



SINALIZAÇÃO PUB/SUB PARA APLICAÇÕES COM DIFERENTES
RESTRIÇÕES TEMPORAIS EM REDES DE ATUADORES E SENSORES SEM
FIO

Geisa Cristina Negrão Alves

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: José Ferreira de Rezende

Rio de Janeiro
Setembro de 2013

SINALIZAÇÃO PUB/SUB PARA APLICAÇÕES COM DIFERENTES
RESTRICÇÕES TEMPORAIS EM REDES DE ATUADORES E SENSORES SEM
FIO

Geisa Cristina Negrão Alves

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. José Ferreira de Rezende, Dr.

Prof. Flávia Coimbra Delicato, DSc.

Prof. Antonio Augusto de Aragão Rocha, DSc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2013

Alves, Geisa Cristina Negrão

Sinalização Pub/Sub para Aplicações com Diferentes Restrições Temporais em Redes de Atuadores e Sensores Sem Fio/Geisa Cristina Negrão Alves. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XII, 100 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: José Ferreira de Rezende

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 91 – 98.

1. Redes de Sensores sem Fio. 2. *Publish/Subscribe*.
3. Escalonamento Distribuído. 4. Sistemas de Tempo Real. 5. Redes de Sensores Compartilhadas. I. Rezende, José Ferreira de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Em memória de Aída e
José Belino Negrão.*

Agradecimentos

À turma ‘Cachinhos de Ouro’ da E. E. Cônego Teodomiro, à tia Maria de Lourdes, ao Francisco, Walter, Marcelo e Aída Negrão, onde tudo começou.

À minha família, em especial à minha mãe, Maria Lúcia, pelo suporte e incentivo que me deu no início dessa jornada.

Ao Fernando, por seus sacrifícios, pelo amor, paciência e apoio incondicionais, sem os quais não teria sido possível concluir mais esta etapa.

Aos meus antigos professores da Escola Federal de Engenharia de Itajubá, não só pelas bases do conhecimento, mas pela inspiração para trilhar meu próprio caminho.

Ao professor Rezende, pela orientação, aprendizado, amizade e confiança depositada.

À COPPE/UFRJ, PEE, PESC e seus professores e funcionários, em especial do GTA e LAND, pela oportunidade concedida, pela acolhida e aprendizado em todas as fases dessa caminhada.

À TRANSPETRO, gerentes e coordenadores que autorizaram a realização desse mestrado e disponibilizaram parte do tempo essencial à conclusão desse trabalho.

Aos amigos da TRANSPETRO, GTA e LAND, que inspiraram, auxiliaram, socorreram, contribuíram ou, de alguma forma, estiveram presentes. Sem esquecer dos meus velhos amigos que sempre esperaram por mim, “e o que disserem nossos dias serão para sempre”.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

SINALIZAÇÃO PUB/SUB PARA APLICAÇÕES COM DIFERENTES
RESTRICÇÕES TEMPORAIS EM REDES DE ATUADORES E SENSORES SEM
FIO

Geisa Cristina Negrão Alves

Setembro/2013

Orientador: José Ferreira de Rezende

Programa: Engenharia Elétrica

A existência de nós capazes de atuar no ambiente sensoriado propicia a distribuição das aplicações das redes de atuadores e sensores sem fio e a instauração de arquiteturas descentralizadas, permitindo a interação direta entre os nós. O uso do modelo de comunicação *publish/subscribe* na coordenação dessas interações facilita o compartilhamento de uma única rede por aplicações distintas. Contudo, quando tais aplicações possuem diferentes restrições temporais, o determinismo deve ser assegurado às comunicações de tempo real sem se contrapor à manutenção do compartilhamento e integração entre as aplicações da rede. Este trabalho propõe um esquema *publish/subscribe* para o controle das comunicações associado a uma camada de controle de acesso ao meio, que divide o superquadro em duas partes e reserva uma delas para transmissões síncronas de tempo real, enquanto a outra destina-se ao uso das interações *publish/subscribe* e da sinalização do escalonamento. O mecanismo de sinalização proposto utiliza o próprio *publish/subscribe* para realizar o escalonamento distribuído das transmissões síncronas. Seu desempenho é avaliado em termos de razão de entrega dos dados e atraso de entrega médio, além da análise do *overhead* adicionado.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PUB/SUB ASSIGNMENT FOR APPLICATIONS WITH DIFFERENT
TEMPORAL RESTRICTIONS IN WIRELESS SENSOR AND ACTUATOR
NETWORKS

Geisa Cristina Negrão Alves

September/2013

Advisor: José Ferreira de Rezende

Department: Electrical Engineering

The existence of nodes able to act on the sensed environment provides the distribution of applications in wireless sensor and actuator networks and the establishment of decentralized architecture, which makes it possible direct interaction between nodes. Using the publish/subscribe communication model for the coordination of these interactions, it facilitates the sharing of one network for different applications. However, when those applications show different time constraints, must be ensured determinism of real-time communications without objection to support the network share and the integration between its applications. This proposition suggests a publish/subscribe schema to communication control combined with a medium access control layer, whose superframe is divided into two periods. One of them is reserved for real-time synchronous transmissions, while the other is intended to publish/subscribe interactions and the scheduling assignment. The proposed assignment mechanism, based on the publish/subscribe paradigm, performs distributed scheduling of the synchronous transmissions. Its performance is evaluated in terms of delivery rate and average delay of deliveries, as well as analysis of the added overhead.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xi
Lista de Abreviaturas	xii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos	5
1.3 Organização da Dissertação	5
2 As Comunicações nas Redes de Atuadores e Sensores Sem Fio	7
2.1 Redes de Atuadores e Sensores Sem fio	7
2.1.1 Redes de Sensores Sem fio	7
2.1.2 Redes de Atuadores e Sensores Sem fio	10
2.1.3 RASSFs de Tempo Real	13
2.1.4 RASSFs com Diferentes Restrições Temporais	17
2.2 A Comunicação <i>Publish/Subscribe</i>	18
2.2.1 Modelo de Comunicação <i>Publish/Subscribe</i>	18
2.2.2 <i>Publish/Subscribe</i> nas RASSFs	21
2.3 Conclusões do Capítulo	24
3 Compartilhamento de RASSFs via <i>Publish/Subscribe</i>	25
3.1 Coordenação <i>Publish/Subscribe</i>	26
3.2 Controle de Acesso ao Meio	30
3.3 Escalonamento das Comunicações	33
3.3.1 Sinalização <i>Publish/Subscribe</i>	34
3.3.2 Reuso Espacial	41
3.3.3 Tabelas de Escalonamento	44
3.3.4 Escalonamento Hierárquico	47
3.4 Requisitos de Implementação e Uso	48
3.5 Conclusões do Capítulo	51

4	Avaliação da Proposta	52
4.1	Ambiente de Simulação	53
4.2	Mecanismo de Sinalização do Escalonamento	54
4.3	Comunicações Síncronas	58
4.4	Conclusões do Capítulo	63
5	Resultados	65
5.1	Cenários de Simulação	65
5.1.1	Geração da Topologia	66
5.1.2	Estabelecimento das RASSFs	68
5.2	Escalonamento <i>Publish/Subscribe</i>	71
5.2.1	Grau Máximo	71
5.2.2	Proporção de Nós Ativos	72
5.2.3	Alcance das Notificações de Escalonamento	74
5.2.4	<i>Overhead</i> do Escalonamento	76
5.3	Comunicação de Tempo Real	77
5.3.1	Grau Máximo	79
5.3.2	Proporção de Nós Ativos	80
5.3.3	Alcance das Notificações de Escalonamento	83
5.4	Conclusões do Capítulo	84
6	Conclusões	86
6.1	Conclusões do Trabalho	86
6.2	Trabalhos Futuros	89
	Referências Bibliográficas	91
A	Glossário	99

Lista de Figuras

1.1	Exemplo de Sistema que Integra Aplicações Distintas.	4
2.1	Arquitetura de Redes de Sensores Sem Fio.	8
2.2	Arquitetura Descentralizada de Redes de Sensores Sem Fio.	10
2.3	Arquitetura Automatizada de Redes de Atuadores e Sensores Sem Fio.	11
2.4	Estrutura de um Superquadro.	17
2.5	Dimensões de Desacoplamento <i>Publish/Subscribe</i> [1].	20
2.6	Formas de Interação <i>Publish/Subscribe</i> nas RASSFs.	22
3.1	Diagrama de Sequência de Coordenação <i>Publish/Subscribe</i>	27
3.2	Estrutura do Período de Comunicação.	30
3.3	Fluxograma de Coordenação para Diferentes Restrições Temporais.	32
3.4	Diagrama de Sequência do Mecanismo de Sinalização <i>Publish/Subscribe</i>	35
3.5	Reserva de Escalonamento a um Salto dos Nós Participantes.	42
3.6	Tabelas de Escalonamento Hierárquico.	48
4.1	Estrutura de Implementação do Nó no NS-2.	59
5.1	Grau dos Nós e Distância Média <i>Publisher-Subscriber</i>	67
5.2	Influência do Grau Máximo sobre as Métricas Estimadas.	72
5.3	Influência dos Percentuais de Nós Ativos sobre as Métricas Estimadas.	73
5.4	Influência do Alcance das Notificações de Escalonamento sobre as Métricas Estimadas.	75
5.5	Influência de H e do Grau Máximo sobre o <i>Overhead</i>	76
5.6	Composição do Atraso de Entrega Observado.	78
5.7	Influência do Grau Máximo sobre as Métricas Observadas.	80
5.8	Influência dos Percentuais de Sensores Ativos sobre as Métricas Observadas.	81
5.9	Influência dos Percentuais de Atuadores de Tempo Real Ativos sobre as Métricas Observadas.	82
5.10	Influência do Alcance das Notificações de Escalonamento sobre as Métricas Observadas.	83

Lista de Tabelas

3.1	Tabela de Escalonamento de um Nó.	46
4.1	Tabela de Escalonamento Simplificada de um Nó.	61
5.1	Principais Parâmetros de Simulação.	68

Lista de Abreviaturas

ACK	<i>Acknowledge</i> , p. 46
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i> , p. 5
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access</i> , p. 15
IFQ	<i>Interface Queue</i> , p. 61
MAC	<i>Media Access Control</i> , p. 61
NACK	<i>Not Acknowledge</i> , p. 46
NOAH	<i>No Ad-Hoc</i> , p. 53
QoS	<i>Quality of Service</i> , p. 13
RASSF	Rede de Atuadores e Sensores Sem Fio, p. 7
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio, p. 7
STDMA	<i>Spatial Time Division Multiple Access</i> , p. 15
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> , p. 5
WSAN	<i>Wireless Sensor and Actuator/Actor Network</i> , p. 7
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i> , p. 7

Capítulo 1

Introdução

As Redes de Atuadores e Sensores Sem Fio são redes de múltiplos saltos compostas por nós dotados de elementos capazes de realizar o sensoriamento do meio, denominados ‘nós sensores’, e um segundo tipo de nó, denominado ‘nó atuador’, que conta com elementos de interação destinados à produção de modificações no meio a partir das decisões de controle.

A coexistência de nós sensores e atuadores nas redes sem fio provoca uma mudança no paradigma de funcionamento dessas redes, de ‘sensoriamento-comunicação’ para ‘sensoriamento-reação’, uma vez que deixam de ter como seu principal objetivo a comunicação ao sorvedouro das informações obtidas pelo sensoriamento e passam a concentrar-se na produção de ações de resposta ao parâmetro sensoriado.

Nessas redes, os nós sensores e atuadores podem organizar-se segundo “arquiteturas automatizadas” que, conforme a definição de AKYILDIZ & KASIMOGU [2], exigem menor esforço de comunicação desde a publicação do dado até a notificação dos atuadores de destino, quando comparadas às arquiteturas “semi-automatizadas”, onde um sorvedouro faz a intermediação nas relações entre sensores e atuadores.

A distribuição das aplicações nas redes de atuadores e sensores sem fio que adotam arquiteturas automatizadas atribui aos próprios nós sensores e/ou atuadores a função de executar todo o processamento necessário às ações de controle, possibilitando a interação direta entre os nós e, com isso, o estabelecimento de rotas mais curtas e uma distribuição mais homogênea das comunicações. Com a delegação de tal atribuição aos sensores e atuadores, exige-se que os nós estabeleçam mecanismos para coordenar o encaminhamento dos dados produzidos pelos sensores para possibilitar que sejam entregues aos atuadores de destino.

Além da coordenação entre os nós, o paradigma ‘sensoriamento-reação’ pressupõe a existência de requisitos de temporalidade que devem ser atendidos para garantir a integridade das aplicações e a validade das decisões tomadas e ações executadas pelos atuadores. Tais requisitos estabelecem-se através de limites de tempo que

determinam se as informações recebidas pelos atuadores são consideradas aceitáveis.

Desta forma, o desempenho das redes de atuadores e sensores sem fio passa a ser medido não apenas por uma resposta qualitativamente correta, mas também como uma função do tempo decorrido desde o sensoriamento do ambiente até que a ação de resposta seja executada. Este tipo de aplicação enquadra-se, por definição, na categoria dos sistemas de tempo real.

Para garantir o atendimento a tais restrições temporais, essas redes devem estabelecer um comportamento determinístico em suas comunicações, de forma que assegurem a entrega dos dados aos nós atuadores dentro do atraso total esperado pelas aplicações. Como qualquer rede sem fio, as redes de atuadores e sensores sem fio estabelecem-se sobre um meio físico onde as comunicações ocorrem tipicamente em *broadcast* e seus nós compartilham um meio físico em comum. Portanto, a obtenção de tal comportamento determinístico requer o uso de mecanismos que viabilizem o compartilhamento e escalonamento deste recurso.

O acesso múltiplo livre de contenção minimiza os riscos de colisão que poderiam impedir a entrega dos dados e, quando baseado no particionamento do canal no tempo, também é capaz de conceder o determinismo temporal essencial às comunicações de tempo real. As técnicas de múltiplo acesso por divisão no tempo também possibilitam a otimização no uso do meio de comunicação através da sobreposição temporal das transmissões. Nesses casos, o reuso espacial dos enlaces de comunicação é obtido, dentre outras formas, através da aplicação de estratégias de escalonamento. Os escalonamentos, gerados de forma igualmente distribuída, devem manter uma relação de compromisso entre o reuso espacial desejado e o total das interferências presentes no meio de comunicação, refletindo nas chances de colisão admitidas durante as transmissões de tempo real.

1.1 Motivação

Operando segundo o paradigma ‘sensoriamento-reação’, as redes de atuadores e sensores sem fio devem cuidar da coordenação das interações diretas entre seus nós, além de observar a existência de limitações temporais impostas pelas aplicações. A escolha do modelo de comunicação a ser adotado por essas redes, portanto, deve considerar os tipos de aplicações que serão atendidas e suas restrições.

Nas redes de atuadores e sensores sem fio em geral, as aplicações se caracterizam como aplicações orientadas a eventos e as comunicações ocorrem sob demanda, sendo adequadas aos métodos probabilísticos de controle de acesso ao meio, que permitem melhor uso do canal de comunicação. Enquanto isso, nos sistemas de tempo real as aplicações que se utilizam da coleta regular de dados e apresentam baixa tolerância a atrasos e perdas, caracterizam-se pelo sincronismo das comunicações, requerendo

um comportamento determinístico, com mecanismos de compartilhamento de acesso ao meio que evitem as contenções, associados ao escalonamento das comunicações.

Há, portanto, duas formas distintas de atender aos diferentes tipos de aplicações através das redes de atuadores e sensores sem fio. Para as aplicações que não apresentam limites temporais, a coordenação dos nós pode ser estabelecida sobre mecanismos de acesso múltiplo com contenção, enquanto diante da existência de restrições de tempo, a preferência deve recair sobre modelos determinísticos, que priorizem o atendimento dos tempos de resposta e procurem evitar a ocorrência das colisões. A conciliação entre esses dois mecanismos através da divisão do período de comunicação já foi empregada em diversos tipos de redes, dentre os quais os mais conhecidos são os protocolos IEEE 802.11.e [3] e IEEE 802.15.4 [4].

Contudo, nas áreas que podem se beneficiar da utilização das redes de atuadores e sensores sem fio, é comum observar sistemas integrados, formados por conjuntos de aplicações distintas, que compartilham o mesmo espaço físico e apresentam uma composição heterogêna, com diferentes tipos de elementos sensores e atuadores, e limites temporais com níveis de criticidade distintos, sejam *hard*, *soft* ou *non-real-time*. Desse compartilhamento é esperada não apenas a mera coexistência das aplicações, mas uma possível interação entre elas, à medida em que compartilhem interesses em comum ou participem de sistema único e integrado, estabelecendo as chamadas redes de sensores compartilhadas [5].

Um exemplo de sistema integrado formado por aplicações distintas é apresentado na Figura 1.1. O exemplo representa um sistema de controle das condições ambientes de um conjunto de armazéns, que conta com diferentes tipos de sensores, que monitoram o ambiente interno de cada armazém, e equipamentos atuadores, que permitem controlar as características do ambiente de acordo com a necessidade do tipo de material armazenado em um dado momento.

Pode-se ter, nesse exemplo, para determinado tipo de material armazenado, duas aplicações trabalhando de forma conjunta no sistema para realizar o controle da temperatura interna e da umidade do ar de um armazém específico. A aplicação que controla a umidade do ar pode, então, utilizar-se das medidas da temperatura ambiente para determinar o tipo de equipamento que deve acionar a fim de reduzir a umidade presente no armazém, ao passo que a aplicação que controla a temperatura pode reconhecer as decisões da outra aplicação, de forma a manter a temperatura dentro dos valores especificados.

