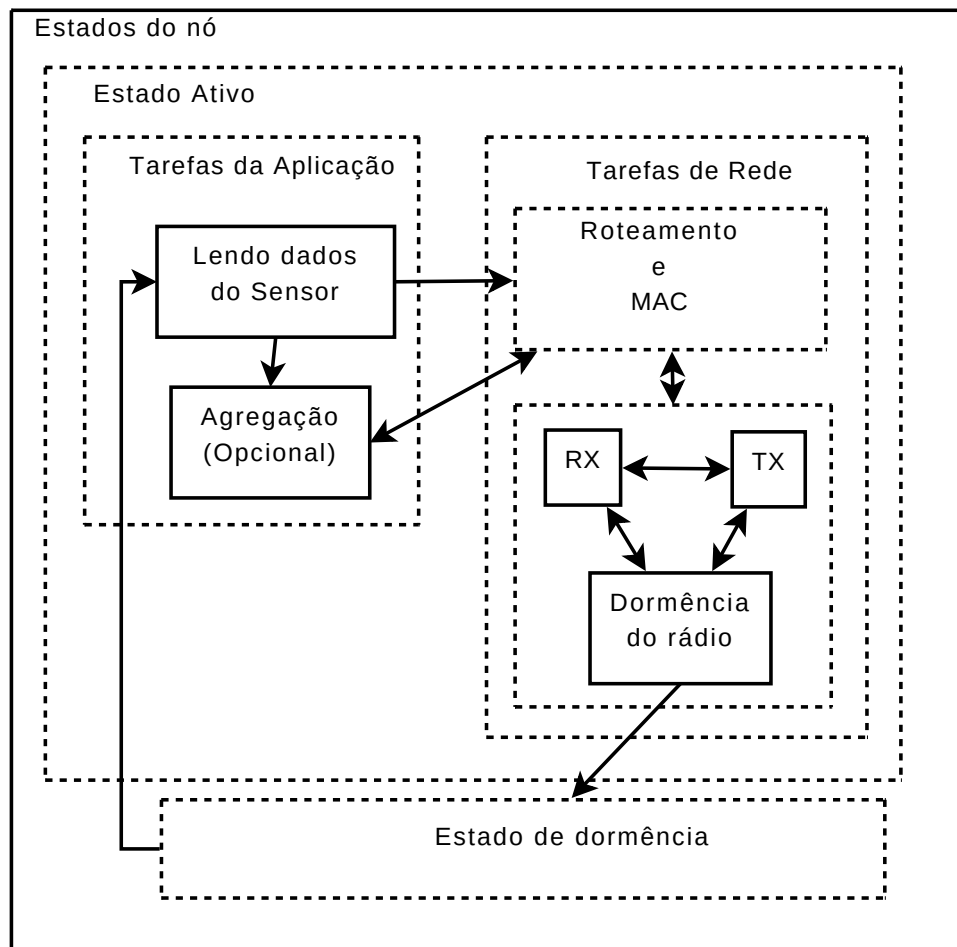


Figura 4.8: Máquina de estados do nó.

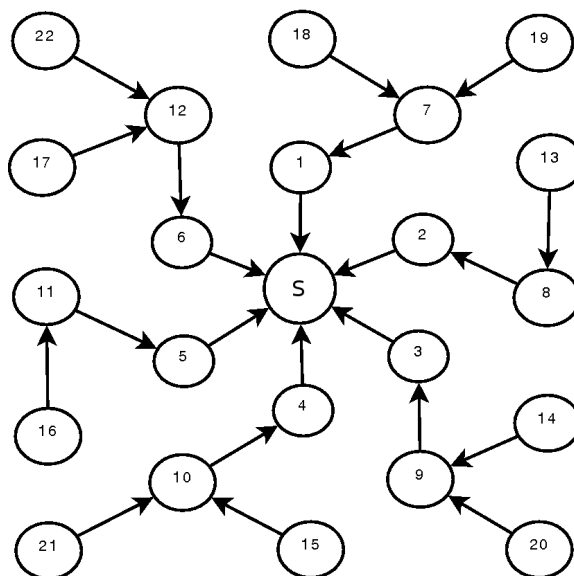


Figura 4.9: Topologia de rede.

Com essas duas topologias é possível observar:

- Nós próximos ao sorvedouro necessitam trafegar mais dados do que nós distantes, pois são usados como roteadores para os outros nós;
- Nós próximos ao sorvedouro devem estar no modo Ativo por mais tempo;
- Nós próximos ao sorvedouro precisam lidar com mais interferência;
- Um algoritmo do tipo vetor de distância pode ser utilizado para formar os caminhos de roteamento.

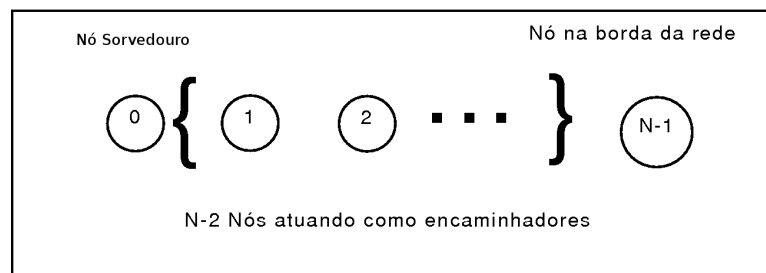


Figura 4.10: A topologia *String*.

4.3.3 Arquitetura de rede: camadas MAC e rede

Na abordagem proposta usa-se um modelo TDMA como meio para evitar colisões entre nós vizinhos. Contudo usa-se a variante do modelo TDMA com intervalos de tempo de tamanhos variáveis. O tamanho do intervalo de tempo é disposto de forma ordenada de tal forma que nos nós mais próximos do sorvedouro sejam oferecidos intervalos de tempo maiores e para nós afastados intervalos de tempo menores.

A alocação de intervalos de tempo é feita de modo que um nó a um salto do sorvedouro sempre tenha um intervalo de tempo maior que outro nó mais de um salto de

distância. A diferença entre os tamanhos de dois intervalos de tempo de dois nós é usado como peso pelo algoritmo de roteamento como métrica para formar rotas.

Denominando como t o tamanho do intervalo de tempo concedido a um nó qualquer em uma rede. Antes de iniciar a comunicação com um outro nó pertencente ao próximo salto na rede, este nó deve subtrair de t uma importância denominada d e usar esse novo valor $(t - d)$ como o tamanho do intervalo de tempo oferecido para o nó pertencente ao próximo salto.

Em outras palavras, à cada nó, como por exemplo na topologia *string*, de t , subtrai-se um valor d representando a existência de mais um salto na comunicação deste nó. Observe que t é usado como peso pelo algoritmo de roteamento, e como o valor de t tende a decrescer ao longo do caminho, quanto maior menor custo tem a rota. Observe também que isso é o oposto aos protocolos tradicionais. O valor d pode ser calculado a partir da inequação

$$n(b/p) < d < c/m, \quad (4.1)$$

Em que n é o número máximo de nós esperado em cada segmento de rede. Por exemplo, o conjunto de nós $\{S, 4, 10, 15, 21\}$ na Figura 4.9 representa um segmento de rede com $n = 4$. Além disso, b é a taxa de transferência entre dois nós; p é o tamanho máximo do pacote de dados; c é o tamanho máximo do ciclo TDMA; e m é o número máximo de vizinhos que um nó pode aceitar rotear dados. Na Figura 4.9 o nó 10 tem apenas dois vizinhos utilizando-o como roteador.

O limite superior de d corresponde à situação em que um nó tem apenas m vizinhos, então $d < c/m$ é condição para que cada nó vizinho tenha a oportunidade de

transmissão. Já o limite inferior de d é dado pelo tempo necessário para transmitir os pacotes de dados provenientes de todos os nós de um determinado segmento de rede, então $d > n(b/p)$.

Como exemplo, na topologia formada pelos nós S-3-9-20 na Figura 4.9 é possível ter o cenário mostrado na Figura 4.11.

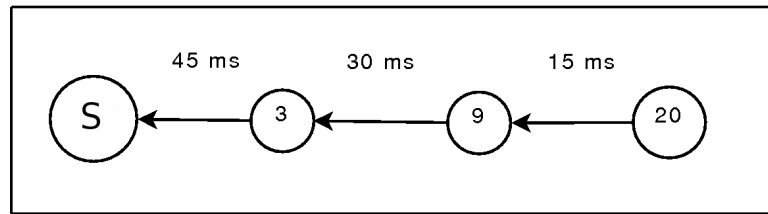


Figura 4.11: Cenário das ligações entre os nós S-3-9-20.