O mesmo deve ocorrer no exemplo da Figura 1.1 caso o tipo de material armazenado requeira adicionalmente a atuação de uma aplicação que mantenha a pressurização do local. Nesse caso, a aplicação de controle da pressão deve se relacionar com as demais, especialmente com o controle da umidade, tendo em vista a correlação existente entre essas duas variáveis. Apesar disso, dada a maior ve-

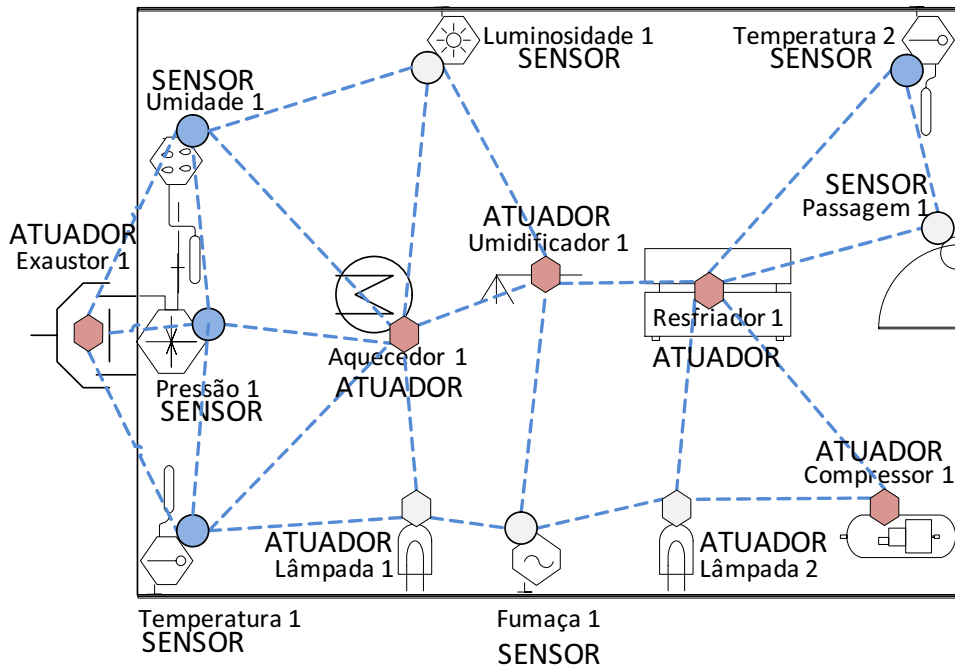


Figura 1.1: Exemplo de Sistema que Integra Aplicações Distintas.

localidade com que a medida da pressão se modifica quando comparado às demais variáveis, o controle de pressão requer tempos de resposta menores que as outras aplicações citadas, exigindo do sistema que as agrupe a capacidade de lidar com diferentes restrições temporais.

Este cenário coloca a necessidade de uma resposta mais completa do que a simples conciliação entre diferentes mecanismos de comunicação para atender os diversos tipos de aplicações e exige uma solução que permita que elas operem de forma integrada e compartilhem uma mesma rede de atuadores e sensores sem fio. Para permitir o compartilhamento de uma mesma rede de atuadores e sensores sem fio por tais aplicações, a rede em questão deve ser capaz de suportar diferentes restrições temporais.

O compartilhamento dessas redes por diferentes aplicações constitui-se um benefício que pode ser obtido com o uso do modelo de comunicação *publish/subscribe*, em virtude do anonimato das comunicações concedido por esse modelo. Este e os demais benefícios proporcionados pelos desacoplamentos de tempo e espaço, conforme definição de EUGSTER *et al.* [1], como sua natureza inerentemente *multicast* e sua capacidade de adaptação a ambientes dinâmicos, são de grande relevância para as redes de atuadores e sensores sem fio compartilhadas por aplicações com diferentes níveis de restrições temporais.

Entretanto, apesar de viabilizar o compartilhamento das redes de atuadores e sensores sem fio entre as aplicações, a influência exercida por um terceiro tipo de desacoplamento proporcionado pelo modelo *publish/subscribe*, denominado desaco-

plamento de sincronismo por EUGSTER *et al.* [1], vai de encontro às necessidades das aplicações de tempo real, pois compromete a obtenção de um comportamento determinístico, essencial ao atendimento das suas restrições temporais.

1.2 Objetivos

O objetivo desse trabalho é assegurar o atendimento aos requisitos de coordenação e temporalidade das aplicações com diferentes restrições temporais, proporcionando sua operação de forma integrada e o compartilhamento das Redes de Atuadores e Sensores Sem Fio.

Para isso, este trabalho considera a adoção de um esquema *publish/subscribe* para o controle descentralizado das comunicações das Redes de Atuadores e Sensores Sem Fio associada a uma camada de controle de acesso ao meio que reserva parte do período de comunicação para as transmissões síncronas das aplicações de diferentes restrições temporais. Através do mecanismo de sinalização distribuído proposto nesse trabalho, essas transmissões podem ser escalonadas e as aplicações com diferentes restrições temporais podem ter seus requisitos de coordenação e temporalidade atendidos.

A estratégia de controle de acesso ao meio considera a divisão do período de comunicação de forma a possibilitar o uso concomitante de dois métodos de múltiplo acesso: o CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance*) para a comunicação *publish/subscribe* e o TDMA (*Time Division Multiple Access*) para a comunicação de tempo real.

O mecanismo de sinalização distribuído, proposto neste trabalho com o objetivo de realizar o escalonamento das comunicações de tempo real, baseia-se no próprio modelo de comunicação *publish/subscribe*. Com isso, além de realizar o escalonamento das transmissões de tempo real de forma descentralizada, o mecanismo possibilita que seja mantida uma integração completa entre as aplicações nas redes de atuadores e sensores sem fio, mesmo em relação às aplicações *non-real-time*.

1.3 Organização da Dissertação

Este trabalho encontra-se dividido em seis capítulos. Os dois primeiros fazem a apresentação do assunto abordado, enquanto os demais capítulos apresentam a proposta do trabalho e a avaliação do seu desempenho através de simulações.

O conteúdo dos próximos capítulos foi organizado conforme a descrição a seguir:

- Capítulo 2 – apresenta as redes de atuadores e sensores sem fio e o modelo de comunicação *publish/subscribe*;

- Capítulo 3 – apresenta a proposta de compartilhamento das redes de atuadores e sensores sem fio via *publish/subscribe* e o mecanismo distribuído de sinalização do escalonamento;
- Capítulo 4 – apresenta a avaliação da proposta de comunicação *publish/subscribe* para as redes de atuadores e sensores sem fio e a validação do mecanismo desenvolvido para o escalonamento distribuído;
- Capítulo 5 – apresenta a análise dos resultados obtidos para as simulações;
- Capítulo 6 – apresenta as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

As Comunicações nas Redes de Atuadores e Sensores Sem Fio

Este capítulo conceitua as redes de atuadores e sensores sem fio, posicionando-as dentro das redes de sensores sem fio. Em associação aos conceitos discutidos, são apresentados alguns trabalhos da literatura de referência e os principais desafios ao funcionamento dessas redes.

Em seguida, é apresentado o modelo *publish/subscribe* e as propostas de redes de atuadores e sensores sem fio construídas sobre este paradigma de comunicação.

2.1 Redes de Atuadores e Sensores Sem fio

As redes RASSF (Redes de Atuadores e Sensores Sem Fio), ou no original WSAAN (*Wireless Sensor and Actuator Network*), constituem-se uma subdivisão das redes RSSF (Rede de Sensores Sem Fio), ou no original WSN (*Wireless Sensor Network*), na qual interagem diferentes tipos de nós, conforme descrito nas subseções a seguir.

2.1.1 Redes de Sensores Sem fio

As RSSFs são conjuntos de dispositivos inteligentes, denominados ‘nós sensores’, equipados com processador, memória, fonte de energia, um ou mais elementos sensores e um rádio, através do qual estabelece-se uma comunicação sem fio para a transferência de dados para um nó concentrador, denominado sorvedouro ou *sink*.

Essas redes foram projetadas para “coletar informações sobre o estado do mundo físico e transmitir os dados sensorizados aos usuários interessados” [6]. Os nós das RSSFs se organizam através de arquiteturas de múltiplos saltos, estabelecendo tipicamente arranjos como o representado na Figura 2.1. Em tais arquiteturas, os dados são coletados pelos nós sensores e roteados por meio da rede até o usuário final da informação, localizado no *sink* ou acessível através dele [7].

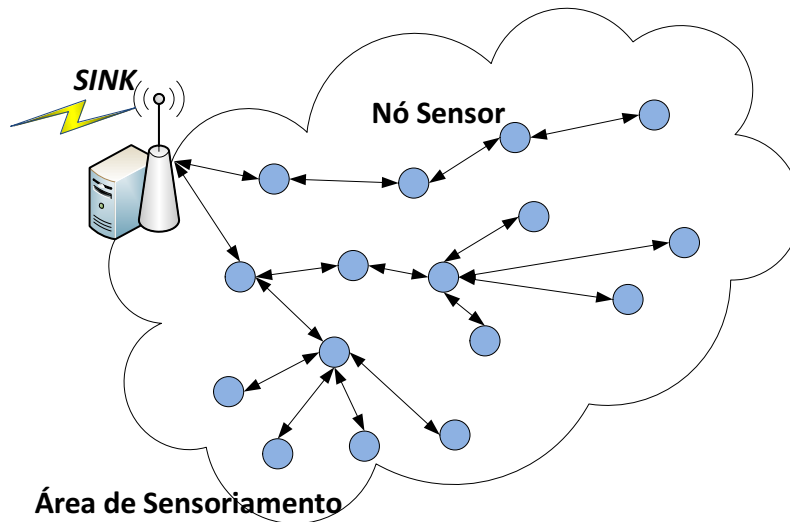


Figura 2.1: Arquitetura de Redes de Sensores Sem Fio.

O propósito inicial destas redes foi permitir o monitoramento de áreas remotas ou de difícil acesso, que dispõem de poucos recursos e exigem o emprego de grande quantidade de nós, impossibilitando o uso de redes tradicionais. Apesar dos nós dessas redes terem sido desenvolvidos para atuar como unidades autônomas, a soma dessas restrições impôs limitações à estrutura dos nós das RSSFs, que dispõem de uma quantidade reduzida de energia, pequeno alcance de comunicação e largura de banda, além de processamento e armazenamento exíguos [8].

A gama de aplicações que se desenvolveu sobre essas redes opera segundo o paradigma ‘sensoriamento-comunicação’. De acordo com este modelo, os dados gerados por elementos sensores de naturezas diversas, dentre as quais podemos citar: térmica, mecânica, magnética, ótica, acústica, química ou mesmo biológica, são transmitidos pelos nós da rede através de múltiplos saltos até o nó concentrador. Este nó, que exerce a função de concentrar as informações transmitidas pelos demais nós, caracteriza-se por uma maior capacidade de processamento e armazenamento, e/ou por um meio de acesso às redes externas.

As redes RSSFs possuem uma grande diversidade de aplicações e podem ser utilizadas para sensoriamento contínuo, detecção e identificação de eventos, sensoriamento de localização e controle local de atuadores [7], tendo sido inicialmente propostas em domínios onde as redes comuns não são convenientes [9] ou em razão da economia e flexibilidade que podem proporcionar [10]. Suas aplicações estendem-se por diversas áreas de interesse, como o monitoramento de ambientes (internos e externos), sísmico/estrutural, de energia, saúde, processos de automação, militares e diferentes tipos de rastreamento.

As redes de sensores sem fio podem ser classificadas de acordo com diferentes critérios. YICK *et al.* [8] propõem a classificação das RSSFs de acordo com a

existência de uma infraestrutura mínima de organização da rede. A disposição dos nós na área de sensoriamento tanto pode ser realizada de forma aleatória, quanto pode-se utilizar de uma avaliação para a predeterminação da totalidade ou dos principais nós que compõem a rede.

A disposição aleatória pelo abandono dos nós na área de interesse permite o estabelecimento de redes ‘não-estruturadas’ através das quais os nós executam suas funções de monitoramento e comunicação de forma autônoma. O posicionamento predeterminado dos nós sensores em redes ‘estruturadas’, por sua vez, possibilita a instalação de um menor número de nós e a redução dos custos de gerenciamento e manutenção da rede. Além disso, a disposição planejada dos nós permite a construção de topologias de rede para uma cobertura mais eficiente da área a ser monitorada e o estabelecimento de arquiteturas de maior complexidade, como as hierarquizadas.

Nas RSSFs ‘não-estruturadas’, os nós são capazes de, autonomamente, estabelecer topologias em ‘malha’, pois tendem a se interligar a todos os demais nós que estejam dentro de seu alcance de transmissão. A criação de RSSFs ‘estruturadas’, por outro lado, possibilita o estabelecimento de novas formas de organização topológica, projetadas para priorizar diferentes aspectos, como a cobertura de um espaço geográfico, o volume de tráfego previsto ou a vazão de dados suportada por cada nó. Assim, as RSSFs podem ser planejadas para se organizarem em diferentes níveis hierárquicos, onde os nós intermediários, também denominados *clusterheads*, supervisionam a geração de dados em uma subárea (ou *cluster*) e se responsabilizam pelo escoamento dos dados de seus nós até o *sink*.

Considerando ainda a organização das RSSFs, outra classificação possível diz respeito ao grau de centralização de rede. As redes de sensores sem fio, hierarquizadas ou não, podem contar com um único sorvedouro para todos os dados produzidos, sendo assim denominadas ‘centralizadas’, ou podem operar com múltiplos sorvedouros, dando origem a redes ‘descentralizadas’. A descentralização modifica o padrão de comunicação esperado, distribuindo pela rede os fluxos de dados produzidos pelo conjunto de sensores até cada um dos seus sorvedouros, conforme representado na Figura 2.2.

Outra forma de classificação das RSSFs leva em consideração a homogeneidade característica de seus nós. As redes ‘homogêneas’ são compostas por conjuntos de nós fisicamente idênticos, não apenas no que se refere ao tipo de processador, memória e rádio, como também aos elementos sensores em operação, desempenhando funções de sensoriamento e roteamento sem diferenciação. Ao contrário dessas, nas redes ‘heterogêneas’, os nós executam funções distintas entre si, que podem estar associadas a diferenças nas suas constituições físicas, como a capacidade de processamento, a potência de transmissão e os tipos de elementos sensores.

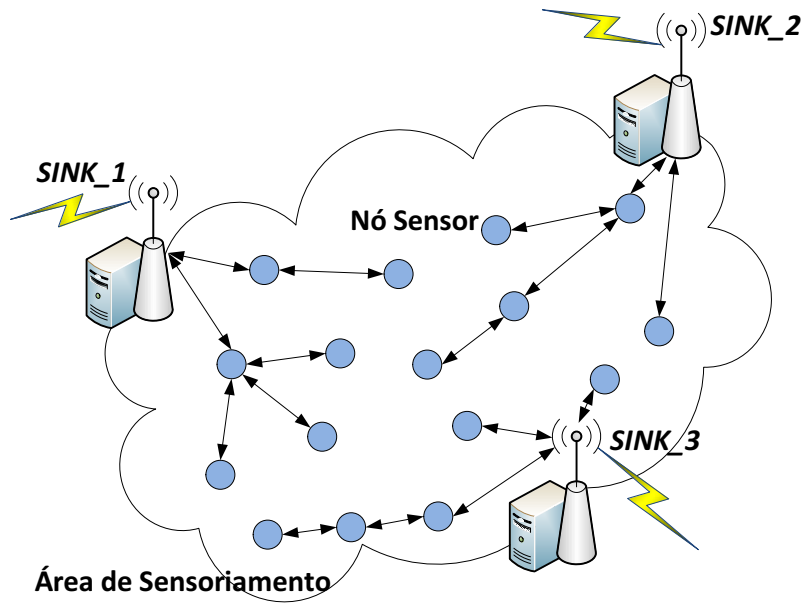


Figura 2.2: Arquitetura Descentralizada de Redes de Sensores Sem Fio.

Uma possível variação à classe das redes heterogêneas consiste na adoção de elementos de interação que atuam sobre o meio, em substituição aos elementos sensores de parte dos nós dessas redes, constituindo redes sem fio que suportam tanto sensoriamento quanto atuação. A próxima subseção define e descreve esta variação específica de RSSFs heterogêneas.

2.1.2 Redes de Atuadores e Sensores Sem fio

As RASSFs são formadas por conjuntos de dispositivos inteligentes, equipados com rádio, processador, memória, fonte de energia e um elemento de interação com o meio, que se interligam e trocam dados entre si através de enlaces de comunicação sem fio. Os nós dotados de elementos capazes de realizar o sensoriamento do meio são denominados ‘nós sensores’, ao passo que aqueles cujos elementos de interação são capazes de produzir modificações no meio a partir das decisões de controle são denominados ‘nós atuadores’.

A literatura também adota, com frequência, a nomenclatura ‘*Wireless Sensor and Actor Networks*’, referindo-se às entidades que podem agir sobre a rede como ‘atores’. Na definição de AKYILDIZ & KASIMOGLU [2], os “atores tomam decisões e executam ações apropriadas sobre o ambiente, o que permite ao usuário efetivamente sensoriar e atuar a distância”. Outros trabalhos, como é o caso de MELODIA *et al.* [11], utilizam o termo ‘ator’ para diferenciar a entidade de rede e o conversor do sinal de controle elétrico em ação física.