Portanto, no algoritmo proposto as camadas MAC e rede devem ser unidas em uma só, o que é conhecido como desenvolvimento conjunto por completa união de funcionalidades. Na próxima sub-seção é explicado como é feito o relacionamento entre as camadas de rede e a aplicação.

4.3.4 Arquitetura de rede: relacionamentos com a camada de aplicação

Nos protocolos de rede pode-se perceber o relacionamento cruzado entre as camadas, mas a aplicação também pode ser relacionada com as camadas de MAC e rede. Esse relacionamento é mostrado na Figura 4.2 que ilustra o ciclo de trabalho da aplicação, diferente do ciclo das camadas de rede e MAC. Isto tem impacto importante no atraso existente desde que a informação foi gerada até o tempo no qual ela chega ao seu destino. É importante notar que podem haver vários períodos em que os nós mudam seu estado

para Ativo, para tarefas da aplicação e para as tarefas de rede, tendo assim influência no consumo de energia.

Por isso, na abordagem proposta, a camada de aplicação é sincronizada com as camadas de rede e MAC de modo que antes de executar as tarefas de TX/RX a aplicação realiza as atividades de leitura de dados do sensor e somente então são executadas as tarefas de rede. Então, o ciclo de trabalho proposto fica como, por exemplo, na Figura 4.3.

Neste caso, a aplicação flexibiliza a execução de suas tarefas para se adaptar ao tempo mais conveniente, de acordo com as informações dos intervalos da camada MAC, no qual as outras camadas também estarão prontas a executar, aproveitando assim um único tempo em que o nó permanece Ativo. Esta estratégia pode ser empregada, por exemplo, em aplicações com sensoriamento periódico [Ruiz et al. 2004].

4.3.5 Algoritmo para alocação de intervalos de tempo

Para ilustrar como é realizada a alocação de intervalos de tempo utilizaremos a topologia *String* da Figura 4.11 para simplificar a visualização. Inicialmente nenhum dos nós tem conhecimento sobre rotas e sobre quais intervalos de tempo devem usar para comunicar-se.

A alocação de intervalos de tempo, e por conseguinte a definição de rotas, é realizadas em três etapas descritas a seguir e mostradas na Figura 4.12:

1. Descoberta de vizinhos e Controle de Topologia
 - (a) Nesse momento, o nó sorvedouro é o responsável por iniciar a comunicação, então ele envia uma mensagem em modo difusão(*broadcast*), chamada de "Anúncio". Nessa o nó sorvedouro informa o tamanho do intervalo de tempo que está

apto a oferecer e também um intervalo de tempo livre;

- (b) Os nós 3 e 9 recebem a mensagem do sorvedouro e usam o algoritmo de controle de topologia para decidir se irão fechar vizinhança, ou não, diretamente com o nó sorvedouro. Na Figura 4.12 apenas o nó 3 está apto a se conectar ao sorvedouro.

2. Competição por um intervalo de tempo

- (a) O nó 3 envia uma mensagem chamada "Tentativa" para o nó sorvedouro contendo sua ID(identificação) ;
- (b) O nó sorvedouro, usa o algoritmo de alocação de intervalos de tempo para escolher o intervalo a ser alocado, e então envia uma mensagem chamada "Oferta" contendo o intervalo para o nó 3 comunicar-se com o sorvedouro;

3. Repasses

- (a) O nó 3 recebe a "Oferta" do nó sorvedouro e reescala as suas atividades de acordo com o intervalo de tempo dado pelo nó sorvedouro;
- (b) Agora o nó 3 tem a função de dar conectividade a outros nós. Para isso ele deve calcular o seu valor de d . Para a efetuação desse valor o nó 3 pode usar a métrica energia residual ou outra métrica mais apurada;
- (c) O nó 3 reinicia o processo de alocação de intervalos de tempo a partir do Item 1-a, porém, o tamanho do intervalo oferecido está subtraído do valor d calculado pelo nó 3.

Observe que o passo 1-(a) pode ser considerado como algoritmo de sincronização, já que nesse ponto há a primeira troca e sincronização entre os relógios(*clocks*). Ob-

serve também que o parâmetro de quando será a próxima transmissão do nó 3 para o nó sorvedouro não está presente nas trocas de mensagens, esse valor é dado pela propriedade chamada de Ciclo, que representa a periodicidade das camadas de rede.

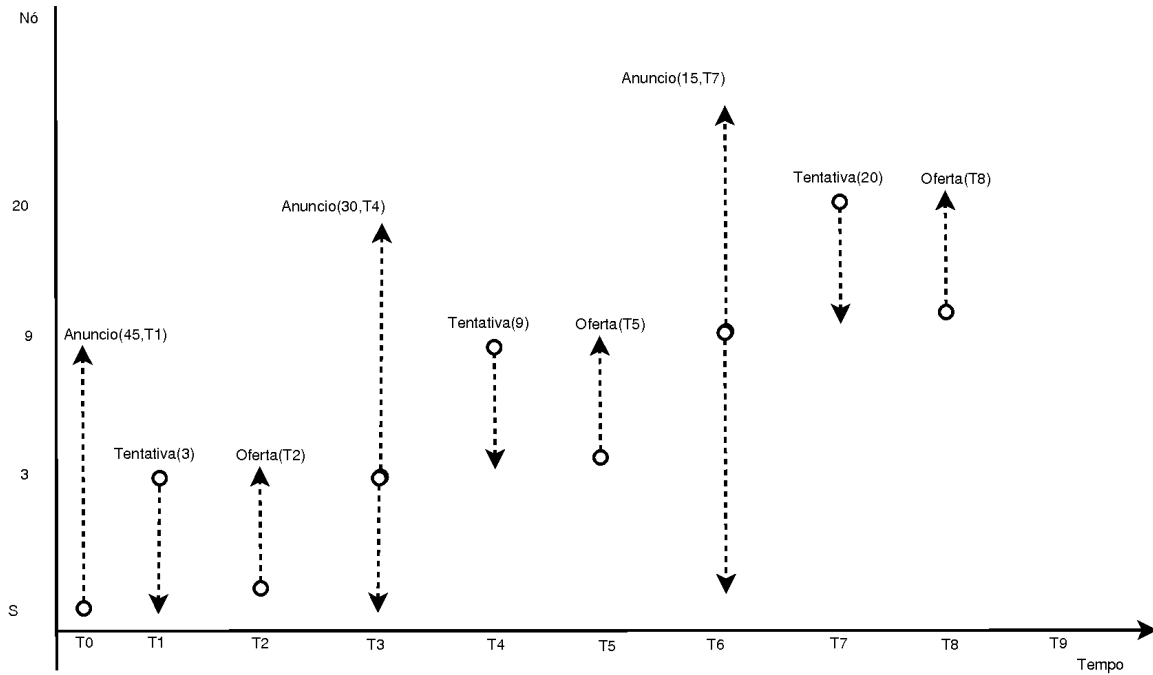


Figura 4.12: Cenário de alocação de intervalos de tempo entre os nós S-3-9-20.

4.3.6 Estados do protocolo

Na Figura 4.13 é mostrado de forma simplificada os estados do protocolo. Novamente, a Figura 4.12 é usada para ilustrar o eventos:

- Todos os nós, exceto o sorvedouro, iniciam. Porém como nenhum deles possui um rota, todos ficarão no estado "Aguarda evento";
- O nó sorvedouro, ao iniciar segue diferente, indo calcular o valor de d e posteriormente o anúncio, T0 na Figura 4.12;
- O nó sorvedouro então segue para o estado "Aguardar Tentativas". Enquanto isso,

O nó 3 recebe o evento e segue para o estado "Recebi Anúncio" e posteriormente para "Tentar Associação", T1 na Figura 4.12;

- O nó sorvedouro recebe a "Tentativa" do nó 3, e segue o processo até o estado de "Enviar Alocações", T2 na Figura 4.12;
- O nó 3 recebe o evento e segue para "Recebi Alocação" e "Aceitar Rota", e reinicia o ciclo, T3 na Figura 4.12;

Na Figura 4.13 estão sendo suprimidos processos como *timeouts* e controle de topologia, e eventos gerados pela camada de aplicação, entre outros.

Na Figura 4.13 é importante notar os blocos "Cálculo de d " e "Alocar intervalo" como elementos chave para o protocolo:

Cálculo de d O valor de d é usado pelo protocolo para compor o tamanho (t) de cada intervalo oferecido a nós vizinhos sendo que esse tamanho é usado como métrica de roteamento. Um valor alto para d pode fazer com que a rede seja limitada em poucos nós. Já um valor baixo, irá resultar em baixa eficiência do protocolo tanto em níveis de consumo de energia quanto ao atraso, como será visto no Capítulo 5;

Alocar intervalos O esquema de alocação de intervalos de tempo é muito importante para o perfeito funcionamento do protocolo sendo o responsável por evitar o problema do terminal escondido.

Para vislumbrar quais outras métricas poderiam ser usadas nesses blocos, pode-se olhar a Figura 4.14. Nela estão relacionados alguns dos tópicos de arquitetura e gerenciamento para redes de sensores sem fio.

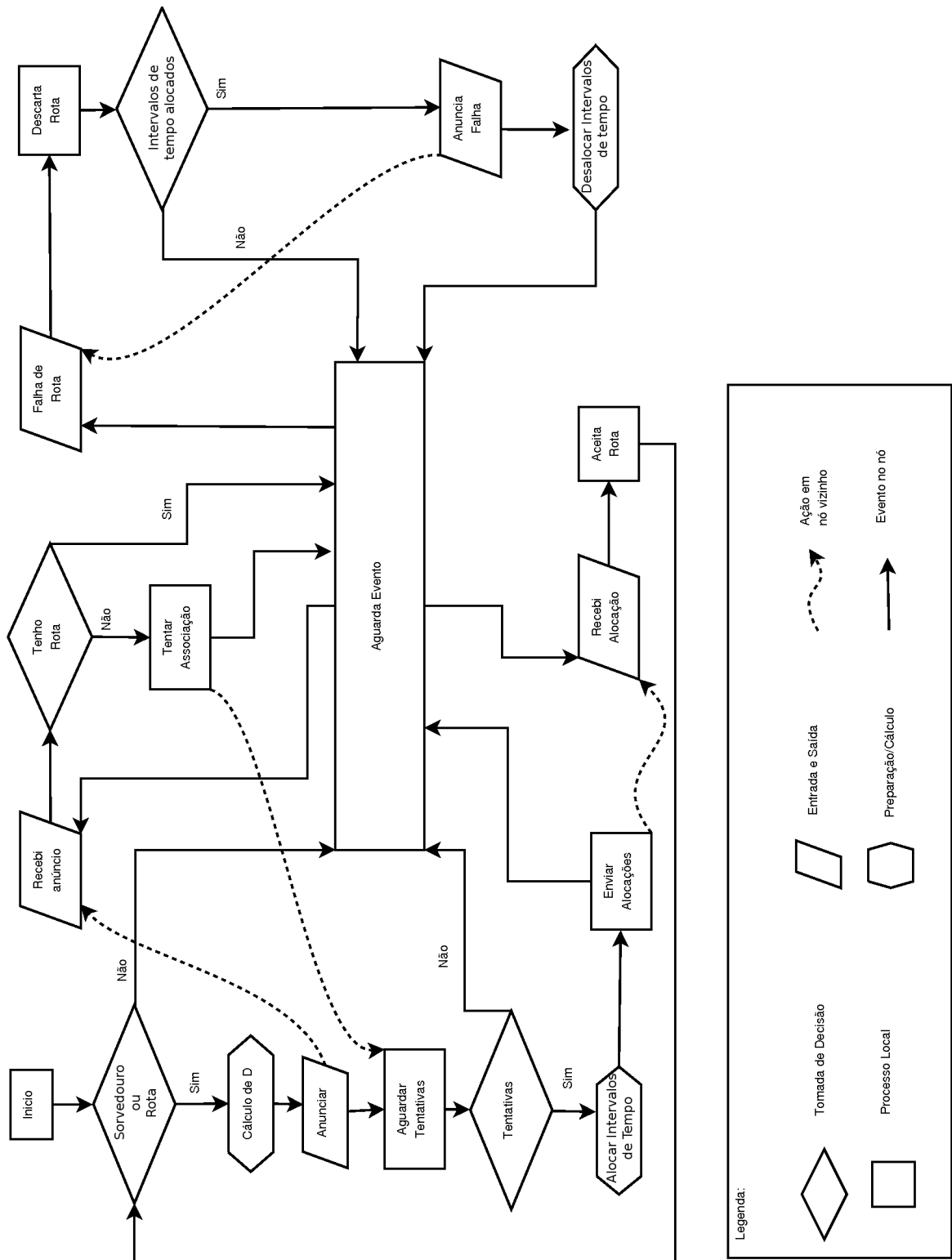


Figura 4.13: Estados do protocolo.

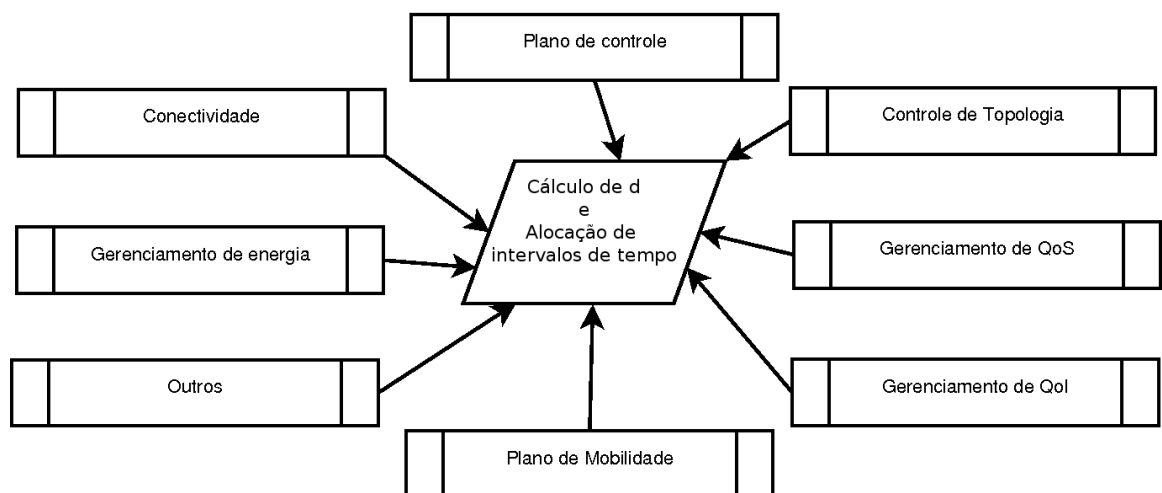


Figura 4.14: Tópicos relacionados ao cálculo de d e alocação de intervalos de tempo.

5 Simulações

Este Capítulo mostra os resultados das simulações de acordo com as métricas discutidas no Capítulo 4. O simulador OMNET++ foi utilizado com os módulos para mobilidade e baterias para obter os resultados.

5.1 Benefícios do efeito entre camadas sobre o atraso

A simulação numérica com o simulador OMNET++ e do modelo de rede descrito, forneceram resultados que auxiliam a validar a abordagem proposta.

O primeiro resultado a ser analisado é o crescimento do atraso conforme o nó distancia-se do sorvedouro em número de saltos. Na Figura 5.1 é mostrado o atraso médio dos nós usando a abordagem tradicional, e na Figura 5.2 os resultados obtidos com a abordagem apresentada. Pode-se então comparar os resultados.

Comparando as duas figuras, nota-se que os resultados sugerem que a utilização da abordagem com interação entre camadas diminui o atraso. Nota-se que o atraso médio na abordagem com relacionamento entre camadas é diminuído por causa do desenvolvimento conjunto com as camadas de rede. As tarefas da aplicação são executadas sincronizadamente com as tarefas de rede, escolhendo o instante mais adequado para gerar tráfego na rede.