Os nós ‘atuadores’, ou ‘atores’, caracterizam-se por um maior poder computacional e de capacidade de comunicação, bem como maior disponibilidade energética

quando comparado aos nós sensores [6]. Eles são formados por uma unidade decisora, responsável por processar os dados recebidos dos nós sensores, e por um elemento atuador, que produz as modificações no meio baseado nas ações de controle definidas pela unidade de decisão, além dos demais componentes que também formam os nós sensores.

A presença desses nós entre os nós sensores provoca a mudança no paradigma de funcionamento das RSSFs, uma vez que seu objetivo primordial deixa de ser a comunicação das informações obtidas pelo sensoriamento ao sorvedouro e concentra-se na produção de ações de resposta ao parâmetro sensoriado. Desta forma, o paradigma ‘sensoriamento-comunicação’, representado pelas etapas de observação do meio físico, transmissão dos dados e processamento na entidade central, é suplantado pelo ‘sensoriamento-reação’, que foca na tomada de decisões baseada nas observações e na execução de ações apropriadas sobre o sistema, em resposta aos eventos ou dados sensorizados. Esse comportamento reativo das interações e a disponibilização de informações segundo a demanda são característicos nas aplicações orientadas a eventos.

Conforme representado na Figura 2.3, a arquitetura das redes de atuadores e sensores sem fio pode contar com a presença, além dos nós que interagem com o meio físico, de sorvedouros que têm como objetivo de realizar o monitoramento global das RASSFs e sua interface com o mundo externo, bem como, se necessário, intermediar a comunicação entre nós sensores e atuadores. Nas aplicações que demandam a participação do sorvedouro para centralizar a coleta de dados e coordenar o processo de atuação, a arquitetura da rede foi denominada ‘Semi-Automatizada’ por AKYILDIZ & KASIMOGLU [2], enquanto as arquiteturas que possibilitam a interação direta e descentralizada entre os dois tipos de nós recebeu a denominação de ‘Automatizada’.

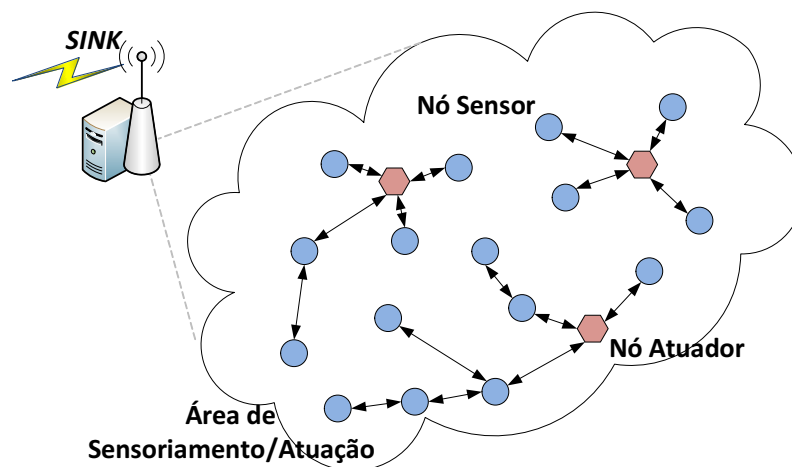


Figura 2.3: Arquitetura Automatizada de Redes de Atuadores e Sensores Sem Fio.

Sob o ponto de vista da coordenação das interações entre sensores e atuadores, as

RASSFs organizadas de forma “automatizada” devem exigir um menor esforço de comunicação desde a publicação de um dado até a notificação dos atuadores de destino, quando comparadas às arquiteturas “semi-automatizadas”. Devido à distribuição das aplicações nas RASSFs, os próprios nós sensores e/ou atuadores devem executar todo o processamento necessário às ações de controle, possibilitando a interação direta entre os nós nas arquiteturas “automatizadas” e, com isso, o estabelecimento de rotas mais curtas e uma distribuição mais homogênea das comunicações.

As arquiteturas “semi-automatizadas”, nas quais as interações entre sensores e atuadores ocorrem por intermédio de um nó concentrador, em contrapartida, aumentam o esforço de comunicação com a possível ampliação das rotas de encaminhamento e maior disputa pelo acesso ao meio, devido à concentração das comunicações ao redor do sorvedouro. Os trabalhos [10, 12–21] adotam este tipo de arquitetura com centralização das comunicações entre os nós sensores e atuadores, de forma total ou parcial, através de um ou mais sorvedouros. Dentre as desvantagens desta centralização destacadas por AKYILDIZ & KASIMOGLU [2] estão: o aumento no atraso de entrega dos dados, em função da maior distância percorrida pelos dados ao passar pelo *sink*, e o consumo desbalanceado de recursos, decorrente do maior fluxo de dados nas proximidades do(s) sorvedouro(s).

Com a migração dessas arquiteturas para as “automatizadas”, a interação direta entre sensores e atuadores faz da coordenação das comunicações uma incumbência dos próprios nós da rede. Esta nova atribuição requer que nós sensores e atuadores estabeleçam mecanismos para coordenar o encaminhamento dos dados produzidos pelos sensores para possibilitar que sejam entregues aos atuadores de destino.

Diferentes formas de coordenação das comunicações entre os nós foram utilizadas nos trabalhos que adotam arquiteturas “automatizadas” com a descentralização total ou parcial das comunicações, como em [11, 22–40]. Propostas como a de NGUYEN & GIORDANO [31] consideram que nós sensores e atuadores trocam informações de forma direta e sem intermediários, enquanto outros trabalhos, como [11, 22, 24, 26, 29, 30, 36, 38], utilizam-se da clusterização dos sensores ao redor dos nós atuadores, associada a mecanismos distintos de coordenação entre atuadores. Em [30], MUNIR & FILALI adotam enlaces exclusivos para a coordenação atuador-atuador, ao passo que BARBARÁN *et al.* [26] elegem uma liderança para o ‘*supercluster*’ formado pelos nós atuadores e os trabalhos de MELODIA *et al.* [11], YUAN *et al.* [24] e ABBASI *et al.* [37], propõem diferentes formas de negociação entre esses nós.

Além da coordenação entre os nós, o paradigma ‘sensoriamento-reação’ pressupõe a existência de requisitos de temporalidade que devem ser atendidos para garantir a integridade das aplicações e a validade das decisões tomadas e ações executadas pelos atuadores. Tais requisitos estabelecem-se através de limites de tempo

que determinam se as informações recebidas pelos nós atuadores são consideradas aceitáveis. Por esse motivo, AKYILDIZ & KASIMOGLU [2] afirmam que “dependendo da aplicação, pode haver a necessidade de responder rapidamente à entrada de um sensor e, além disso, os dados dos sensores recolhidos e entregues ainda devem estar válidos no momento de atuar”.

Desta forma, o desempenho das RASSFs passa a ser medido não apenas por uma resposta qualitativamente correta, mas também como uma função do tempo decorrido desde a observação do meio físico até que a ação de resposta seja executada. Este tipo de aplicação enquadra-se, por definição, na categoria dos sistemas de tempo real.

2.1.3 RASSFs de Tempo Real

Segundo LAPLANTE [41], “um sistema de tempo real é aquele cuja corretude envolve simultaneamente a precisão lógica de suas saídas e sua conveniência temporal”.

Estes sistemas são, portanto, classificados em níveis de criticidade de acordo com as garantias de atendimento às restrições temporais exigidas pelas aplicações. KAVI *et al.* [42] definem dois níveis de exigências às restrições temporais: ‘*hard real-time*’ e ‘*soft real-time*’. Ambos possuem limites temporais a serem respeitados, contudo o primeiro é atribuído àqueles sistemas nos quais uma falha temporal pode levar ao colapso do seu funcionamento, enquanto no segundo o não cumprimento de restrições de tempo de resposta conduz a quadros de degradação de desempenho, por vezes imperceptíveis. Complementarmente às classificações supracitadas, podem-se designar os sistemas que não impõem exigências temporais como ‘*non-real-time*’ ou ainda ‘*best effort*’, conforme a terminologia adotada em trabalhos de QoS (*Quality of Service*).

Assim, nas RASSFs de tempo real é relevante conhecer os parâmetros que servirão de referência para a avaliação de sua consistência temporal, como os tempos iniciais de publicação dos dados e de sua recepção no destino. Neste trabalho, as seguintes definições de tempo são adotadas:

- Tempo de sensoriamento – representa o período necessário para que o nó realize o sensoriamento do meio físico e o processamento das informações obtidas;
- Tempo de atuação – compreende, além do processamento das informações recebidas através da rede e do comando oriundo da decisão resultante do processamento, a própria alteração de estado gerada pela interação com o meio;
- Atraso de entrega – composição dos tempos transcorridos nas diversas fases observadas na transmissão da informação de um nó sensor até um nó atuador, considerando não apenas o tempo usado na transmissão do dado, mas também

os atrasos decorrentes da espera em filas e *buffers* no nó sensor e ao longo do caminho;

- Atraso total – composição dos tempos transcorridos nas diversas fases observadas na comunicação da informação, incluindo o atraso de entrega, além dos tempos de sensoriamento e de atuação.

Naqueles sistemas onde as aplicações requerem atualizações de dados periódicas, outro parâmetro de interesse para a consistência temporal nas RASSFs é a ‘frequência de atualização’ dos dados. Este parâmetro corresponde ao intervalo de tempo entre duas publicações sucessivas de um nó sensor, o qual é estipulado pela própria aplicação a partir da sua demanda de atualização. Na sua definição, pode-se tomar como referência tanto o instante inicial do ‘tempo de sensoriamento’ quanto do ‘tempo de transmissão’, uma vez que os atrasos decorrentes de filas, *buffers* ou processamentos estão compreendidos no ‘atraso total’ da comunicação.

Além disso, muitas aplicações não operam de forma contínua e ininterrupta, tornando desnecessária a manutenção das suas atualizações periódicas em conjunto com as demais aplicações ativas. Para uma maior eficiência do uso dos recursos, as aplicações podem informar seu ‘tempo de validade’, indicando aos nós sensores quando a atualização dos dados pode ser interrompida.

Dessas definições, temos que a escolha do modelo de comunicação a ser adotado nas RASSFs deve levar em consideração, além das restrições impostas pelas aplicações, a forma e frequência na qual as informações serão disponibilizadas. Enquanto nas redes de atuadores e sensores sem fio em geral, as aplicações se caracterizam como aplicações orientadas a eventos e as comunicações ocorrem sob demanda, nos sistemas de tempo real as aplicações que se utilizam da coleta regular de dados e apresentam baixa tolerância a atrasos e perdas, caracterizam-se pelo sincronismo das comunicações.

Assim, para garantir o atendimento a tais restrições, as RASSFs devem estabelecer um comportamento determinístico em suas comunicações, de forma que assegurem a entrega dos dados aos nós atuadores dentro do atraso total esperado pelas aplicações. Como qualquer rede sem fio, estas redes estabelecem-se sobre um meio físico onde as comunicações ocorrem tipicamente em *broadcast* e seus nós compartilham um meio físico em comum. Portanto, a obtenção de tal comportamento determinístico requer o uso de mecanismos que viabilizem o compartilhamento e escalonamento deste recurso.

Os mecanismos de compartilhamento controlam o acesso ao meio para que todos os nós tenham uma oportunidade de realizar suas transmissões. As técnicas de múltiplo acesso existentes são aplicadas a partir de uma entidade central ou de forma distribuída, e adotam estratégias de controle que podem estar sujeitas ou não

à contenção. Ambas asseguram os recursos necessários à transmissão dos nós, entretanto nem todas são capazes de oferecer o determinismo e garantir o atendimento às restrições temporais requerido pelas RASSFs de tempo real.

Quando sujeitas à contenção, as técnicas de múltiplo acesso apresentam um comportamento não-determinístico, uma vez que a aleatoriedade e as colisões que lhe são intrínsecas impossibilitam afiançar não só os atrasos como, eventualmente, a própria entrega dos dados. Apesar disso, os métodos probabilísticos de controle de acesso ao meio, como o CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*), apresentam entre suas principais vantagens um melhor aproveitamento no uso do canal, evitando o desperdício de recursos quando a carga de tráfego das aplicações que o utilizam não exige regularidade na disponibilização do meio.

O múltiplo acesso livre de contenção minimiza os riscos de colisão que poderiam impedir a entrega dos dados e, quando baseado no particionamento do canal no tempo, também é capaz de conceder o determinismo temporal essencial às comunicações de tempo real. Um tradicional método de múltiplo acesso que emprega essa estratégia para determinar as transmissões que terão o direito de uso do meio a cada momento é o TDMA.

As técnicas de múltiplo acesso por divisão no tempo possibilitam a otimização no uso do meio de comunicação através da sobreposição temporal das transmissões. Nestes casos, tais técnicas passam a receber a denominação de STDMA (*Spatial Time Division Multiple Access*) e o reuso espacial dos enlaces de comunicação é obtido, dentre outras formas, através da aplicação de estratégias de escalonamento.

Na definição de RAMANATHAN & LLOYD [43], o escalonamento é “uma sequência de *slots* de tempo de tamanho fixo, onde cada possível transmissão é atribuída a um *slot* de tempo de tal modo que as transmissões designadas para um mesmo intervalo de tempo não colidam”.

As políticas de escalonamento, em geral, estão voltadas à definição dos nós ou dos enlaces de comunicação que serão atribuídos a cada um dos seus *slots*. Quando é adotada uma política de escalonamento dos nós, o escalonamento assegura aos nós o direito de transmitir os dados a quaisquer dos seus vizinhos. Neste caso, é possível observar apenas a ocorrência de ‘interferências primárias’, quando um nó participa de mais de uma comunicação ao mesmo tempo [44]. Quando os próprios enlaces são escalonados, os *slots* relacionam os pares de nós transmissores e receptores que participarão da comunicação, possibilitando adicionalmente a ocorrência de ‘interferências secundárias’, ocasionadas pela recepção não intencional de outras transmissões.

De forma geral, a transmissão e recepção dos dados será bem sucedida quando a potência do sinal recebido for suficiente em relação ao ruído e às interferências geradas pelas transmissões simultâneas nas redes sem fio [45]. Portanto, para qualquer

que seja a política de escalonamento adotada, o estabelecimento do reuso espacial do canal de comunicação requer a observância das interferências presentes no meio de comunicação. Entretanto, o escalonamento de diversas transmissões simultâneas e o correspondente aumento no reuso espacial, eleva naturalmente a quantidade de sinais interferentes presentes no meio. Deve existir, assim, um compromisso entre o reuso desejado e o somatório de interferências admitido, refletindo nas chances de colisão durante as transmissões ou, quando inadmissíveis, na obtenção de escalonamentos completamente livres de colisão.

A literatura que trata do escalonamento de enlaces em redes sem fio apresenta diversos tipos de solução para estabelecer o reuso espacial do canal de comunicação. Baseados nas definições de interferência e escalonamento de nós apresentadas em [43], diversas soluções adotam em seus escalonamentos a premissa de que “se um *slot* de tempo é atribuído a um nó, então nenhum dos vizinhos de dois saltos do nó pode ser designado para o mesmo *slot*” [46]. Contudo, verifica-se que, com a sobreposição temporal das transmissões advinda do reuso espacial e o consequente aumento dos sinais interferentes, tal medida apresenta um caráter meramente estimativo, especialmente quando as topologias de rede e as distâncias entre os nós são irregulares. Por isso, algumas propostas de algoritmos de escalonamento, como [47–49], apresentam soluções que consideram a ocorrência dessa interferência entre as transmissões.

A maioria das propostas existentes na literatura aborda o problema do escalonamento de forma centralizada, realizado por uma entidade central que detém o conhecimento global da rede, como é o caso de [47, 49, 50]. Dentre as propostas que adotam uma abordagem descentralizada, na qual mecanismos distribuídos utilizam informações disponíveis localmente nos nós, destacam-se entre os mais citados os trabalhos de WANG *et al.* [48] e RHEE *et al.* [51].

Os autores de [48] apresentam sugestões de algoritmos distribuídos que tratam o escalonamento de enlaces através da coloração de grafos, pressupondo o conhecimento dos enlaces interferentes. RHEE *et al.* [51], por sua vez, utilizam um mecanismo baseado em uma máquina de estado que, a partir de informações da topologia local, garante a inexistência de transmissões simultâneas a até dois saltos de distância do usuário do *slot*. Para assegurar esse resultado, cada nó deve aguardar pela anuência de todos os vizinhos de primeiro salto antes de efetivar a reserva do *slot* e comunicar sua vizinhança de até dois saltos, desencadeando o envio de um número significativamente elevado de mensagens. Apesar de proporcionar um escalonamento livre de colisões, essa proposta contempla o escalonamento de um único *slot* para cada nó.

No que se refere à troca de dados entre sensores e atuadores através de redes sem fio com restrições temporais, as propostas existentes na literatura tratam a questão

de coordenação das comunicações de diferentes formas. Os trabalhos [12, 30, 32, 52, 53] sugerem abordagens livres de contenção associadas ao escalonamento das comunicações, enquanto [16, 34, 35] escolheram estratégias de escalonamento sem propor um mecanismo que resolva em definitivo o problema da contenção, quando múltiplos nós requerem o acesso simultâneo ao meio. Por outro lado, em [11, 24–26] observa-se propostas alternativas ao escalonamento das comunicações.