Um outro ponto que contribui para os melhores resultados é a configuração dos intervalos de tempo na camada MAC que são organizadas para que nós à distância

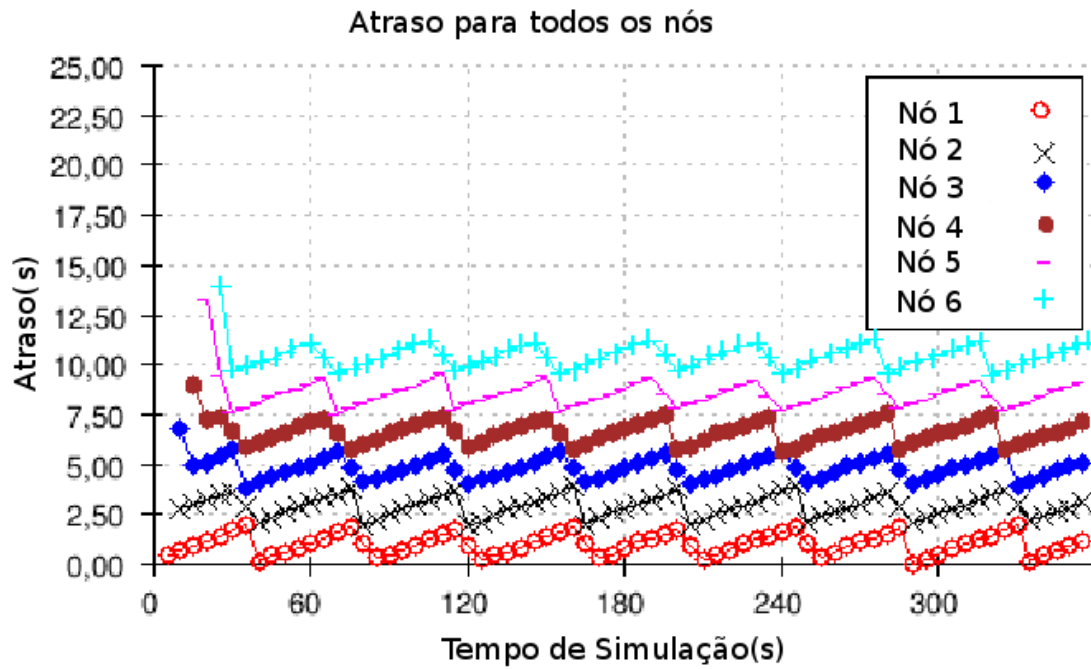


Figura 5.1: Atraso em uma rede de 6 saltos sem interação entre camadas.

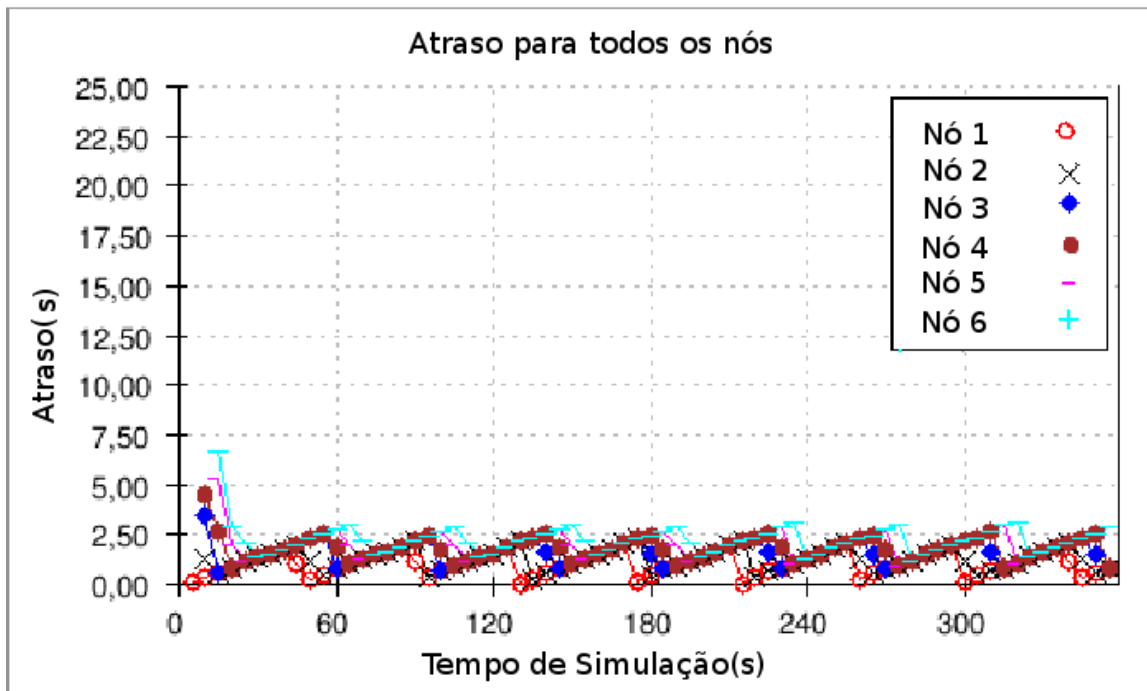


Figura 5.2: Atraso em uma rede de 6 saltos com interação entre camadas.

$n+1$, em número de saltos, do nó sorvedouro tenham sua oportunidade de transmitir para os próximos saltos, à distância de n , imediatamente antes de que esses nós tenham sua

oportunidade de transmitir para os respectivos próximos saltos, à distância $n - 1$. Reduz-se assim o tempo em que uma mensagem passa armazenada em memória temporária antes de ser transmitida.

5.2 Análise da escalabilidade

Para analisar a escalabilidade da abordagem proposta, aumenta-se o tamanho da rede para averiguar se os resultados se mantêm estáveis. Para isso, analisam-se simulações com número de saltos variando de 3 a 12 dentro da topologia da rede. Para essa avaliação utilizam-se duas métricas importantes: o atraso médio das mensagens de todos os nós da rede e o atraso dos nós mais distantes do sorvedouro. Os resultados são mostrados nas Figuras 5.3 e 5.4.

Nota-se que o ganho dado usando a abordagem com interação entre camadas se mantém conforme a rede cresce em número de nós. Isso se deve ao fato que em qualquer ponto da rede um nó à distância x , em número de saltos, do nó sorvedouro, sempre realiza as respectivas tarefas antes do nó $x - 1$.

No entanto, como descrito anteriormente na formulação da Desigualdade 4.1 há uma limitação da quantidade de nós que podem fazer parte da rede e por conseguinte no número máximo de saltos. Contudo, há na literatura algoritmos baseados em grupos¹ que dividem a rede em outras sub-redes. Todavia, a própria abordagem pode ser usada como algoritmo de formação de grupos assimilando que o nó sorvedouro neste caso seria um líder de grupo, tornado assim essa abordagem interessante para a delimitação da área do grupo. Além disso, o algoritmo de controle de topologia pode influenciar a eficiência

¹Neste texto o termo grupos será usado substituindo o termo inglês *cluster*

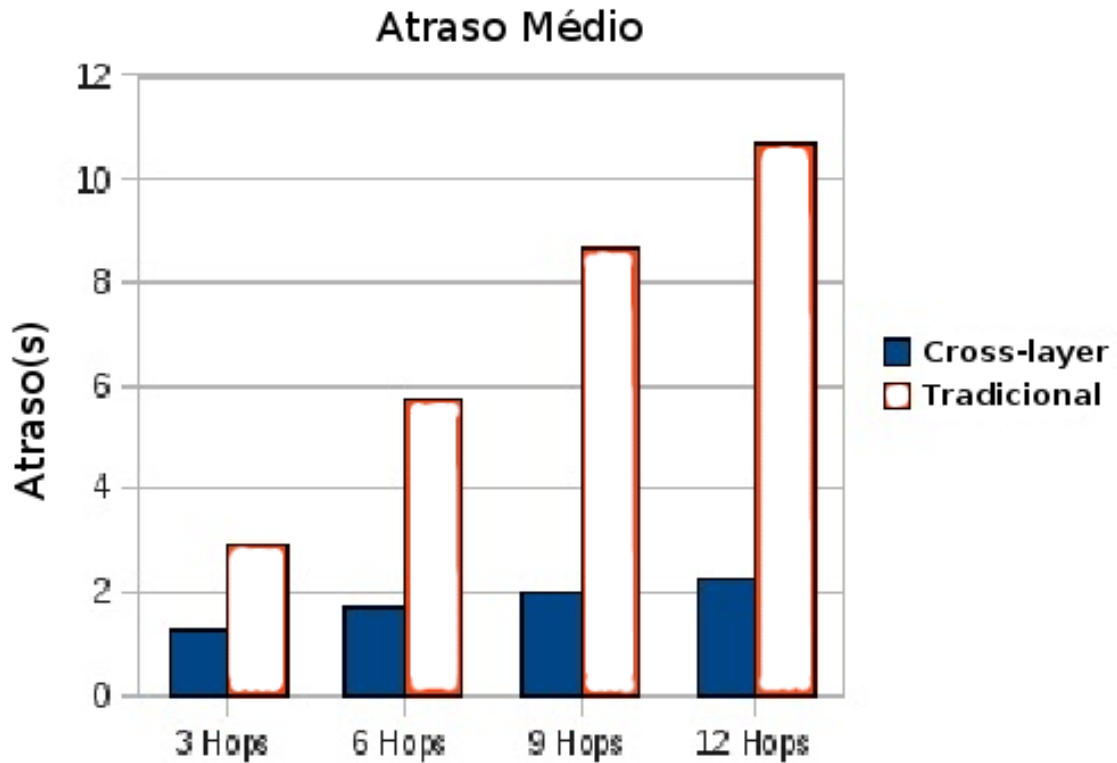


Figura 5.3: Comparação do atraso médio entre as técnicas.

do protocolo.