Dentre as diferentes estratégias de escalonamento, MUNIR & FILALI [30] atribuem aos atuadores a responsabilidade pela coordenação dos sensores dos seus respectivos *clusters* e, por conseguinte, a responsabilidade pelo seu escalonamento. Em [53], os autores consideram que o escalonamento da comunicação entre sensores e atuadores é obtido a partir do roteamento de fluxo para cada atuador. Nos trabalhos de OZAKI *et al.* [16] e DEMIRBAS *et al.* [34], por sua vez, quando a existência de conflitos é detectada, adota-se como solução o reposicionamento sequencial dos eventos concorrentes.

2.1.4 RASSFs com Diferentes Restrições Temporais

Há, portanto, duas formas distintas de atender aos diferentes tipos de aplicações através das redes de atuadores e sensores sem fio. Para as aplicações que não apresentam limites temporais, a coordenação dos nós pode ser estabelecida sobre mecanismos de múltiplo acesso com contenção, enquanto diante da existência de restrições de tempo, a preferência deve recair sobre os mecanismos livres de contenção.

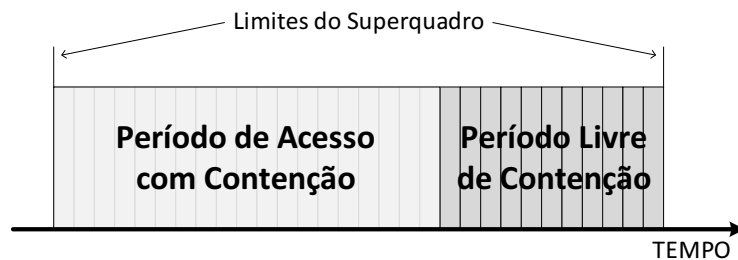


Figura 2.4: Estrutura de um Superquadro.

A conciliação entre esses dois mecanismos através da divisão do período de comunicação é uma solução empregada por diversos esquemas de comunicação para permitir a priorização de fluxos de dados em vários tipos de redes. As soluções mais conhecidas são os protocolos IEEE 802.11.e [3] e IEEE 802.15.4 [4]. Em comum, essas propostas consideram o particionamento do tempo de comunicação em ciclos, conhecidos como superquadros, tal como representado na Figura 2.4, e a subdivisão desses superquadros em dois períodos: um com disputa de acesso ao meio e outro livre de contenção, no qual a coordenação do acesso é feita por agentes da rede ou mecanismos distribuídos.

Entretanto, conforme destacado por AKYILDIZ & KASIMOGLU [2], as aplicações que podem se utilizar das RASSFs compõem sistemas como vigilância de campo de batalha e controle de microclima em edifícios, detecção de ataques nucleares, químicos e biológicos, automação residencial e monitoramento ambiental. Como sistemas integrados, eles podem ser formados por conjuntos de aplicações distintas, com diferentes composições de elementos sensores e atuadores, que podem apresentar, ou não, diferentes tipos de restrições temporais.

Deste modo, a necessidade de dividir uma mesma RASSF deriva não apenas da sua coexistência espacial, mas principalmente da demanda pela interação, em maior ou menor proporção, entre suas partes componentes. BHATTACHARYA *et al.* [54], XU *et al.* [55] e WU *et al.* [56] destacam ainda que, quando comparada às redes dedicadas a aplicações exclusivas, as redes compartilhadas podem ser mais vantajosas e mais flexíveis, por permitir “o compartilhamento de recursos entre aplicações e alocação dinâmica de recursos em resposta a mudanças no ambiente e às necessidades do usuário” [55].

Nesse contexto, EFSTRATIOU [57] aponta que “a visão para a futura geração de redes de sensores é de um mundo onde a infraestrutura de sensoriamento é um recurso compartilhado que pode ser dinamicamente reaproveitado e reprogramado para suportar múltiplas aplicações”.

Este cenário coloca a necessidade de uma resposta mais completa do que a simples conciliação entre diferentes mecanismos de comunicação para atender diferentes tipos de aplicações e exige uma solução que permita a essas aplicações operar de forma conjunta e compartilhando uma mesma rede de atuadores e sensores sem fio.

2.2 A Comunicação *Publish/Subscribe*

A comunicação *publish/subscribe* estabelece uma forma de interação entre dois tipos de agentes, um capaz de expressar seu interesse em uma informação (ou classe de informações), sendo notificado quando os agentes geradores de dados publicam uma informação que combina com o interesse registrado. As próximas subseções descrevem o modelo de comunicação e sua aplicabilidade nas RASSFs.

2.2.1 Modelo de Comunicação *Publish/Subscribe*

O *Publish/Subscribe* é um dos mecanismos de interação existentes capazes de modelar aplicações orientadas a eventos. Este mecanismo implementa um modelo de comunicação no qual os diferentes nós de uma rede podem assumir ao menos um entre os papéis de *publisher* ou *subscriber*, os quais executam funções complementares entre si.

Os *subscribers* têm a função de manifestar seu interesse em um evento, ou padrão de eventos, para registro e comparação frente às especificações dos eventos gerados pelos *publishers*. Estes, além de publicarem eventos, em alguns casos também possuem a função de anunciar os tipos de eventos que virão a produzir. As publicações cujas especificações combinam com os interesses registrados são, por fim, entregues aos *subscribers* através de ‘notificações’ de eventos.

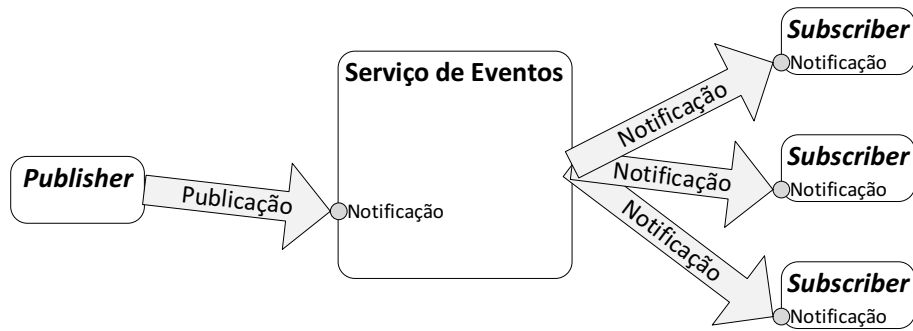
Dentre as principais características desse modelo de comunicação destacadas por EUGSTER *el at.* [1] e HUANG & GARCIA-MOLINA [58] estão a troca de eventos entre *publishers* e *subscribers* de maneira assíncrona, o anonimato das comunicações, sua natureza inerentemente *multicast* e sua capacidade de adaptação a ambientes dinâmicos. HUANG & GARCIA-MOLINA destacam ainda que essa combinação única de características faz do *publish/subscribe* um modelo adequado para várias áreas de aplicação, como a disseminação distribuída de dados, a automação industrial e as redes móveis.

O esquema básico para as interações *publish/subscribe* apresentado por EUGSTER *el at.* [1] consiste num serviço de notificação de eventos que gerencia os interesses registrados e as notificações de eventos. Esse serviço executa o papel de mediador entre *publishers* e *subscribers*, registrando os interesses recebidos na forma de ‘subscrições’ de eventos e direcionando as notificações produzidas pelos *publishers* para os devidos *subscribers*. Sem conhecer os produtores das informações desejadas, os *subscribers* se inscrevem diretamente ao serviço de eventos, que retém os interesses registrados. De forma similar, as notificações enviadas pelos *publishers* são interceptadas pelo serviço de eventos, que se encarrega de encaminhá-las a todos os *subscribers* interessados.

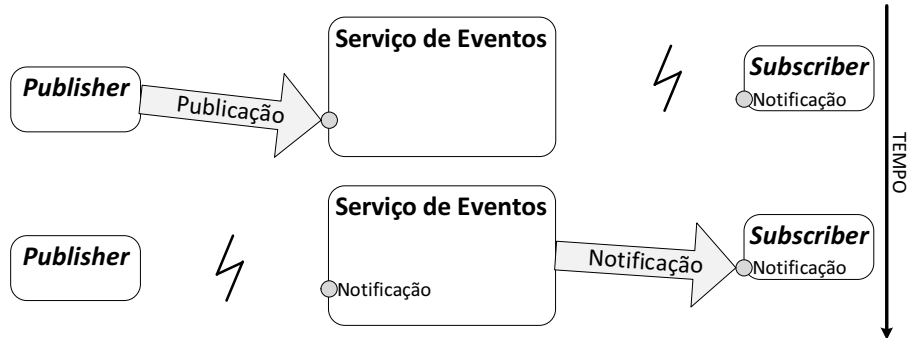
O modo como os *subscribers* realizam suas subscrições é definido com base na forma de especificação dos eventos e dos interesses dos nós. Os eventos podem ser especificados por uma simples palavra-chave ou por um conjunto de propriedades representadas por pares ‘atributo-valor’. As subscrições, por sua vez, podem realizar comparações diretas entre as palavras-chave ou um subgrupo dos atributos presentes nas propriedades dos eventos, fazendo uso de operadores de comparação básica, como =, <, ≤, > e ≥, ou operações mais complexas, podendo adotar eventos compostos, nos quais filtros restritivos são associados a combinações lógicas (*AND*, *OR*, etc.) para avaliação da correlação entre os eventos.

Conforme destacado por EUGSTER *el at.* [1], o diferencial deste modelo de comunicação está no desacoplamento completo de espaço, tempo e sincronismo, representado na Figura 2.5, que ele proporciona entre os agentes envolvidos na comunicação.

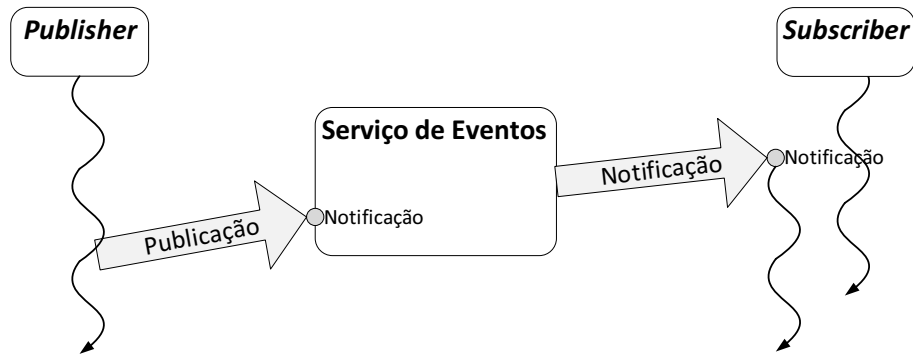
Caracteristicamente, este modelo de comunicação permite que as partes interajam sem conhecimento dos agentes envolvidos na comunicação, tendo como re-



(a) Desacoplamento de Espaço.



(b) Desacoplamento de Tempo.



(c) Desacoplamento de Sincronismo.

Figura 2.5: Dimensões de Desacoplamento *Publish/Subscribe* [1].

ferência tão somente as informações disponibilizadas através dos anúncios e subscrições. Desta forma, tanto *publishers* quanto *subscribers* não necessitam guardar referências sobre suas contrapartes, limitando-se a manter em suas tabelas de roteamento apenas os vizinhos de primeiro salto que participam da comunicação. Esta particularidade é chamada de ‘desacoplamento de espaço’ e encontra-se representada na Figura 2.5(a). Esse anonimato na relação entre as partes envolvidas na comunicação permite o recebimento de informações relevantes por um agente, independentemente do nó que o produziu, bem como viabiliza o compartilhamento de uma mesma rede por diferentes aplicações que apresentem interesses em comum e utilizem um mesmo espaço geográfico.

As comunicações governadas por este mecanismo, igualmente, não exigem que

as entidades envolvidas participem da interação no mesmo instante de tempo, constituindo-se no ‘desacoplamento de tempo’ representado na Figura 2.5(b). Isso lhe confere a capacidade de lidar com ambientes operacionais que estão em constante mudança [58], possibilitando que *subscribers* sejam notificados mesmo quando os *publishers* dos eventos estejam fora da rede, em um estado de dormência ou desconectados. Da mesma forma, as publicações podem ocorrer ainda que na ausência dos *subscribers*.

Este mecanismo permite, por fim, que as comunicações entre os agentes aconteçam de forma assíncrona, uma vez que “a produção e o consumo de eventos não ocorrem no fluxo principal de controle dos *publishers* e *subscribers*” [1] ou, nas palavras de [58], que “o *publisher* não precisa esperar por uma resposta de reconhecimento do *subscriber* antes de prosseguir”. Portanto, o chamado ‘desacoplamento de sincronismo’, representado na Figura 2.5(c), permite que as interações se sucedam sem a necessidade dos agentes envolvidos interromperem a execução de outras funções para participar da comunicação, por exemplo para o envio ou a espera por respostas de reconhecimento.

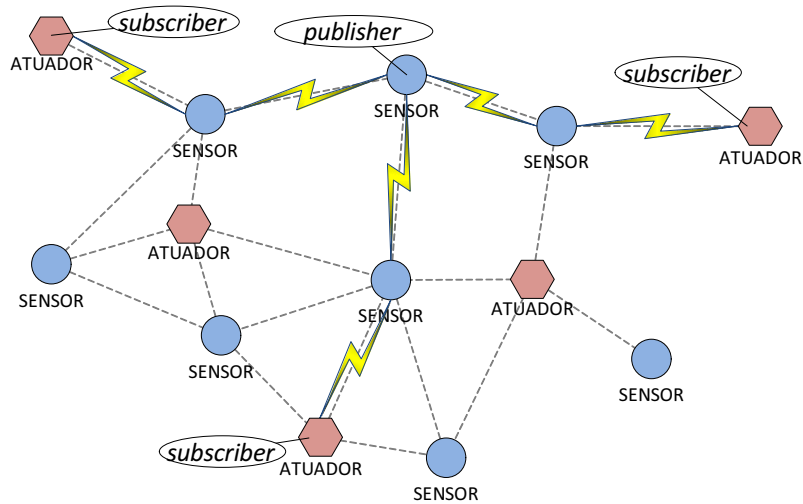
Esse serviço de notificação de eventos não requer, contudo, uma implementação estritamente centralizada, onde os *publishers* enviam mensagens para uma entidade específica, que as armazena e encaminha aos *subscribers* mediante o recebimento dos pedidos de subscrição. Ele também pode ser implementado através de “primitivas de comunicação que aplicam mecanismos de registro e encaminhamento nos processos dos *publishers* e dos *subscribers*, de forma que a comunicação exiba um comportamento assíncrono e anônimo para a aplicação, sem a necessidade de uma entidade intermediária” [1]. Assim, para permitir que o *publish/subscribe* opere de forma distribuída, deve existir um conjunto de primitivas que proveja o registro, nos diversos agentes envolvidos na comunicação, das informações necessárias para que as mensagens enviadas sejam corretamente entregues nos seus destinos. Isso tudo sem comprometer os desacoplamentos de espaço, tempo e sincronismo.

2.2.2 *Publish/Subscribe* nas RASSFs

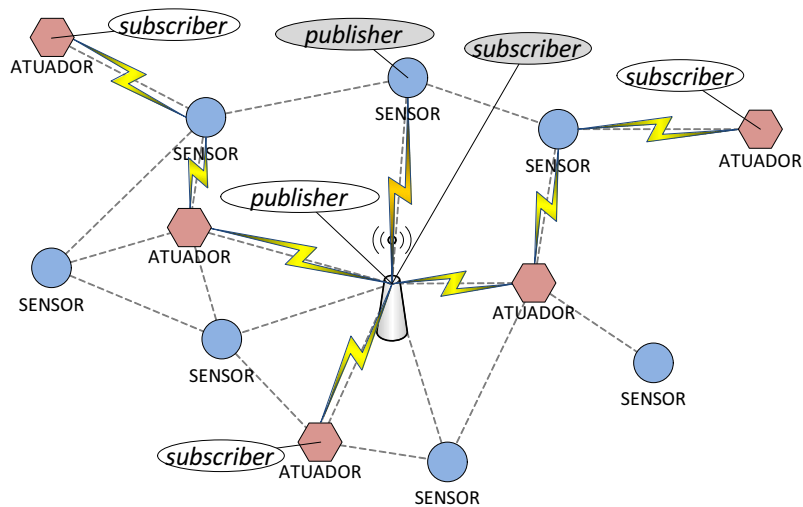
A adoção do modelo de comunicação *publish/subscribe*, em função das três dimensões de desacoplamento que proporciona, simplifica o processo de coordenação entre os nós nas RASSFs. A coordenação das interações, contudo, é fortemente dependente da arquitetura utilizada pela rede de atuadores e sensores sem fio: “automatizada” ou “semi-automatizada”, conforme a definição adotada na Subseção 2.1.2.

Neste nível de abstração, o paradigma *publish/subscribe* se incumbem de definir os nós da rede que, em última instância, atuarão como produtores ou consumidores de informação e a forma como os diferentes agentes se relacionarão.

Em geral, os papéis dos agentes nas RASSFs são claramente distribuídos entre os nós: os sensores atuam como *publishers* e os atuadores como *subscribers*. Em situações excepcionais, contudo, um sensor pode necessitar de dados fornecidos por outros nós da rede, por exemplo, para gerar uma informação consistente e, assim, atuar como *subscriber* dos dados adicionais. Da mesma forma, os atuadores de uma RASSF podem operar como *publishers* quando compartilham informações diante da necessidade de coordenação entre os atuadores.



(a) Arquiteturas “Automatizadas”.



(b) Arquiteturas “Semi-Automatizadas”.

Figura 2.6: Formas de Interação *Publish/Subscribe* nas RASSFs.

Deste modo, temos que nas arquiteturas “automatizadas” os sensores comumente operam como *publishers* de informações, que são encaminhadas através de diferentes caminhos aos atuadores (*subscribers*), cujas subscrições coincidem com os atributos dos dados publicados. Nas arquiteturas “semi-automatizadas”, entretanto, o destino imediato da informação publicada pelos sensores (*publishers* de uma dada RASSF)

é o sorvedouro da rede, que atua como *subscriber* de todos os dados publicados e, por conseguinte, como *publisher* das informações a serem encaminhadas para os atuadores (*subscribers* da RASSF). As Figuras 2.6(a) e 2.6(b) exemplificam, respectivamente, as arquiteturas e as interações entre sensores e atuadores das RASSFs “automatizadas” e “semi-automatizadas”.

Na literatura das RSSFs, talvez a proposta de comunicação *publish/subscribe* mais conhecida seja o protocolo ‘*Directed Diffusion*’, proposto originalmente por INTANAGONWIWAT *et al.* em [59]. Em [60], foram apresentados três diferentes modos de comunicação para este protocolo: ‘*Two-Phase Pull*’, ‘*One-Phase Pull*’ e ‘*Push*’, que se diferenciam basicamente pela omissão ou adoção das mensagens de divulgação de dados e interesses, consideradas opcionais para o paradigma *publish/subscribe*.

O *Directed Diffusion* é um protocolo centrado em dados e projetado para a disseminação de informações vizinho-a-vizinho em redes de sensores sem fio. Entretanto, apesar de ser um protocolo facilmente adaptável às redes de atuadores e sensores sem fio, sua proposta não se aplica a demandas de comunicação que necessitem observar o cumprimento de prazos.

Na literatura das RASSFs, os trabalhos [33, 36, 39] apresentam soluções para o controle descentralizado através de comunicações por múltiplos saltos coordenadas pelo paradigma *publish/subscribe*, sem atribuir alcances de transmissão diferentes para os dois tipos de nós: sensores e atuadores. Outros trabalhos propuseram a utilização do *publish/subscribe* para a coordenação das comunicações nas RASSFs, contudo, sem optar pela completa descentralização das ações de controle. É o caso das propostas de PRINSLOO *et al.* [17] e MATTHYS *et al.* [21], que consideram formas centralizadas de controle, enquanto BOUKERCHE *et al.* [27] e BRANCH *et al.* [19] apresentam soluções distintas de clusterização, onde as decisões são parcialmente descentralizadas nos próprios atuadores ou em múltiplas entidades concentradoras integradas à rede.

O trabalho de TAHERIAN *et al.* [33] propõe um *middleware* que utiliza o modelo *publish/subscribe* para a disseminação de eventos pela RASSF e máquinas de estado que processam predicados geradores de eventos. O paradigma *publish/subscribe* é implementado através de um protocolo de comunicação baseado em localização, que associa os locais de ocorrência a seus eventos e delimita áreas de publicação e subscrição.

Em [36], os autores propõem um controle descentralizado utilizando o modelo *publish/subscribe*. É apresentada uma solução *soft-state* clusterizada e hierárquica na qual cada *cluster* estabelece uma rede *publish/subscribe* independente, que é representada pelo seu *clusterhead* na comunicação inter-*cluster* global. No seu esquema de comunicação, a existência de uma lista de identificadores dos destinatários de cada

notificação permite o encaminhamento das mensagens de três modos: para todos os *subscribers*, para apenas um destino no próximo salto ou para somente um destino de próximo salto em cada subgrupo pré-estabelecido.

RUSSELLO *et al.* [39] também adotam o modelo *publish/subscribe* para coordenar as comunicações em sua proposta de controle descentralizado. Nesse trabalho, um *middleware* composto por um agente *publish/subscribe* e um gerenciador de políticas promove a separação do comportamento interativo de sensoriamento-reação das funcionalidades básicas da RASSF. O gerenciador de políticas de cada nó avalia todas as interações entre agentes e entre agente-aplicação, empregando regras seletivas através de um modelo de programação proposto, denominado ‘*Event-State-Condition-Action*’ (ESCAPE). O agente de comunicação gerencia os interesses e subscrições dos nós, implementados através do protocolo *Directed Diffusion* nos modos *Push* ou *One-Phase-Pull*, dependendo de características de cada implementação, como o número de nós sensores da rede.

2.3 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foram apresentadas as redes de atuadores e sensores sem fio e suas principais características, diferenciando-as e classificando-as dentro do grupo das redes de sensores sem fio heterogêneas.

Operando segundo o paradigma ‘sensoriamento-reação’ e organizadas em arquiteturas “automatizadas”, essas redes devem cuidar da coordenação das interações diretas entre seus nós, além de observar a existência de limitações temporais impostas pelas aplicações. A escolha do modelo de comunicação a ser adotado por essas redes deve considerar os tipos de aplicações que serão atendidas e suas restrições.

Para as RASSFs que não apresentam restrições temporais, métodos probabilísticos de controle de acesso ao meio permitem melhor uso do canal de comunicação. Para as RASSFs de tempo real deve ser observado um comportamento determinístico, com mecanismos de compartilhamento de acesso ao meio, preferencialmente livres de contenção, associados ao escalonamento da comunicação, guardando-se uma relação de compromisso entre o reuso do canal e os sinais interferentes presentes no meio de comunicação.

Este capítulo também apresentou o *publish/subscribe* e suas três dimensões de desacoplamento (espaço, tempo e sincronismo), que fazem deste um modelo adequado para comunicações orientadas a eventos das RASSFs e que possibilitam a essas redes serem compartilhadas por aplicações distintas.

Capítulo 3

Compartilhamento de RASSFs via *Publish/Subscribe*

Este capítulo apresenta a proposta de compartilhamento de redes de atuadores e sensores sem fio por aplicações com diferentes níveis de restrições temporais utilizando o modelo *publish/subscribe*.

Conforme mencionado no Capítulo 2, nas áreas que podem se beneficiar da utilização das RASSFs, é comum observar que aplicações que compartilham o mesmo espaço físico, apresentam certo grau de heterogeneidade, tanto no que se refere aos tipos de elementos sensores e atuadores que utilizam, quanto no que tange à existência de limites temporais com níveis de criticidade distintos, quais sejam *hard*, *soft* ou *non-real-time*. Desse compartilhamento é esperado não apenas a mera coexistência, mas uma possível interação entre as aplicações, à medida em que elas compartilhem interesses em comum ou participem de sistema único e integrado.

O compartilhamento de uma mesma rede por diferentes aplicações constitui-se um benefício que pode ser obtido com o uso do *publish/subscribe*, em virtude do desacoplamento de espaço concedido pelo modelo. Esse e os demais benefícios proporcionados pelos desacoplamentos de tempo e espaço, conforme discutido na Seção 2.2, são de grande relevância para as RASSFs compartilhadas por aplicações com diferentes níveis de restrições temporais. Entretanto, o desacoplamento de sincronismo, que também é oferecido por esse modelo, vai de encontro às necessidades das aplicações de tempo real, que requerem um comportamento determinístico das suas comunicações.

Por sua vez, conforme tratado na Seção 2.1, o determinismo e o atendimento aos limites de tempo esperados pelas aplicações que apresentam restrições temporais podem ser obtidos através da utilização de mecanismos de múltiplo acesso como o TDMA, ou sua variante STDMA (*Spatial TDMA*), que permite a otimização no uso do meio de comunicação através do escalonamento das comunicações pela sobreposição temporal das transmissões, de forma a evitar a ocorrência de colisões.

Assim, visando assegurar o atendimento aos requisitos de coordenação e temporalidade das aplicações com diferentes restrições temporais, proporcionando sua integração e o compartilhamento das redes de atuadores e sensores sem fio, a proposta desse trabalho considera a adoção de um esquema *publish/subscribe* para o controle descentralizado das comunicações das RASSFs associada a uma camada de controle de acesso ao meio que reserva parte do período de comunicação para as transmissões síncronas das aplicações com restrições temporais.

Para realizar o escalonamento das comunicações de tempo real, este trabalho propõe um mecanismo de sinalização descentralizado e baseado no próprio modelo *publish/subscribe*, que aproveita as mensagens de coordenação das interações para tomar conhecimento da topologia local e das demandas de escalonamento, e a partir delas, gerar as reservas de *slots* da tabela de escalonamento, que serão comunicadas a todos os vizinhos a até $2H$ saltos, através de um novo tipo de mensagem introduzido pelo mecanismo.

A Seção 3.1 apresenta como o modelo *publish/subscribe* é utilizado para estabelecer o compartilhamento das redes de atuadores e sensores sem fio entre aplicações distintas, incluindo aquelas com diferentes restrições temporais.

Na Seção 3.2 é apresentada a estratégia de controle de acesso ao meio que preconiza a divisão do período de comunicação para permitir o uso concomitante de dois métodos de múltiplo acesso e que, associada ao *publish/subscribe*, objetiva permitir o compartilhamento das RASSFs por aplicações com diferentes restrições temporais.

Na Seção 3.3 são descritas a proposta de sinalização *publish/subscribe* para o escalonamento das comunicações e a forma como o mecanismo proposto mantém a integração das diferentes demandas temporais das aplicações.

A Seção 3.4 encerra o capítulo com uma discussão sobre os requisitos necessários para a implementação da proposta deste trabalho, bem como os requisitos de uso das aplicações que a solução proposta apresenta-se apta a atender.

3.1 Coordenação *Publish/Subscribe*

Nas redes de atuadores e sensores sem fio organizadas sob arquiteturas “automatizadas”, nós sensores e atuadores interagem diretamente sem recorrer à intermediação de nós concentradores, tornado-se os próprios responsáveis pela coordenação das comunicações. Através do modelo *publish/subscribe* é possível implementar um mecanismo de estabelecimento da comunicação para coordenar as interações nas RASSFs organizadas sobre arquiteturas “automatizadas”.

O paradigma *publish/subscribe* é descrito em detalhes na Seção 2.2. Complementarmente, esta seção apresenta como esse paradigma pode ser utilizado para coordenar, de forma distribuída e anônima, as interações entre os nós nas redes

de atuadores e sensores sem fio, e permitir seu compartilhamento entre diferentes aplicações. A Figura 3.1 apresenta um diagrama de sequência que demonstra as mensagens e as relações *publish/subscribe* adotadas para esse fim.

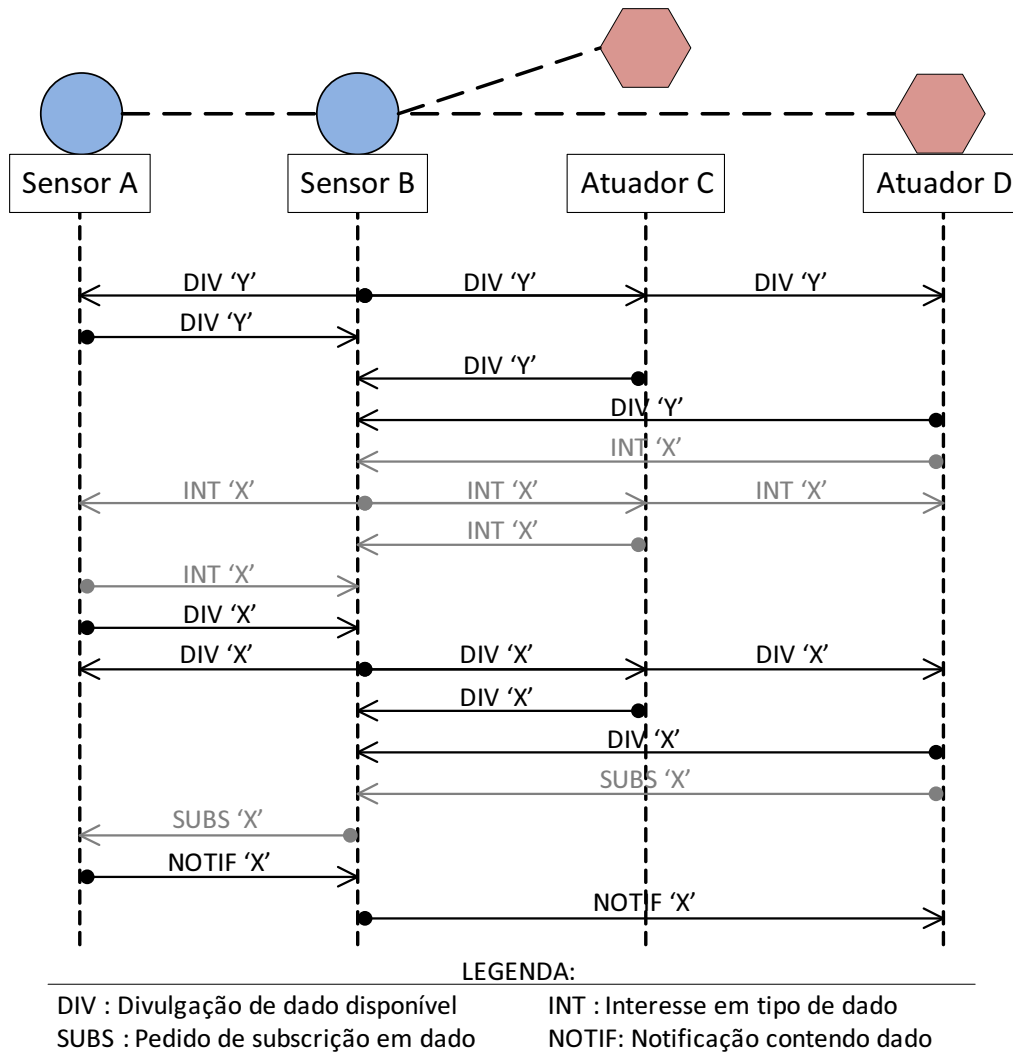


Figura 3.1: Diagrama de Sequência de Coordenação *Publish/Subscribe*.

A coordenação das interações nas RASSFs através do *publish/subscribe*, passa inicialmente pela divulgação, para toda a rede, das informações disponíveis para publicação e dos interesses existentes nas aplicações em funcionamento. O início dessas divulgações ocorre de forma aleatória, à medida que os sensores são ativados na rede ou de acordo com o surgimento da demanda em cada aplicação.

Como uma medida de reforço, os atuadores e sensores podem repetir, a intervalos esparsos e igualmente aleatórios, as divulgações dos seus interesses e publicações disponíveis, como forma de assegurar que os últimos nós a tomarem parte na rede disponham das mesmas informações que os primeiros. Tal medida, associada à flexibilidade de início das divulgações, possibilita que os nós disponham as informações necessárias para iniciar a comunicação entre *publishers* e *subscribers* sempre que

tenha origem uma nova demanda.

Os nós (normalmente atuadores) que possuem o interesse em receber uma informação disponibilizada por outro nó da rede (geralmente um sensor), ao identificarem uma informação de interesse, devem encaminhar seu pedido de subscrição através da própria rede sem fio. E, caso a necessidade da informação não se estenda de forma permanente, o pedido de subscrição deve carregar, junto das suas demais especificações, o tempo de validade daquele interesse.

Uma vez cientes da existência dos interesses, os sensores responsáveis pela produção das informações correspondentes realizam a publicação dos dados, que são encaminhados através da RASSF até sua entrega às aplicações que originaram o pedido de subscrição, estabelecendo um fluxo de dados fim a fim entre sensor e atuador. A publicação de dados continua indefinidamente, seguindo sua frequência de atualização, até que o elemento seja retirado de operação ou enquanto não houver expirado a validade daquela subscrição.

Tal como mencionado por EUGSTER *et al.* [1], o modelo *publish/subscribe* cuida do encaminhamento distribuído das notificações através de primitivas de comunicação que utilizam mecanismos de registro e encaminhamento. Por meio deles, os nós intermediários localizados no caminho entre o *publisher* e o(s) *subscriber(s)* daquela informação reconhecem que, em um dado momento, receberão uma mensagem de notificação por meio de um dos seus vizinhos e que deverão reencaminhá-la para que chegue ao(s) nó(s) de destino. Estes mecanismos estabelecem-se quando os nós recebem uma solicitação de subscrição e, apesar de possivelmente não reconhecerem o *subscriber* que a originou, tornam-se cientes de que farão parte da rota de encaminhamento daquela informação.

No diagrama de sequência da Figura 3.1, os sensores ‘A’ e ‘B’ são *publishers* dos dados ‘X’ e ‘Y’, respectivamente, enquanto o atuador ‘D’ apresenta interesse no dado ‘X’. Ao reconhecer a disponibilidade do dado desejado, o atuador ‘D’ encaminha seu pedido de subscrição, que é atendido pelo sensor ‘A’ com a publicação e o encaminhamento da mensagem de notificação que contém o dado ‘X’. Nessa interação sensor-atuador, o sensor ‘B’ executa o papel de nó intermediário, encaminhando o pedido de subscrição em direção ao *publisher* e aguardando pela notificação do dado ‘X’ para encaminhá-la na direção do seu *subscriber*.

O modo como os nós intermediários encaminham as notificações, mas também como são realizadas as combinações entre interesses e publicações, determina como o mecanismo estabelece a criação dos fluxos de dados entre sensores e atuadores. Em função do anonimato envolvido nas comunicações desde as combinações de interesses, os fluxos de dados gerados a partir de um *publisher* formam uma ou mais árvores de notificações, que recebem novas ramificações a cada novo pedido de subscrição recebido pela rede. Assim, no diagrama da Figura 3.1, se o atuador ‘C’ vier a se subs-

crever posteriormente ao dado ‘X’, a mesma notificação recebida e reencaminhada pelo sensor ‘B’ será capaz de atender a ambos os atuadores, ‘C’ e ‘D’.