5.3 Benefícios do efeito entre camadas sobre o consumo de energia

Para essa simulação usam-se os parâmetros anteriores, e mais os seguintes:

- Tempo total de simulação para duas horas (120 minutos);
- Energia consumida pelo rádio transmitindo = 8mW;
- Energia consumida pelo rádio para recebendo = 8mW;
- Energia consumida pelo rádio em estado de Dormência = 1mW.

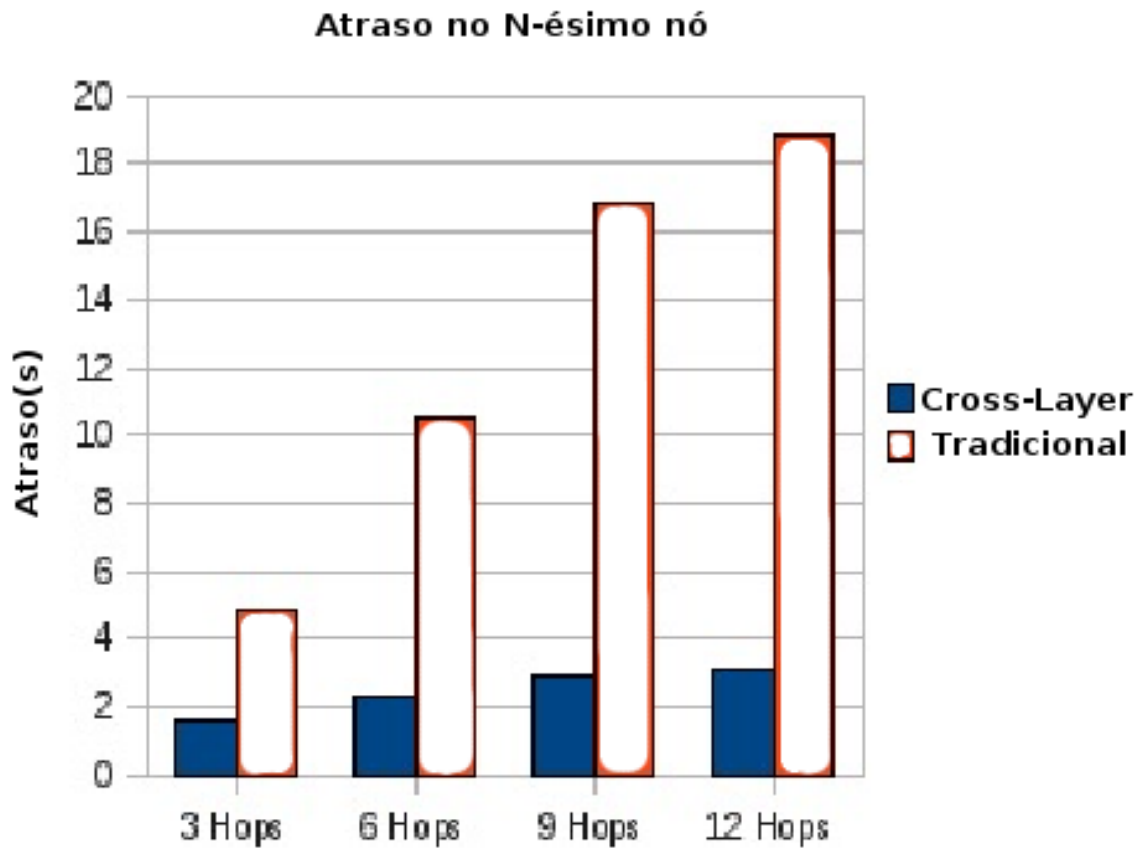


Figura 5.4: Comparação do atraso das mensagens dos nós mais distantes do sorvedouro.

Os resultados podem ser analisados observando a Figura 5.5, que mostra a quantidade média de energia gasta pelos nós que são os primeiros saltos da rede, como os nós de 1 a 6 na Figura 4.9.

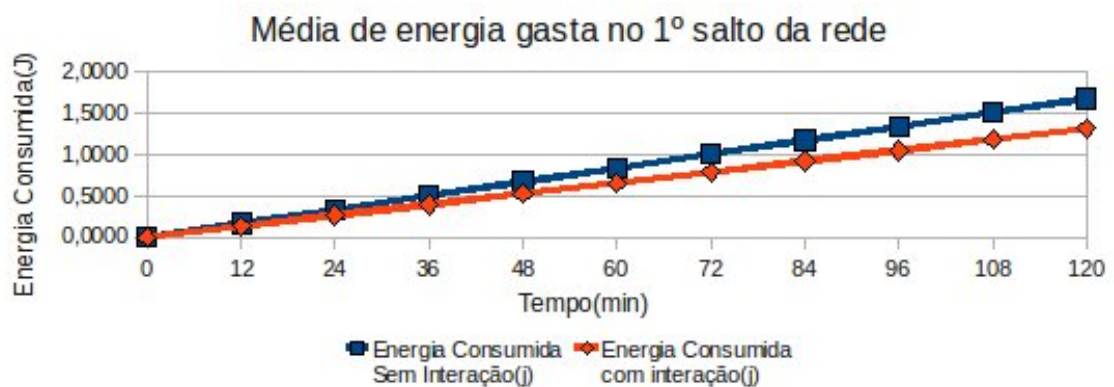


Figura 5.5: Gasto médio de energia dos nós.

Pode-se observar que nesses nós o consumo energético é menor na abordagem com interação entre camadas, pois nela, a sincronia existente entre a aplicação e as camadas de rede evitam mudanças de estado desnecessárias para as tarefas da aplicação e além disso há o escalonamento na camada de rede com a camada MAC, para que ao terminar um período de recepção de dados de um outro nó, este possa receber os dados de um terceiro nó vizinho. Nos nós nas bordas da rede o ganho usando a abordagem também é menor, pois a quantidade de dados que esses nós trafegam é menor.

5.4 Variando a Periodicidade

Na Figura 5.6 estão representados os resultados obtidos variando o fator periodicidade e avaliando os resultados do atraso. Analisando essa figura pode-se notar que o atraso tende a diminuir conforme os períodos entre duas atividades de sensoriamento (periodicidade) aumenta. Pois, nesses casos o ciclo dos protocolos MAC se repetirá algumas vezes antes que um ciclo da aplicação seja completado.

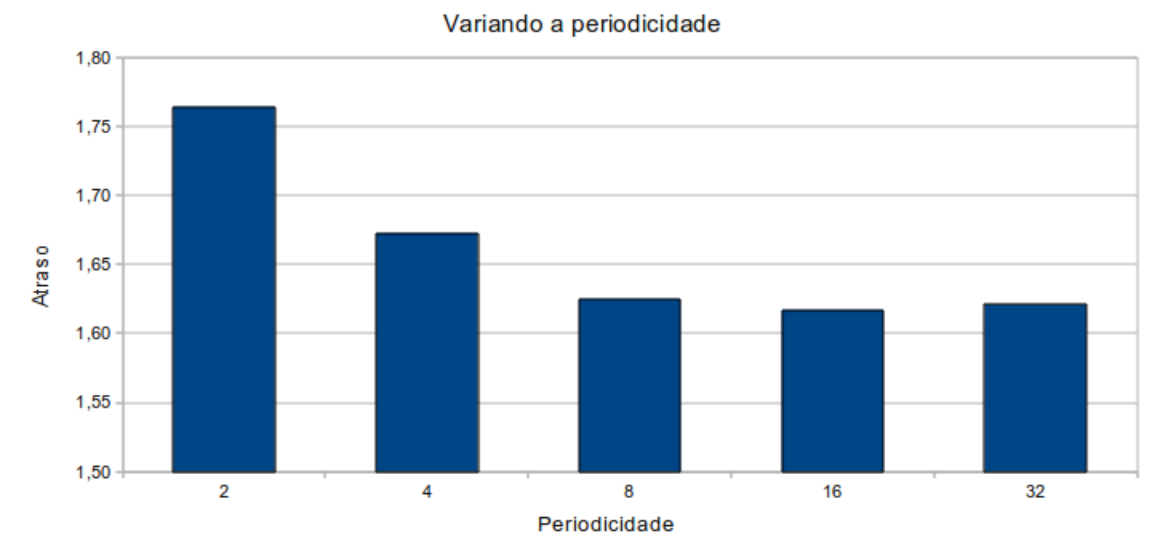


Figura 5.6: Evolução do atraso variando a periodicidade.