A manutenção do anonimato nas relações entre os nós, proporcionado pelo paradigma *publish/subscribe*, possibilita, portanto, que diversas aplicações presentes em um mesmo espaço físico sejam capazes de realizar não só o compartilhamento físico das RASSFs como também seu compartilhamento lógico.

As transmissões das mensagens de controle trocadas com o objetivo de estabelecer as combinações entre interesses e publicações, como mencionado anteriormente, são iniciadas de forma probabilística e, portanto, adequadas aos métodos de múltiplo acesso sujeitos a contenção. Além de representar um uso mais eficiente do meio, como as mensagens de divulgação adotam métodos de inundação das RASSFs, o risco da mensagem de controle ter todas suas cópias perdidas é reduzido.

Para as aplicações de tempo real, é concedido o mesmo tratamento dado às mensagens de controle, inclusive àquelas que carregam os pedidos de subscrição. Suas divulgações de interesses e seus pedidos de subscrição, contudo, devem transportar, além das especificações das informações de interesse, parâmetros que confirmem a necessidade de atendimento a restrições temporais e determinem os níveis de criticidade exigidos pelas aplicações (*hard*, *soft* ou *non-real-time*).

Desta forma, quando tal combinação entre interesse e publicação é estabelecida, o *publisher* reconhece que suas notificações terão requisitos temporais a cumprir. Entretanto, como o mecanismo *publish/subscribe* não poderá ser utilizado para as notificações de tempo real, em função do desacoplamento de sincronismo, caberá aos *publishers* adequar suas notificações a outro método capaz de prover o determinismo necessário a essas comunicações.

A estratégia adotada nesta proposta para conciliar as diferentes demandas temporais das RASSFs, descrita na Seção 3.2, consiste na divisão da comunicação em períodos e na reserva de uma parcela de cada um desses períodos para que os nós da rede transmitam de forma síncrona as notificações que atendem às restrições temporais. Assim, caberá aos *publishers* iniciar o escalonamento dessas transmissões que ocuparão a parte síncrona do período de comunicação para que sejam entregues aos respectivos *subscribers* de forma determinística.

A Seção 3.3 descreve como os *publishers* e os demais nós das redes de atuadores e sensores sem fio realizam o escalonamento distribuído das comunicações de tempo real e os detalhes do mecanismo de sinalização *publish/subscribe* proposto neste trabalho.

3.2 Controle de Acesso ao Meio

Para atender às diferentes demandas temporais das aplicações que compartilham e se sustentam em uma mesma RASSF, o mecanismo de controle de acesso ao meio utilizado por essas redes deve suportar tanto a comunicação probabilística, característica das técnicas de múltiplo acesso sujeitas à contenção, quanto a comunicação determinística, observada nos métodos de acesso múltiplo por divisão de canal.

Nos métodos de múltiplo acesso por divisão no tempo, o período de comunicação síncrona é dividido em quadros temporais, que se subdividem em compartimentos menores denominados *slots* de tempo. A ocupação ordenada desses *slots* pelas transmissões determinísticas é definida pelo mecanismo que realiza o escalonamento das comunicações de tempo real. Em virtude da separação espacial entre os nós que participam de diferentes comunicações, esse mecanismo pode determinar o uso simultâneo de um mesmo *slot* para transmissões distintas. O método de múltiplo acesso por divisão no tempo que possibilita tal simultaneidade é denominado STDMA (*Spatial TDMA*) e será utilizado neste trabalho visando a otimização de uso do meio através do reuso espacial da RASSF.

Dada a existência concomitante das comunicações de tempo real e de transmissões que não requerem determinismo e apresentam um padrão de tráfego probabilístico, em uma mesma rede de atuadores e sensores sem fio, a proposta deste trabalho considera a adoção de uma estratégia de controle de acesso ao meio, na qual o período recorrente de comunicação, denominado ‘superquadro’, é dividido ao meio e uma dessas parcelas é destinada às transmissões com contenção, enquanto a outra é reservada para as comunicações escalonadas nos respectivos *slots* de tempo, a exemplo da estrutura utilizada pelos protocolos IEEE 802.11.e[3] e IEEE 802.15.4[4].

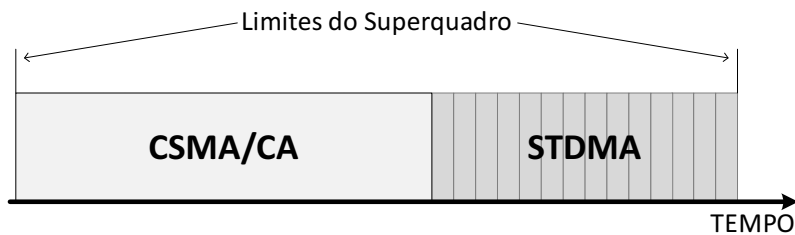


Figura 3.2: Estrutura do Período de Comunicação.

A Figura 3.2 representa a estrutura de superquadro adotada neste trabalho. A parcela do período de comunicação destinada às transmissões com contenção deve ser governada por métodos de múltiplo acesso aleatórios, como o CSMA/CA, ignorando a subdivisão em *slots* de tempo. Esta parcela deve ser utilizada pelos nós das RASSFs com o objetivo de atender às comunicações *publish/subscribe*, tanto das aplicações que não possuem restrições temporais, quanto das aplicações de tempo

real que utilizam esse modelo para coordenar a comunicação das suas mensagens de controle. Na parcela CSMA/CA do superquadro devem ser transmitidas, portanto:

- As mensagens nas quais os *subscribers* da rede difundem as informações de seu interesse;
- As mensagens de anúncio da disponibilidade de novas informações difundidas pelos *publishers* da rede;
- Os pedidos de subscrição enviados pelos *subscribers*, independentemente da aplicação que os originou, mesmo aquelas que apresentam restrições temporais;
- Os dados transmitidos pelos *publishers* encaminhados através de notificações que se destinam apenas às aplicações que não restringem limites de tempo;
- As mensagens de controle introduzidas pelo mecanismo de sinalização do escalonamento distribuído das transmissões síncronas de tempo real, que será apresentado em detalhes na Seção 3.3.

Após a conclusão do escalonamento distribuído mencionado acima, os nós das RASSFs deverão dispor de tabelas de escalonamento que lhes possibilitam conhecer os *slots* do superquadro, localizados na parcela STDMA, que foram reservados para seu próprio uso. Esses *slots*, que devem ser preferencialmente livres de colisão, serão utilizados pelos respectivos nós para realizar as transmissões das informações destinadas às aplicações de tempo real.

O fluxograma apresentado na Figura 3.3 ilustra a sequência temporal das diferentes mensagens trocadas para coordenação *publish/subscribe*, organizadas de acordo com a parcela do superquadro que deve ser utilizada para sua transmissão.

As ações compreendidas entre os passos 1 e 5 representam o processo de inicialização da rede, no qual sensores e atuadores trocam mensagens de controle (durante a parcela CSMA/CA do período de comunicação) para fomentar as combinações entre interesses e publicações, que darão origem aos fluxos de dados representados pelas ações compreendidas entre os passos 7 e 12 do fluxograma.

O passo 4 representa o limiar de separação das aplicações com e sem restrições temporais. Quando, neste ponto, é verificada a inexistência de limites temporais, o *publisher* inicia (passo 10) o envio periódico de notificações através de mensagens com contenção até que o tempo de validade daquela subscrição expire (passo 12). Essas notificações serão recebidas e reencaminhadas pelos nós intermediários, sempre utilizando a parcela CSMA/CA do superquadro, até sua entrega ao *subscriber*.

Entretanto, quando o *publisher* detecta a existência de restrições temporais, no passo 5 o *publisher* inicia a troca de mensagens de controle do mecanismo de sinalização do escalonamento, utilizando a parcela CSMA/CA do superquadro. So-

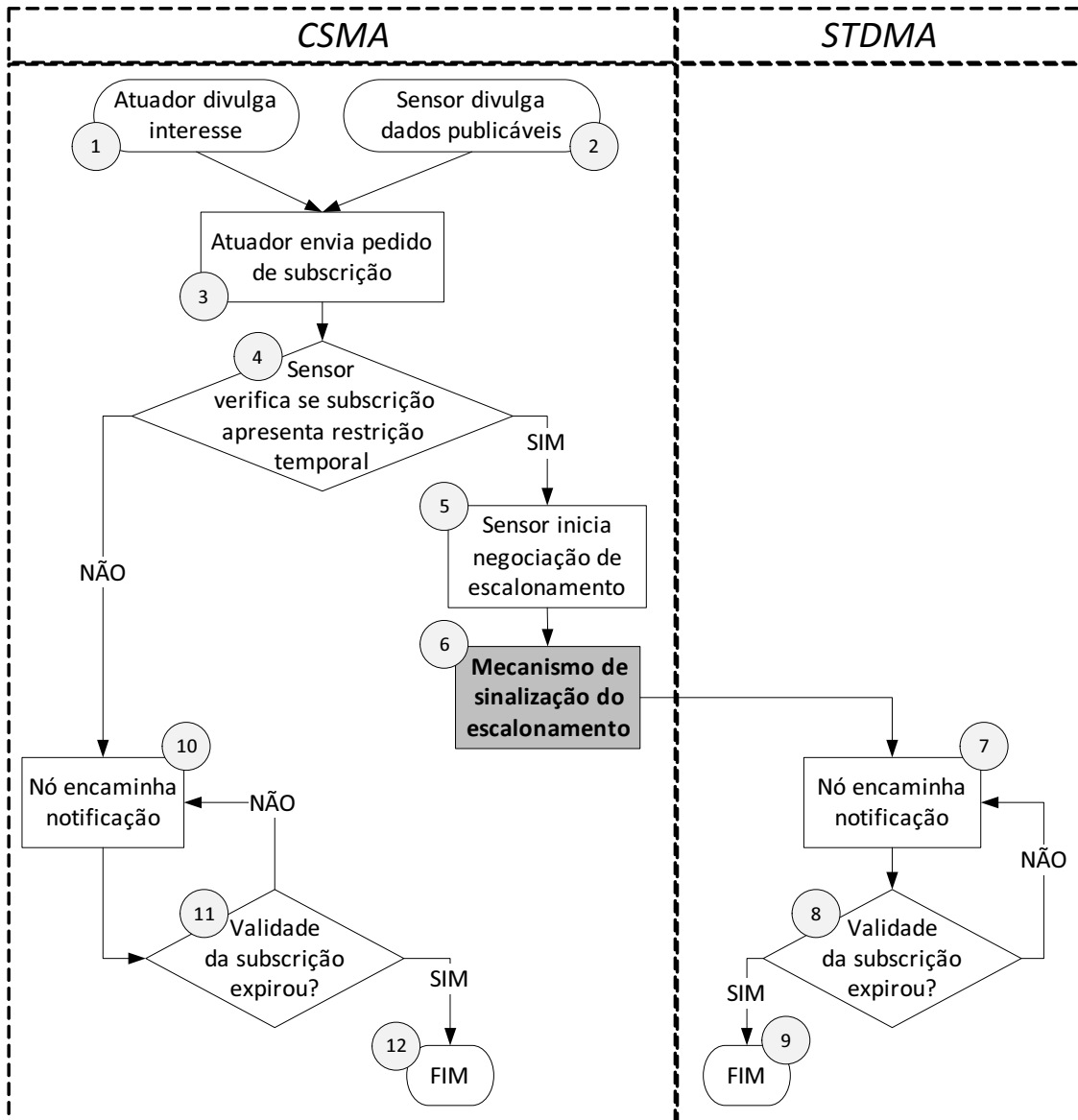


Figura 3.3: Fluxograma de Coordenação para Diferentes Restrições Temporais.

mente após concluir o escalonamento das mensagens de notificação que visam atender àquele pedido de subscrição, detalhado na Seção 3.3, os nós iniciam o uso da parcela STDMA. Nos passos 7 a 9, os nós intermediários realizam o encaminhamento das sucessivas mensagens de notificação publicadas pelo *publisher*, através dos *slots* determinados pelo escalonamento, até o término da validade daquela subscrição.

Durante a inicialização da rede, antes de qualquer aplicação iniciar seu processo de subscrição, ou enquanto houver apenas aplicações *non-real-time* sendo atendidas pela RASSF, observa-se apenas a ocorrência de transmissões tradicionais do modelo *publish/subscribe* utilizando a parcela CSMA/CA do período de comunicação. A parcela do superquadro destinada às comunicações STDMA é preenchida, então, à medida que novos pedidos de subscrição para aplicações de tempo real chegam e as tabelas de escalonamento dos nós são construídas.

Com o surgimento de novos interesses e/ou novos dados disponíveis, novos pedidos de subscrição podem ser enviados à RASSF a qualquer momento, desde que utilizando a parcela CSMA/CA do período de comunicação. Entretanto, quando as inundações de todas as divulgações e as entregas de todos os pedidos de subscrição são concluídas, o uso do superquadro se restringirá à transmissão das mensagens de notificação aos atuadores que mantêm seus interesses vigentes, através da parcela STDMA, para aqueles que possuem restrições temporais, ou da CSMA/CA, quando não de tempo real.

O envio das notificações repete-se, então, de acordo com a frequência de atualização dos sensores, periodicamente dentro dos sucessivos superquadros. Esta sucessão permite ainda que os passos iniciados e não concluídos, bem como seus posteriores, possam ser retomados no superquadro seguinte. Portanto, o número de superquadros que serão necessários para a conclusão da fase de inicialização da rede ou para o escalonamento de uma nova demanda de tempo real, além de depender de fatores como o número de aplicações ativas, o tamanho e o diâmetro da rede, é influenciado diretamente pelo tamanho do superquadro e de sua parcela CSMA/CA.

Por definição, esta proposta considera inicialmente que os superquadros devem possuir um tamanho fixo, estabelecido a partir de dois fatores. O primeiro deles atribui proporções complementares a cada uma das parcelas, STDMA e CSMA/CA, considerando que apenas as notificações de tempo real são transmitidas na parcela STDMA, enquanto a CSMA/CA deve comportar todo o tráfego de controle da RASSF, além das notificações que não respeitam limitações temporais.

O segundo fator considerado determina a duração mínima da parcela STDMA do superquadro com base no tamanho da tabela de escalonamento obtida a partir do mecanismo de sinalização, conforme será discutido na próxima seção.

3.3 Escalonamento das Comunicações

A proposta deste trabalho considera o uso do modelo *publish/subscribe* na coordenação das interações entre sensores e atuadores nas RASSFs organizadas sobre arquiteturas “automatizadas”, permitindo a descentralização das comunicações e o compartilhamento de uma mesma rede por diferentes aplicações.

Uma vez que tais diferenças abrangem igualmente o campo das restrições temporais, a proposta considera ainda a divisão do período de comunicação em duas parcelas, uma que suporta apenas comunicações sujeitas à contenção e outra que tende ser livre de colisão e possibilita o atendimento às restrições das aplicações de tempo real através do múltiplo acesso por divisão do canal no tempo.

Esta seção descreve a proposta de mecanismo de sinalização, baseado no próprio modelo *publish/subscribe*, designado para a realização do escalonamento distribuído

das transmissões de tempo real, a partir das informações disponíveis localmente nos nós, possibilitando a minimização do tráfego de controle adicionado para o escalonamento ao mesmo tempo em que oferece uma integração completa com as comunicações *non-real-time*.

3.3.1 Sinalização *Publish/Subscribe*

Originalmente, a proposta de coordenação *publish/subscribe* para as interações entre sensores e atuadores nas RASSFs considera a troca de mensagens entre os nós visando a combinação entre dados e interesses e suas consequentes subscrições. No mecanismo de sinalização proposto estas mesmas mensagens são utilizadas com um apelo adicional: indicar o *slot* mais apropriado ao escalonamento, sob o ponto de vista dos *subscribers* e dos nós intermediários.

Assim, associado a um pedido de subscrição, o mecanismo de sinalização executa a ‘pré-reserva’ de um *slot*, de acordo com a perspectiva do nó *subscriber* e dos nós intermediários da comunicação. Mediante o recebimento dessa subscrição, o nó *publisher* e os intermediários subsequentes encaminham mensagens de ‘notificação do escalonamento’, exclusivas do mecanismo de sinalização. Estas novas mensagens destinam-se à ratificação das pré-reservas realizadas ou à sua retificação, quando a correção do *slot* pré-reservado se fizer necessária, efetivando as reservas dos *slots* na tabela de escalonamento dos nós envolvidos na comunicação ou afetados por ela.

Para balizar a atuação do mecanismo de sinalização, as aplicações de tempo real devem adicionar às características das informações de interesse, parâmetros que especifiquem as exigências temporais da sua subscrição, como a frequência com que espera receber atualizações de dados e os níveis de criticidade exigidos pelas aplicações (*hard*, *soft* ou *non-real-time*).

Na divulgação das informações disponíveis, a inclusão de um parâmetro para contagem da distância (em saltos) desde sua publicação, permite que o mecanismo de sinalização mantenha o desacoplamento de espaço proporcionado pelo *publish/subscribe* ao mesmo tempo em que fomenta o cômputo dos *slots* para a pré-reserva. Para isso, ao receberem e reencaminharem essa mensagem, os nós devem registrar, em sua tabela de roteamento local, os parâmetros das informações recebidas através de cada um dos seus vizinhos.

Esse conjunto de parâmetros agregados às mensagens de divulgação dos nós são manipulados, nos diversos agentes da rede, para a pré-reserva dos *slots* que poderão ser utilizados por cada um dos nós para efetuar o encaminhamento do dado. À mensagem de subscrição enviada pelo nó *subscriber* são acrescidas e atualizadas as pré-reservas computadas pelos nós intermediários do caminho até o *publisher* da informação.