5.5 Variando o valor de d

Conforme exposto no Capítulo 4 o cálculo do valor de d influencia a eficiência do protocolo. Nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 são analisados a quantidade máxima de nós possível na rede, a energia gasta pelos nós da rede e o atraso médio das informações variando o valor de d .

A Figura 5.7 mostra que ao usar um baixo valor para d a rede pode ter mais nós. Ao aumentar esse valor, a quantidade máxima de nós possível na rede diminui. No entanto, ao aumentar d aumenta também o consumo médio de energia do nós, como pode ser observado na Figura 5.8. Porém, observando a Figura 5.9 nota-se que atraso médio diminui conforme o valor de d aumenta.

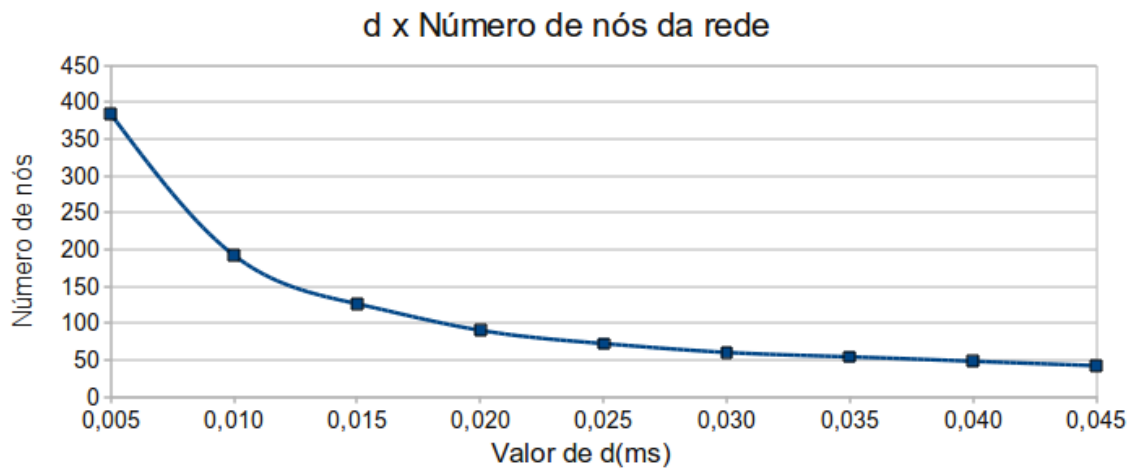


Figura 5.7: Número máximo de nós variando o valor de d .

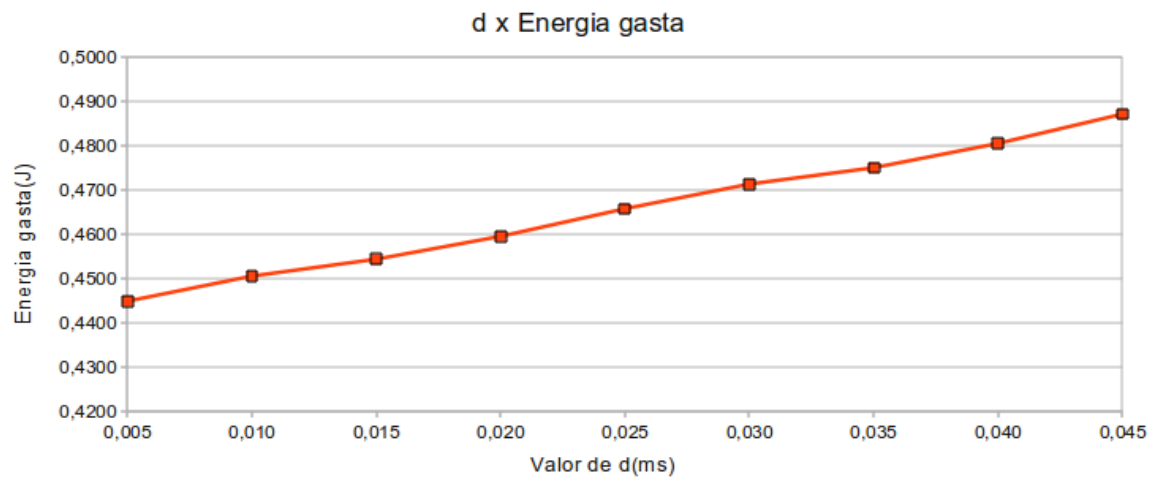


Figura 5.8: Gasto médio de energia dos nós variando o valor de d .

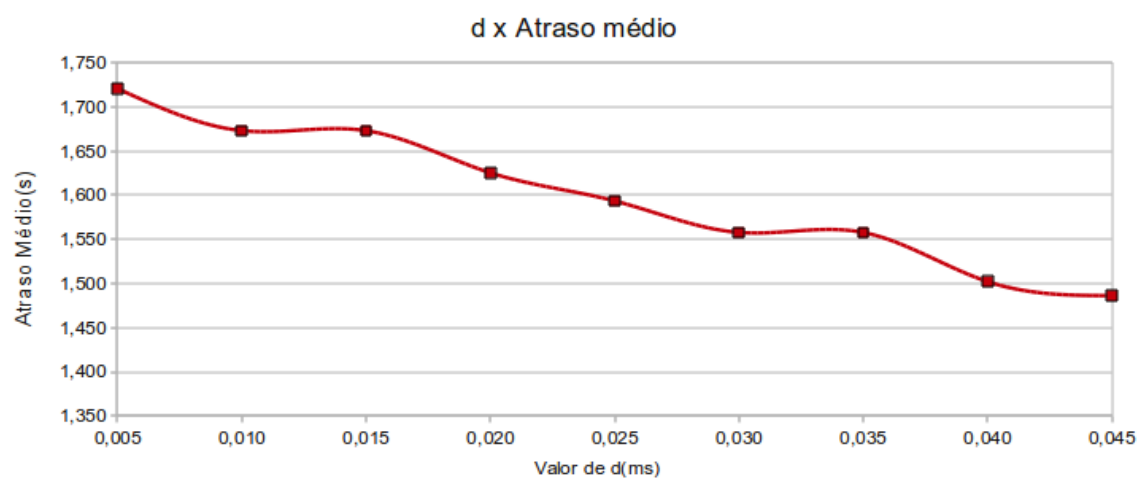


Figura 5.9: Atraso médio variando o valor de d .

6 Conclusões e trabalhos futuros

Conhecidas como um tipo muito específico de redes e tidas como a tecnologia de monitoramento do futuro, as redes de sensores sem fio são estudadas por vários autores. Suas necessidades tornaram-se objeto de estudo de muitos e ainda possuem desafios a serem vencidos. É apontado pela literatura que a eficiência nas comunicações é o elemento chave para o sucesso de protocolos dessas redes [Teixeira 2005].

Dito que os protocolos tradicionais não aproveitam da natureza colaborativa dessas redes, neste documento é proposto um protocolo com relacionamento cruzado entre camadas para melhorar o desempenho das redes de sensores sem fio. O protocolo proposto relaciona as camadas MAC, roteamento e aplicação do modelo OSI.

Com as simulações realizadas é possível notar que a abordagem com relacionamento entre camadas reduz o consumo de energia nos nós. Esse ganho em eficiência foi conseguido evitando transições de estado desnecessárias e sincronizando as atividades realizadas. Outros fatores que também puderam ser evitados foram as colisões e o efeito da escuta ativa.

A organização dos intervalos de tempo em cada salto, o tamanho de cada intervalo de tempo e o relacionamento com a camada de aplicação reduzem o atraso relativo à geração da informação e a chegada ao nó sorvedouro.

O relacionamento cruzado entre camadas possibilitou otimizar o período de atividade dos nós melhorando o uso da energia do nós e contribuindo também para diminuir o atraso.

Porém, é apontado que essa abordagem é apropriada apenas para aplicações que apresentam o sensoriamento periódico, pois, requer da camada de aplicação sincronismo com as camadas de rede.

Como trabalhos futuros pode-se citar o estudo do impacto da mobilidade dos nós na arquitetura, ou nas arquiteturas com relacionamento cruzado entre camadas, o estudo de uma abordagem com relacionamento cruzado entre camadas relacionando a camada MAC com a camada de controle de topologia.

O estudo da abordagem como algoritmo de definição de grupos é bastante promissor, pois é possível usar o algoritmo para delimitar o tamanho dos grupos.