No nó *publisher*, a pré-reserva recebida com a mensagem de subscrição é levada em consideração na definição do *slot* que será efetivamente utilizado por este nó para o encaminhamento do dado durante a parcela STDMA do superquadro. A reserva do *slot* deve ser, então, comunicada aos nós intermediários, que repetirão o processo de reserva e comunicação até a notificação do nó *subscriber*.

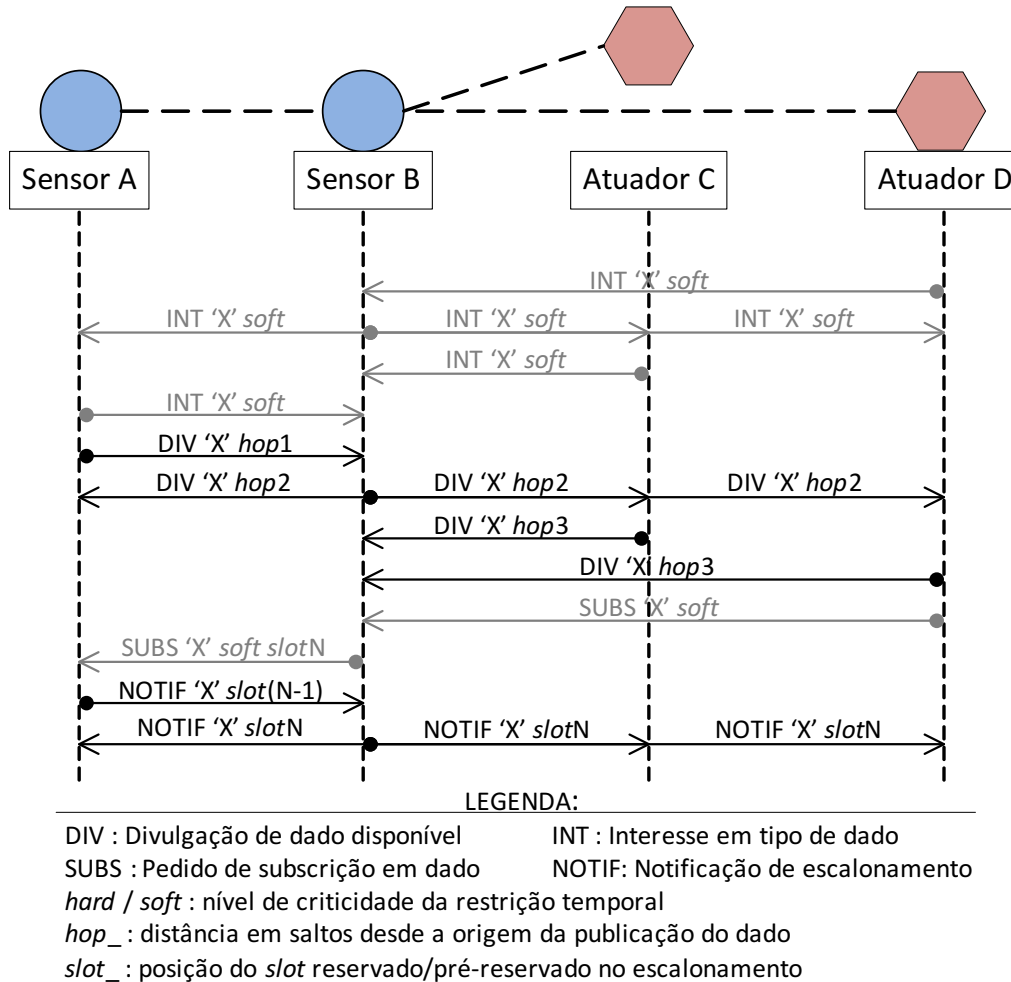


Figura 3.4: Diagrama de Sequência do Mecanismo de Sinalização *Publish/Subscribe*.

A Figura 3.4 apresenta o diagrama de sequência de coordenação *publish/subscribe* que integra a proposta de sinalização. No exemplo utilizado nesse diagrama, apenas o atuador 'D' apresenta uma demanda de dados com restrição temporal (*soft real-time*), realizando a pré-reserva do *slot* com base na contagem de saltos obtida a partir da divulgação do dado 'X' e encaminhando o respectivo pedido de subscrição à sua vizinhança (indicada pelas linhas tracejadas). Da mesma forma, os nós intermediários, representados pelo sensor 'B', se baseiam na contagem de saltos da divulgação do mesmo dado para realizar sua pré-reserva e enviar o pedido de subscrição em direção ao *publisher*, informando o *slot* 'N' pré-reservado dentro do qual planejam encaminhar o dado com destino ao *subscriber*. Nesse caso, 'N' representa

Código 1: Subscrição com restrição temporal.

```
1 interno: Escalonamento(Slot, Usuario, Dado), Interesse(Dado, Restricao)
2 entrada: Divulgacao(Dado, Saltos, Remetente)
3 se ((Interesse.Restricao = HARD OU Interesse.Restricao = SOFT) E
   Interesse.Dado = Divulgacao.Dado) então
4   //Calcula pré-reserva para recebimento do dado
5   procura Escalonamento onde: (Slot ≥ Divulgacao.Saltos E
   Usuario = Divulgacao.Remetente E Dado = Divulgacao.Dado)
6   se (∄ Escalonamento) então
7     procura primeiro SlotLivre em Escalonamento onde:
8     SlotLivre ≥ Divulgacao.Saltos
9     adiciona
   Escalonamento(SlotLivre, Divulgacao.Remetente, Divulgacao.Dado)
   envia Subscricao(Dado, Restricao) para Divulgacao.Remetente
```

o primeiro *slot* disponível naquele nó capaz de atender tal demanda específica de encaminhamento.

No exemplo da Figura 3.4, observa-se ainda que, ao receber a subscrição, o *publisher* do dado ‘X’ confirma a disponibilidade do *slot* ‘N-1’ em sua tabela de escalonamento e comunica a reserva do *slot* aos seus vizinhos através de uma mensagem de notificação do escalonamento. O nó intermediário, por sua vez, após reservar o *slot* ‘N-1’ para uso do sensor ‘A’, confirma sua própria reserva no *slot* ‘N’ e envia sua notificação de escalonamento a todos os vizinhos. Ao receberem a notificação, os vizinhos atualizam suas respectivas tabelas de escalonamento, encerrando a formação do fluxo de dados fim a fim quando o atuador ‘D’ é notificado.

As principais ações realizadas por *subscribers* e nós intermediários visando a subscrição das informações são apresentadas nos Algoritmos 1 e 2.

O Algoritmo 1 é executado pelos *subscribers* quando uma informação disponibilizada pelos *publishers* é necessária para a utilização em uma de suas aplicações, com algum tipo de restrição temporal. Como resultado, não havendo um escalonamento pré-existente em um *slot* localizado em posição anterior à estimada para o recebimento do dado através de determinado vizinho, remetente da divulgação recebida, o *subscriber* envia uma mensagem de subscrição informando o dado desejado, com seus atributos e o nível de criticidade requerido pela aplicação de tempo real.

Simultaneamente ao envio do pedido de subscrição, o *subscriber* deve iniciar uma contagem de tempo regressiva de valor arbitrário, dentro do qual espera receber uma confirmação de escalonamento, indicando o estabelecimento de um fluxo de dados para atender sua demanda. Caso contrário, a expiração desse tempo culmina no reenvio da mensagem de subscrição, indefinidamente até que o fluxo seja estabelecido, no caso *hard real-time*, ou por um número limitado de vezes nos demais casos.

Código 2: Encaminhamento das subscrições com restrição temporal.

```
1 interno: Escalonamento(Slot, Usuario, Dado),  
   Roteamento(Dado, Saltos, Remetente)  
2 entrada: Subscricao(Dado, Restricao, Slot, Remetente)  
3 se (Subscricao.Restricao = HARD OU Subscricao.Restricao = SOFT)  
   então  
4   //Calcula pré-reserva para recebimento do dado  
5   procura Roteamento onde: Dado = Subscricao.Dado  
6   procura Escalonamento onde: (Slot ≥ Roteamento.Saltos E  
   Usuario = Roteamento.Remetente E Dado = Subscricao.Dado)  
7   se (∄ Escalonamento) então  
8     procura primeiro SlotLivre em Escalonamento onde:  
9     SlotLivre ≥ Roteamento.Saltos  
10    adiciona  
11    Escalonamento(SlotLivre, Roteamento.Remetente, Subscricao.Dado)  
12   //Calcula pré-reserva para encaminhamento do dado  
13   procura Escalonamento onde: (Slot > SlotLivre E  
   Usuario = esteNodo E Dado = Subscricao.Dado)  
14   se (∄ Escalonamento) então  
15     procura primeiro 2ndSlotLivre em Escalonamento onde:  
16     2ndSlotLivre > SlotLivre  
17     adiciona Escalonamento(2ndSlotLivre, esteNodo, Subscricao.Dado)  
18     envia Subscricao(Dado, Restricao, 2ndSlotLivre) para  
19     Roteamento.Remetente  
20   //Calcula pré-reserva para uso posterior do dado  
21   procura Escalonamento onde: (Slot > 2ndSlotLivre E  
   Usuario = Subscricao.Remetente E Dado = Subscricao.Dado)  
22   se (∄ Escalonamento) então  
23     procura primeiro 3rdSlotLivre em Escalonamento onde:  
24     3rdSlotLivre > 2ndSlotLivre  
25     adiciona  
26     Escalonamento(3rdSlotLivre, Subscricao.Remetente, Subscricao.Dado)
```

O Algoritmo 2, por sua vez, é executado pelos nós intermediários que, de forma similar, realizam a pré-reserva dos *slots* que eles próprios deverão utilizar para o encaminhamento dos dados, bem como daqueles destinados ao uso dos nós que os antecederão e os sucederão no fluxo de dados entre *publisher* e *subscriber*. Suas próprias pré-reservas devem ser, então, atualizadas no pedido de subscrição antes que seja encaminhado em direção ao *publisher*.

A pré-reserva do *slot* através da qual o nó intermediário espera receber o dado, indicada nas linhas 4 a 9 do Algoritmo 2, é realizada com base na contagem de saltos registrada na sua tabela de roteamento. Essa contagem, conforme explicado anteriormente, é obtida a partir das mensagens de divulgação dos dados disponíveis e, desta forma, possibilita que o nó intermediário assegure a pré-reserva de, no

mínimo, um *slot* para cada salto que o separa do *publisher* daquela informação.

Caso o nó intermediário receba o pedido de subscrição diretamente do *subscriber* da informação, as linhas 16 a 20 do Algoritmo 2 podem ser omitidas, desde que o nó *subscriber* não exerça, adicionalmente, o papel de nó intermediário para outro *subscriber* e, desta forma, não seja necessário utilizar o *slot* livre seguinte para continuar o encaminhamento da informação. Por isso, quando o pedido de subscrição é emitido diretamente por um *subscriber*, a mensagem recebida não contém uma pré-reserva de *slot*, conforme demonstrado na linha 9 do Algoritmo 1.

Até que seja realizada a combinação entre as publicações e os interesses de tempo real, as mensagens trocadas entre os nós que são utilizadas pelo mecanismo de sinalização proposto, constituem-se nas próprias mensagens do modelo *publish/subscribe*, acrescidas apenas dos parâmetros que especificam as restrições temporais. Contudo, após tal combinação, um novo tipo de mensagem de controle introduzido pelo mecanismo de sinalização passa a ser utilizado, com o intuito de efetivar as reservas do escalonamento de cada nó.

As mensagens de notificação nativas do *publish/subscribe* carregam a informação publicada pelo *publisher* e devem ser encaminhadas pelos nós intermediários até sua entrega (e, portanto, da informação) ao *subscriber*. Diferentemente dessas, as mensagens de ‘notificação de escalonamento’ são enviadas por cada nó que realiza uma reserva na sua tabela de escalonamento, com o objetivo de comunicar aos seus vizinhos o *slot* que o nó pretende utilizar para encaminhar uma informação em atendimento a restrições temporais.

Ao receber a notificação de escalonamento, cabe aos vizinhos do nó registrar o *slot* reservado em sua tabela de escalonamento, no intuito de evitar que ele próprio designe o mesmo *slot* para outra transmissão e gere uma colisão durante a comunicação para as aplicações de tempo real.

A forma como *publishers* e nós intermediários administram o processo de escalonamento das comunicações de tempo real e tratam as mensagens de notificação dos escalonamentos é descrita nos Algoritmos 3 e 4.

O Algoritmo 3 é executado pelos *publishers* quando recebem os pedidos de subscrição originados nos *subscribers*. Em resposta ao pedido, o *publisher* escolhe o primeiro *slot* disponível capaz de atender à subscrição, no meio da sua tabela de escalonamento ou acrescentando novos *slots* ao seu final. Em seguida, o *publisher* envia ¹ uma mensagem de notificação informando ao nó remetente (intermediário ou *subscriber*) qual *slot* será utilizado futuramente no envio daquele dado. Consecutiva-

¹Conforme discutido anteriormente, em função dos desacoplamentos de tempo e espaço oferecidos pelo *publish/subscribe*, as notificações de escalonamento são enviadas em resposta ao recebimento de um pedido de subscrição sem que o *publisher* conheça quem são os *subscribers* que a solicitaram, podendo encontrar-se em um estado de dormência no momento de envio da notificação pelo *publisher*.

Código 3: Escalonamento e notificação.

```
1 interno: Escalonamento(Slot, Usuario, Dado)
2 entrada: Subscricao(Dado, Restricao, Slot, Remetente)
3 se (Subscricao.Restricao = HARD OU Subscricao.Restricao = SOFT)
   então
4   //Calcula reserva para encaminhamento do dado publicado
5   procura Escalonamento onde: (Slot < Subscricao.Slot E
   Usuario = esteNodo E Dado = Subscricao.Dado)
6   se ( $\nexists$  Escalonamento) então
7     procura primeiro SlotLivre em Escalonamento
8     adiciona Escalonamento(SlotLivre, esteNodo, Subscricao.Dado)
9     envia Notificacao(SlotLivre, esteNodo, Subscricao.Dado) para todos
   | vizinhos
10  //Calcula pré-reserva para uso posterior do dado
11  procura Escalonamento onde: (Slot > SlotLivre E
   Slot  $\geq$  Subscricao.Slot E Usuario = Subscricao.Remetente E
   Dado = Subscricao.Dado)
12  se ( $\nexists$  Escalonamento) então
13  | procura primeiro 2ndSlotLivre em Escalonamento onde:
   | 2ndSlotLivre > SlotLivre E 2ndSlotLivre  $\geq$  Subscricao.Slot
14  | adiciona
   | Escalonamento(2ndSlotLivre, Subscricao.Remetente, Subscricao.Dado)
```

mente, caso o remetente direto daquele pedido não seja o *subscriber* da informação e tenha solicitado uma pré-reserva para seu próprio uso, o *publisher* registra-a dentro do primeiro *slot* de sua tabela de escalonamento capaz de atendê-la.

De forma complementar ao Algoritmo 3, o Algoritmo 4 descreve o encerramento do processo de escalonamento de um *slot* e o início do processo do *slot* seguinte no fluxo de dados em construção. O encerramento do processo de escalonamento ocorre na medida em que todos os nós que recebem a notificação efetuam, em sua própria tabela de escalonamento, a reserva indicada na mensagem recebida, evitando que o mesmo *slot* possa ser reutilizado indiscriminadamente, sob o risco de ocasionar interferências indesejadas. A Subseção 3.3.2 trata da relação entre o reuso espacial dos *slots* e a troca de mensagens de notificação do escalonamento.

Quando a notificação de escalonamento é recebida por um nó intermediário que possui alguma pré-reserva para o mesmo tipo de informação contemplada pela notificação, indicando sua participação no fluxo de dados de, pelo menos, um dos seus *subscribers*, tal recebimento também atua como gatilho para que o nó inicie sua própria reserva de escalonamento. O início desse novo processo de escalonamento gera uma nova mensagem de notificação que, ao ser encaminhada aos vizinhos, dá origem a novas reservas e à criação de sucessivos novos processos de escalonamento, até que uma notificação seja entregue ao(s) *subscriber(s)* daquela informação.

Código 4: Repasse de notificação de escalonamento.

```
1 interno: Escalonamento(Slot, Usuario, Dado)
2 entrada: Notificacao(Slot, Usuario, Dado)
3 //Registra reserva de escalonamento recebida
4 procura Escalonamento onde: (Dado = Notificacao.Dado E
   Usuario = Notificacao.Usuario E Slot = Notificacao.Slot)
5 se ( $\nexists$  Escalonamento) então
6   | adiciona
   |   Escalonamento(Notificacao.Slot, Notificacao.Usuario, Notificacao.Dado)
7 //Calcula reserva para encaminhamento do dado
8 procura primeiro SlotLivre em Escalonamento onde:
   SlotLivre > Notificacao.Slot
9 procura Escalonamento onde: (Dado = Notificacao.Dado E
   Usuario = esteNodo)
10 se ( $\exists$  Escalonamento) então
11   | se (Escalonamento.Slot  $\leq$  Notificacao.Slot) então
12     | move Escalonamento.Slot para SlotLivre
13   | envia
   |   Notificacao(Escalonamento.Slot, esteNodo, Escalonamento.Dado) para
   |   todos vizinhos diretos
```

Portanto, quando a notificação de escalonamento é recebida por um *subscriber*, a construção do fluxo de dados fim a fim é concluída e o mecanismo de sinalização *publish/subscribe* pode propiciar às publicações enviadas pelos *publishers* que sejam entregues, de forma determinística, através da parcela STDMA do superquadro, aos seus respectivos *subscribers*.