Pode-se mencionar como promissores trabalhos futuros temas como modulação adaptativa, aplicações e suas periodicidades, balanceamento de carga e outras métricas de QoS que não foram estudadas neste trabalho.

Aponta-se também possível estudo para definir um método para o cálculo do valor de d utilizando os tópicos relacionados na Figura 4.14.

Referências Bibliográficas

- [Araújo 2008]ARAÚJO, A. A. de. *Ambientes de simulação para redes de sensores sem fio*. Mossoró - Rio Grande do Norte: Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, 2008.
- [Barrett, Marathe e Drozda 2002]BARRETT, C.; MARATHE, A.; DROZDA, M. Characterizing the interaction between routing and MAC protocols in ad-hoc networks. In: *In Proceedings of the ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. Lausanne, Suíça: ACM, 2002. p. 92–103.
- [Bisdikian, Goeckel e Towsley 2010]BISDIKIAN, W. W. T. H.; GOECKEL, C.; TOWSLEY, G. Target tracking with packet delays and losses - qoi amid latencies and missing data. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PERVASIVE COMPUTING AND COMMUNICATIONS. *Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops)*. Dept. of Comput. Sci., Univ. of Massachusetts, Amherst, MA, USA, 2010.
- [Cordeiro e Agrawal 2006]CORDEIRO, C. de M.; AGRAWAL, D. P. *Ad-Hoc & Sensors Networks theory and applications*. Singapura: World Scientific, 2006.
- [Cui 2005]CUI, S. *Cross-layer optimization in energy constrained networks*. Tese (Doutorado) — Stanford University, Stanford, CA, 06 2005. Disponível em: <<http://ece.tamu.edu/~cui/publications/thesis.pdf>>.
- [Cui et al. 2005]CUI, S. et al. Joint routing, MAC, and link layer optimization in sensor networks with energy constraints. In: *ICC 2005*. South Korea: IEEE, 2005. p. 725–729.

- [Guimarães 2008]GUIMARÃES, M. C. R. *A implementação de um módulo HIP na ferramenta de simulação OMNeT++ para avaliação de desempenho de handoff*. Dissertação (Mestrado) — PUC-RIO (Pontifícia Universidade Católica-Rio de Janeiro), 04 2008.
- [Jurdak 2007]JURDAK, R. *Wireless Ad Hoc and Sensors Networks-A cross-layer design perspective*. Dublin - Irlanda: Springer, 2007.
- [Karl e Willig 2005]KARL, H.; WILLIG, A. *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. University of Paderborn, Alemanha: John Wiley & Sons, 2005. ISBN 0470095105.
- [Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L. 2010]LIBELIUM Co-
municaciones Distribuidas S.L. 05 2010. Disponível em:
<<http://www.libelium.com/products/waspmote>>.
- [Madan et al. 2005]MADAN, R. et al. Cross-layer design for lifetime maximization in interference-limited wireless sensor networks. In: *IEEE INFOCOM*. Miami - USA: IEEE, 2005. p. 1964–1975.
- [Mahalik 2007]Sensor networks and configuration, fundamentals, standards, platforms and applications. In: MAHALIK, N. P. (Ed.). Coreia do Sul: Springer, 2007. cap. Cross-layer Designs.
- [Matos, Brayner e Maia 2008]MATOS, T. B.; BRAYNER, A.; MAIA, J. E. B. Agregação e predição de dados em rede com precisão ajustável no processamento de consultas em redes de sensores sem fio. In: *SBBD '08: Proceedings of the 23rd Brazilian symposium on Databases*. Porto Alegre, Rio Grande do Sul ,Brasil: Sociedade Brasileira de Computação, 2008. p. 150–164.

- [Melodia, Vuran e Pompili 2006]MELODIA, T.; VURAN, M. C.; POMPILI, D. The state of the art in cross-layer design for wireless sensor networks. In: *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin - Alemanha: IEEE, 2006. v. 3883/2006. ISSN 978-3-540-34025-6.
- [MF Manual 2010]MF Manual. 05 2010. Disponível em: <<http://mobility-fw.sourceforge.net/manual/index.html>>.
- [Oceana Sensor 2010]OCEANA Sensor. 05 2010. Disponível em: <<http://oceanasensor.com/wirelessSensorProducts/>>.
- [OMNeT Manual 2010]OMNeT Manual. 05 2010. Disponível em: <<http://www.omnetpp.org/doc/omnetpp40/manual/usman.html>>.
- [Ruiz et al. 2004]RUIZ, L. B. et al. Arquiteturas para redes de sensores sem fio. In: *Anais do SBRC 2004*. Gramado, Rio Grande do Sul: SBRC, 2004.
- [Ruzzelli, O'Hare e Jurdak 2008]RUZZELLI, A. G.; O'HARE, G. M. P.; JURDAK, R. MERLIN: Cross-layer integration of MAC and routing for low duty-cycle sensor networks. *Ad Hoc Networks*, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, v. 6, n. 8, p. 1238–1257, 2008. ISSN 1570-8705.
- [Santi 2006]SANTI, P. *Topology Control in Ad Hoc and Wireless Sensor Networks*. Pisa-Itália: John Wiley & Sons, 2006.
- [Sichitiu 2004]SICHITIU, M. L. Cross-layer scheduling for power efficiency in wireless sensor networks. In: *IEEE INFOCOM 2004*. Hong Kong-China: IEEE, 2004.
- [Souto, Aschoff e Kelner 2007]SOUTO, E.; ASCHOFF, R.; KELNER, D. S. J. Projeto cross-layer entre as camadas MAC, roteamento e aplicação em redes de sensores sem fio. In: *Anais do SBRC 2007*. Belém-Pará: SBRC, 2007.

- [Srivastava 2005]SRIVASTAVA, V. Cross-layer design: A survey and the road ahead. In: *IEEE Communications Magazine*. New Jersey - USA: IEEE, 2005. p. 112–119.
- [Teixeira 2005]TEIXEIRA, I. *Roteamento com balanço de consumo de energia para redes de sensores sem fio*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 05 2005.
- [Van Hoesel, Nieberg e Havinga 2004]Van Hoesel, L.; NIEBERG, T.; HAVINGA, P. J. M. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks by cross-layer interaction. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, Nova Jersey - USA, 2004.
- [Varga e Hornig 2008]VARGA, A.; HORNIG, R. *An overview of the OMNeT++ simulation environment*. Budapeste - Hungria, 2008.
- [Wu, Luo e Xue 2006]WU, H.; LUO, Q.; XUE, W. Distributed cross-layer scheduling for in-network sensor query processing. *Pervasive Computing and Communications, IEEE International Conference on*, IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA, v. 0, p. 180–189, 2006.
- [Wu, Chen e Das 2008]WU, X.; CHEN, G.; DAS, S. K. Avoiding energy holes in wireless sensor networks with nonuniform node distribution. In: . Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2008. v. 19, n. 5, p. 710–720. ISSN 1045-9219.
- [Ye e Heidemann 2003]YE, W.; HEIDEMANN, J. *Medium Access Control in Wireless Sensor Networks*. California-USA, 10 2003.
- [Zuniga e Krishnamachari 2004]ZUNIGA, M.; KRISHNAMACHARI, B. Analyzing the transitional region in low power wireless links. In: *First Annual IEEE Communications*

Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks. Santa Clara, CA ,USA: IEEE, 2004. p. 517–526.

A O Simulador OMNeT++ e o módulo para mobilidade

A.1 Descrição

O OMNeT++ (*Objective Modular Network Testbed in C++*) é um simulador de eventos discretos orientado a objetos utilizado para modelagem de redes de comunicação. Possui arquitetura modular permitindo assim que novos módulos sejam acoplados a ele, sempre que novas funções forem necessárias como, por exemplo, a simulação de redes de sensores [OMNeT Manual 2010, Varga e Hornig 2008, Guimarães 2008].

Esse simulador foi desenvolvido por Andras Varga, impulsionado pela necessidade de produzir uma ferramenta de simulação de eventos discretos de código aberto que pudesse ser usada por pesquisadores para simulação de redes de computadores e sistemas distribuídos ou paralelos.

O OMNeT++ está disponível para as plataformas Linux, Mac OS/X e Windows, pode ser utilizado por instituições acadêmicas de ensino e pesquisa e por organizações de pesquisa sem fins lucrativos. Este simulador fornece aos usuários direitos semelhantes ao GNU-*General Public License*, o que permite que qualquer usuário possa modificar o OMNeT++ de acordo com seu propósito e também compartilhar suas modificações com a comunidade. Segundo [OMNeT Manual 2010], esse simulador pode ser utilizado em diversos domínios de problemas, tais como:

- Modelagem de redes de comunicação com e sem fio;
- Modelagem de protocolos;
- Modelagem de multiprocessadores e outros sistemas distribuídos de hardware;
- Validação de arquiteturas de hardware;
- Avaliação dos aspectos de desempenho de sistemas de software complexos;
- Modelagem e simulação de qualquer sistema onde a abordagem de eventos discretos seja apropriada.

A.1.1 Estrutura do OMNeT++

Quanto a estrutura, o OMNeT++ consiste de módulos que se comunicam através da troca de mensagens, esses podem ser classificados em módulos simples ou compostos. Os módulos simples, também chamados módulos ativos, são escritos em C++ usando as bibliotecas de classe de simulação. Esses podem ser agrupados, formando os módulos compostos.

A combinação de módulos simples e/ou módulos compostos aninhados hierarquicamente é denominada modelo. Um modelo representa a implementação de um sistema ou um protocolo que se deseja modelar [OMNeT Manual 2010].

Os módulos se comunicam através de mensagens que podem ser enviadas diretamente a um destinatário final ou a um caminho pré-definido, através de pontos de comunicação dos módulos. Tais mensagens podem conter estruturas complexas de dados de forma a garantir que informações necessárias às camadas adjacentes sejam preenchidas corretamente [OMNeT Manual 2010, Guimarães 2008].

Os módulos simples e compostos são instâncias de tipos de módulos. Enquanto descrevendo o modelo, o usuário define os tipos de módulos, instâncias desses tipos de módulos servem como componentes para tipos de módulos mais complexos. O usuário cria os módulos do sistema como um módulo da rede, que é um tipo especial de módulo composto sem portas para o mundo externo. Quando um tipo de módulo é usado para construção de blocos, não há a distinção se o mesmo é um módulo simples ou composto. Possibilitando ao usuário uma transparência na divisão de um módulo em vários módulos simples dentro de um módulo composto, ou reimplementando a funcionalidade de um módulo composto em um módulo simples, sem afetar a existência do uso dos tipos de módulos.

A estrutura de um modelo de simulação no OMNeT++, é descrita através da linguagem NED, que será apresentada na próxima seção.

A.1.2 A linguagem NED

A linguagem NED tem suporte a Descrição de Rede (*NED stands for Network Description*) e permite que os usuários declarem módulos simples e os agrupe em módulos compostos. O usuário pode classificar alguns módulos compostos como redes, os chamados modelos de simulação autônomos. Há também os canais que são outros tipos de componentes, cujas instâncias podem ser usadas como módulos compostos [OMNeT Manual 2010, Varga e Hornig 2008].

A linguagem NED possui várias características que permite que a mesma possa ser utilizada com sucesso em grandes projetos, tais características são elencadas a seguir:

- Hierarquia: como a introdução de hierarquias é a forma tradicional de lidar com a

complexidade, no OMNet++ qualquer modulo que seja muito complexo como uma única entidade pode ser quebrado em módulos menores e usado como um módulo composto;

- Baseada em Componentes: módulos simples e módulos compostos são inerentemente reutilizáveis, o que não reduz somente a cópia de código, mas permite a existência de bibliotecas de componentes, como por exemplo, o *INET Framework* e o *MiXiM*;
- Interfaces: interfaces de módulos e canais podem ser usadas como um espaço reservado, onde normalmente um tipo de módulo ou canal seria utilizado. O tipo de canal ou módulo concreto são determinados por um parâmetro como tempo de configuração da rede;
- Herança: módulos ou canais podem ser subclasses. Os módulos e canais derivados podem adicionar novos parâmetros, portas e novos submódulos e conexões.
- Pacotes: a linguagem NED apresenta uma estrutura como um pacote Java, para reduzir o risco de confrontos entre diferentes modelos. NEDPATH, similar ao CLASSPATH do Java, foi introduzida para tornar mais fácil especificar dependências entre os modelos de simulação;
- Tipos de entrada: são os tipos de canais e os tipos de módulos usados localmente por um módulo composto, pode ser definido dentro do módulo composto com o intuito de reduzir a poluição de espaço (*namespace*);
- Anotações de Metadados: é possível anotar os tipos de módulos ou canais, parâmetros, portas e submódulos através da adição de propriedades. Metadados não são usados diretamente pelo núcleo da simulação, mas podem carregar informações ex-

tras para várias ferramentas, como o ambiente de execução ou mesmo para outros módulos no modelo.

A.1.3 O módulo para mobilidade

O módulo para mobilidade (MF-*Mobility Framework*) foi desenvolvido como uma forma de inserir mobilidade ao OMNeT++ por vários pesquisadores do *Telecommunication Networks Group* na *Technische Universitaet Berlin*.

A primeira versão chamada FraSiMO, foi escrita por Heiko Sheunemann e Daniel M. Kirsch em 2001. Entre 2002 e 2003 essa versão foi revisada por Steffe Sroka, que reescreveu o módulo completamente para melhorar a integração e aumentar a velocidade (FraSiMOII) com o OMNeT++.

Em 2003, Marc Loebbers e Daniel Willkomm iniciaram o desenvolvimento da atual versão do MF, adicionando a manipulação de portas dinâmicas e iniciando a estruturação e documentação do código. Durante o processo de desenvolvimento do MF o *ChannelControl* e *Blackboard* foram completamente reescritos por Andreas Koepke.

O MF foi desenvolvido para suportar simulações de redes sem fio e redes móveis dentro do OMNeT++. O núcleo desse módulo implementa o suporte a mobilidade de nós, o gerenciamento de conexão dinâmica e um modelo de canal sem fio. Adicionalmente o também fornece ao usuário módulos básicos que podem ser utilizados e/ou derivados. Segundo [MF Manual 2010], o MF pode ser usado para simular redes sem fio fixas e móveis, redes centralizadas e distribuídas (*ad-hoc*), redes de sensores, multicanais para redes sem fio e outras simulações que necessitem de suporte a mobilidade e/ou uma interface sem fio.

A.2 Conceitos básicos

Nesta seção são apresentados conceitos básicos que estão por trás do MF, sendo introduzidas as funções relevantes dos módulos *Basic**. A classe *BasicModule*, por exemplo, é comum a todas as classes dos submódulos *Host*. A *BasicModule* em si é derivada da *cSimplemodule* e da *BlackboardAccess* do OMNeT++, que fornece a funcionalidade de subscrever e publicar informação no módulo *Blackboard* [MF Manual 2010].

Alguns dos conceitos básicos do MF são descritos a seguir:

- **Conceito de endereço:** usa os identificadores(ID) dos módulos do OMNeT++ para endereçamento no MF. O ID do módulo *nic* é usado como endereço MAC e o ID da *netwLayer* é utilizado como endereço da camada de rede ou como endereço da camada de aplicação.
- **Padrões de nomeação:** existem alguns padrões de nomeação para os módulos nos arquivos NED que são necessários seguir, caso os mesmos não sejam seguidos ocorrerá falhas de segmentação na execução do código. Por exemplo, todos os módulos *hosts* têm que incluir os caracteres *host* ou *Host* em alguma parte de seu nome.
- **Módulos *Basic**:** são derivados do *BasicModule* e são definidos para cada camada sendo extensíveis se necessário. A idéia é ter a possibilidade de facilmente estender ou adaptar os módulos de diferentes camadas aos requisitos específicos da simulação. Para este propósito existe as funções *handle*Msg()* e as funções *convenience*.
- **Funções *Handle*Msg()*:** contêm a funcionalidade do protocolo real, são chamadas cada vez que uma mensagem chega e contêm toda a informação necessária ao processamento e transmissão das mensagens.

B Publicações e trabalhos realizadas durante o curso

Durante o curso de mestrado em ciência da computação foram realizadas as seguintes publicações de trabalhos:

- CNPQ 2009 (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) – Projeto de pesquisa: Algoritmo de roteamento com relacionamento entre camadas para redes de sensores sem fio;
- EPOCA 2009 (2º Escola Potiguar de computação e suas Aplicações) – Abordagem com interação entre as camadas de aplicação, roteamento e MAC para redes de sensores sem fio;
- ITS 2010 (*7º International Telecommunications Symposium*) – *Cross-layer interaction between the application, Routing and MAC Layer for Wireless Sensor Networks*;
- MOMAG 2010 (14º SBMO Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 9º CBMag Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo) – Impacto do relacionamento cruzado entre camadas sobre o desempenho de redes de sensores sem fio.