Assim, se for recebido um novo pedido de subscrição, com origem em um outro *subscriber*, para o mesmo tipo de dado de uma reserva já confirmada no nó intermediário, e tal reserva não for capaz de atender às restrições temporais do novo pedido, o nó intermediário procede conforme previsto no Algoritmo 2, dando origem a novas reservas de escalonamento. Por outro lado, o mecanismo de sinalização utiliza as prerrogativas de anonimato discutidas na Seção 2.2, se uma das reservas de escalonamento confirmadas puder atender às limitações temporais do novo pedido de subscrição. Neste caso, o nó intermediário reencaminha a seus vizinhos a notificação de escalonamento da reserva pré-existente apta a atender ao novo pedido, que será recebida e administrada pelos demais nós intermediários do caminho até o novo *subscriber*, conforme definido no Algoritmo 4.

Desta forma, o mecanismo de sinalização *publish/subscribe* possibilita o melhor uso dos recursos da RASSF, não apenas durante a sinalização dos escalonamentos, mas também durante as transmissões síncronas de tempo real, uma vez que os desacoplamentos de tempo e espaço permitem que uma única mensagem, de subscrição, notificação do escalonamento ou dados, atenda a mais de um nó de destino.

3.3.2 Reuso Espacial

O modo como os nós das RASSFs administram o processo de escalonamento das comunicações de tempo real determina o reuso espacial dos *slots* de tempo que compõem a parcela STDMA do período de comunicação. Esse reuso espacial, proporcionado pelo escalonamento distribuído segundo o mecanismo de sinalização *publish/subscribe* proposto, está ligado diretamente à troca das mensagens de notificação de escalonamento entre os nós e à forma como tais mensagens são traduzidas em reservas de *slots* nas tabelas de escalonamento de cada um deles.

Conforme sintetizado pelos Algoritmos 3 e 4 da subseção anterior, a reserva de um *slot* para uso de um nó é comunicada aos seus vizinhos para que o mesmo registro também seja incluído nas suas respectivas tabelas de escalonamento. Com tal inclusão, os nós vizinhos ficam impedidos de reutilizar aquele *slot* para suas próprias transmissões e, assim, evita-se a ocorrência de interferências primárias em seu enlace de comunicação.

Apesar do mecanismo proposto realizar o escalonamento dos nós das RASSFs, de tal forma que uma reserva atribua ao nó o direito de transmitir os dados a quaisquer dos seus vizinhos, o estabelecimento de fluxos de dados fim a fim entre *publishers* e *subscribers* requer que seja observada, igualmente, a integridade na recepção dos dados. Assim, uma vez que o desacoplamento de espaço impossibilita que o nó transmissor identifique, entre os seus vizinhos, quais deverão atuar como nós intermediários no encaminhamento dos dados de tempo real, todos os vizinhos do nó que detém o direito de transmissão de um *slot* também devem influenciar os escalonamentos dos seus próprios vizinhos, com o objetivo de minimizar as interferências secundárias que poderiam comprometer a correta decodificação da informação. Para isso, as mensagens de notificação do escalonamento devem ser retransmitidas por todos os vizinhos do nó e, desta forma, os nós localizados a dois saltos do nó detentor da reserva do *slot* também devem ser impedidos de transmitir durante o mesmo.

Assim, o Algoritmo 4 da subseção anterior deve considerar a inclusão da seguinte instrução entre suas linhas 2 e 3:

“**envia** *Notificacao*(*Notificacao.Slot*, *Notificacao.Usuario*, *Notificacao.Dado*)
para todos vizinhos diretos”

Pode-se dizer, portanto, que para proteger sua reserva das interferências que poderiam ser causadas por uma vizinhança localizada a até um salto, a mensagem de notificação do escalonamento deve ser encaminhada a, pelo menos, dois saltos do nó transmissor. Ou, em outras palavras, o mecanismo de sinalização deve assegurar a reserva do escalonamento a uma distância de um salto a partir de cada um dos nós envolvidos na comunicação daquele *slot*. A Figura 3.5 ilustra o exposto.

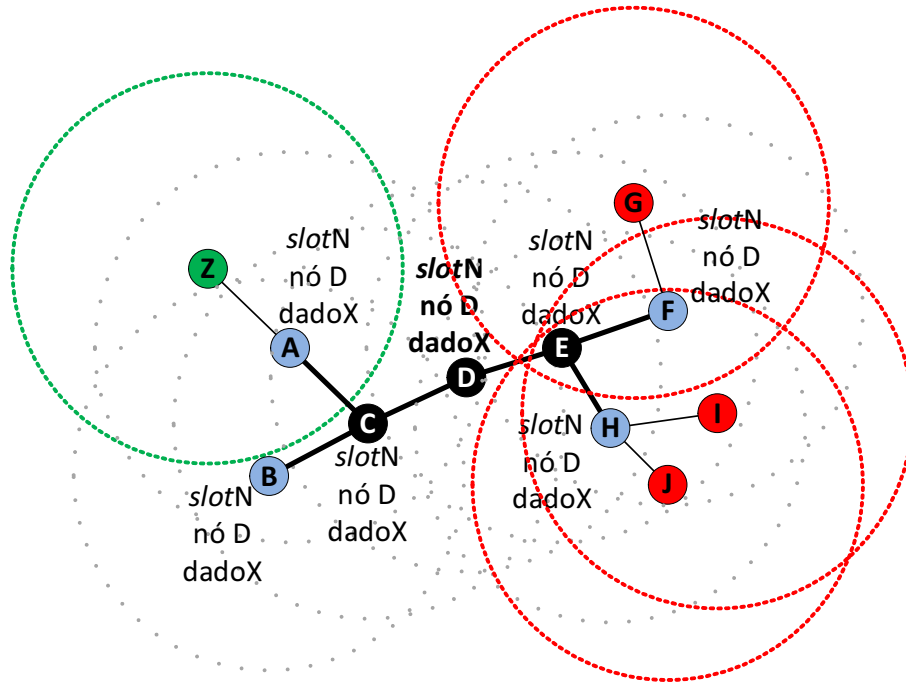


Figura 3.5: Reserva de Escalonamento a um Salto dos Nós Participantes.

Desta forma, sendo garantida a entrega das mensagens de notificação do escalonamento a todos os vizinhos localizados a até dois saltos, antes que algum desses vizinhos inicie seu próprio escalonamento, evita-se a ocorrência de outras transmissões dentro do alcance de transmissão/recepção dos nós envolvidos na comunicação da-quele *slot*.

Se, no entanto, as interferências presentes no meio impedirem que um dos vizinhos receba adequadamente a notificação de escalonamento referente a uma determinada reserva, tal vizinho manterá o respectivo *slot* livre para uso. Com isso, o *slot* disponível pode ser escalonado para outra transmissão simultânea com a possibilidade de ocasionar uma interferência direta entre as transmissões dos vizinhos. E assim, o estabelecimento de fluxos de dados fim a fim entre *publishers* e *subscribers* pode ser comprometido.

Contudo, esta solução não toma uma providência direta quanto ao surgimento de sinais interferentes cujas origens estão fora desse alcance e que, portanto, não recebem as mensagens de notificação. Dependendo da disposição topológica, a susceptibilidade a tais sinais interferentes pode revelar que a reserva de um único salto ao redor de cada nó participante da comunicação não é suficiente para assegurar a integridade na recepção das informações transmitidas.

No exemplo da Figura 3.5, onde foi representada a reserva de um escalonamento a uma distância de um salto a partir dos nós envolvidos na comunicação do *slot* 'N', as notificações de escalonamento enviadas pelo nó 'D' asseguram a reserva desse *slot*

nas tabelas de escalonamento tanto dos nós ‘C’ e ‘E’, que receberão a transmissão do ‘dadoX’, quanto dos seus vizinhos ‘A’, ‘B’, ‘F’ e ‘H’. Com isso, desde que nenhum desses quatro vizinhos tente iniciar simultaneamente a reserva do mesmo *slot*, o nó ‘D’ garante que suas transmissões não serão afetadas pelo escalonamento de qualquer transmissão oriunda desses quatro nós. Porém, como ‘G’, ‘J’, ‘I’ e ‘Z’ não receberam as notificações, o *slot* ‘N’ continua livre para seu uso. Apesar da disposição topológica e o sinal de transmissão do nó ‘Z’ durante esse *slot* não ser capaz de interferir na recepção ou decodificação do dado pelo nó ‘C’, o mesmo não pode ser garantido com relação ao nó ‘E’, caso ‘G’, ‘I’ e/ou ‘J’ também decidam escalonar o *slot* ‘N’. Neste caso, fica evidente que a distância de dois saltos a partir do nó transmissor não é suficiente para garantir uma comunicação livre de interferências.

Conforme discutido na Seção 2.1, o problema da interferência sobre as reservas de *slots* fica amplificado com a sobreposição temporal das transmissões, advinda do próprio reuso espacial. Com o aumento no reuso do canal e o escalonamento de diversas transmissões simultâneas, é esperada a presença de um maior número de sinais interferentes no meio, agravando o impacto das interferências sobre as reservas de *slots* e as entregas de dados por elas previstas.

A redução do reuso espacial pode ser obtida através do aumento da área protegida pela reserva de *slots*, devendo estender sua abrangência a todos os vizinhos localizados a H saltos dos nós que executam os papéis de transmissor e receptor no escalonamento correspondente. Assim, as mensagens de notificação que comunicam as reservas de *slots* devem ser encaminhadas a $2H$ saltos do nó detentor do direito de uso do *slot*, com o objetivo de impedir que qualquer nó que se localize a menos de H saltos dos nós envolvidos na comunicação (tanto a partir do transmissor quanto do receptor) interfira no *slot* de comunicação.

Para a escolha do parâmetro H , que determina a distância $2H$ até a qual as mensagens de notificação deverão ser encaminhadas, deve-se estabelecer uma relação de compromisso entre o reuso esperado do canal de comunicação e a susceptibilidade a interferências admitida, ou as chances de colisão entre as transmissões.

Adicionalmente, há de se considerar a relação entre o reuso espacial das RASSFs e a dimensão final das tabelas de escalonamento dos nós. De um menor reuso espacial é aguardada a disposição de um maior número de *slots* para que todos os fluxos de dados fim a fim requeridos entre cada *publisher* e cada *subscriber* da RASSF sejam estabelecidos, provocando o crescimento das tabelas de escalonamento dos nós.

Nota-se, portanto, que o mecanismo proposto não fornece escalonamentos totalmente livres de colisão, da mesma forma que não almeja a obtenção de um escalonamento mínimo. Através do equilíbrio entre o reuso e susceptibilidade a interferências, seu objetivo é atender às restrições temporais das aplicações de tempo real, de tal modo que o escalonamento possa ser criado de forma distribuída e integrada ao

mesmo mecanismo que coordena as demais comunicações das RASSFs.

A próxima subseção discute diferentes aspectos relativos ao dimensionamento dos escalonamentos gerados pelo mecanismo de sinalização *publish/subscribe* e sua relação com a duração do período de comunicação da rede. Na Seção 3.4, que apresenta os requisitos de implementação e uso da solução proposta, é realizada uma análise sobre o reuso espacial, abordando a escolha do parâmetro H e sua relação com os demais parâmetros que devem ser considerados nessas redes.

3.3.3 Tabelas de Escalonamento

O escalonamento gerado a partir do mecanismo de sinalização *publish/subscribe* proposto determina o conjunto de *slots* que serão utilizados pelos diferentes nós para realizar a entrega de dados entre cada *publisher* e seu *subscriber* correspondente na RASSF. A ocupação dos *slots* proporcionada se dá de modo ordenado, respeitando o sequenciamento dos fluxos de dados fim a fim.

Pela forma como foi proposto, o mecanismo de sinalização é voltado para a construção do fluxo de dados e, assim, possibilita que as reservas se estabeleçam em sequência. Conforme pode ser observado na linha 7 do Algoritmo 3 e linhas 8 e 11 do Algoritmo 4, o mecanismo busca atender à demanda por escalonamento, utilizando o primeiro *slot* disponível, sempre a partir do *publisher* da informação e designando as menores posições subsequentes para as reservas dos próximos nós que se encarregam da entrega do dado. Assim, observamos que dentro de um mesmo fluxo de dados, as transmissões entre *publishers* e *subscribers* sempre serão escalonadas em sequência, sendo esperada a interposição de *slots* somente entre fluxos de dados independentes.

Para conservar a relação entre o fluxo de dados e a reserva escalonada, as tabelas mantidas pelos nós da RASSF devem associar a cada um dos *slots* o nó proprietário da reserva e o tipo de dado que será transmitido durante o mesmo. Para cada *slot* da tabela também deve ser associada a confirmação das reservas dos escalonamentos, diferenciando-as dos *slots* com uso previsto mas ainda não confirmados.

Por meio da combinação entre as informações mantidas nas tabelas de escalonamento e da ciência dos nós quanto à sua relação de vizinhos e ao seu papel de *publisher* ou *subscriber* de uma determinada informação, os nós devem ser capazes de identificar os *slots* que se encontram em cada uma das seguintes situações:

1. *Slots* que os nós devem utilizar para encaminhar sua própria publicação, quando existe vínculo com a função de *publisher* daquele dado específico;
2. *Slots* que devem ser utilizados pelos nós para reencaminhar uma mensagem de dado, claramente definido pelo campo que informa o proprietário da reserva e pela inexistência do vínculo característico da situação 1;

3. *Slots* nos quais os nós esperam receber uma mensagem de dado, seja para exercer o papel de *subscriber* ou para executar a função de nó intermediário, quando identificada a existência de *slots* posteriores que indicam a situação 2;
4. *Slots* reservados para uso dos seus vizinhos, cujas mensagens podem ser ignoradas, sendo identificados pela ausência do proprietário da reserva na sua lista de vizinhos, pela inexistência de vínculo com a função de *subscriber* daquele tipo de dado ou pela inexistência de *slots* posteriores na tabela destinados a reencaminhá-la.

Assim, uma vez que as reservas de escalonamento asseguram aos nós o direito de uso do *slot* para transmitir determinado dado a qualquer dos seus vizinhos, os nós podem realizar a comunicação síncrona das aplicações de tempo real na parcela STDMA do período de comunicação, através de transmissões em *broadcast* que levam em consideração as quatro situações anteriormente relacionadas.

As tabelas de escalonamento também podem registrar, junto ao tipo de dado, o tempo de validade informado durante a subscrição pelas aplicações que não operam de forma ininterrupta. Esse registro possibilita a economia de recursos da rede, em virtude da suspensão dos encaminhamentos dos dados e a liberação do *slot* após sua expiração.

A Tabela 3.1 exemplifica o formato que pode ser adotado pela tabela de escalonamento de um nó das RASSFs. Nesse exemplo é apresentada uma possível tabela de escalonamento de um nó #25 qualquer, supostamente responsável pela publicação do dado ‘Temperatura Vaso #1’, válida até às 02 horas, 39 minutos e 20 segundos de 19/04/2013, e também interessado no dado ‘Misturadora Ligada’.

Pela disposição da tabela, observa-se que o nó #25 já confirmou a reserva do *slot* 1 para a sua publicação e já recebeu a confirmação do seu vizinho #17 para a reserva do *slot* 4, referente ao reencaminhamento do dado publicado por #25. O nó #25 também recebeu a confirmação de que o vizinho #8 utilizará o *slot* 3 para encaminhar uma informação que é do seu interesse (‘Misturadora Ligada’, que não possui validade definida), mas que também deve ser reencaminhada para os seus vizinhos. Para tanto, o nó #25 confirmou o uso do *slot* 7.

A suposta tabela de escalonamento do nó #25 também possui alguns *slots* pré-reservados aguardando a confirmação do escalonamento. É aguardada a confirmação do escalonamento do dado ‘Densidade Mistura X’, válido até às 22 horas, 52 minutos e 59 segundos de 18/04/2013, através do vizinho #9 durante o *slot* 2, para que #25 possa confirmar sua reserva de reencaminhamento usando o *slot* 5, para que seja reencaminhado, em seguida, pelo vizinho #11 possivelmente no *slot* 6.

A priori, o escalonamento proporcionado pelo mecanismo realiza a seleção de *slots* em sequência para permitir a publicação e entrega das informações dentro de

<i>Slot</i>	Nó	Dado (Tipo / Validade)	Confirmação
1	25	Temperatura Vaso #1 / 130419-02:39:20	ACK
2	9	Densidade Mistura X / 130418-22:52:59	NACK
3	8	Misturadora Ligada	ACK
4	17	Temperatura Vaso #1 / 130419-02:39:20	ACK
5	25	Densidade Mistura X / 130418-22:52:59	NACK
6	11	Densidade Mistura X / 130418-22:52:59	NACK
7	25	Misturadora Ligada	ACK

Tabela 3.1: Tabela de Escalonamento de um Nó.

um mesmo superquadro. Novas reservas devem ser incluídas nos *slots* disponíveis no meio das tabelas de escalonamento ou acrescentadas ao final delas.

Desta forma, se o reuso espacial não fosse adotado, o total de *slots* reservados nas tabelas de escalonamento equivaleria à soma de todas distâncias, em saltos, desde cada *publisher* até cada *subscriber* presentes na RASSF. Contudo, conforme discutido na Subseção 3.3.2, em função do reuso espacial utilizado pelo mecanismo de sinalização, a dimensão das tabelas de escalonamentos pode ser reduzida na medida em que duas ou mais transmissões possam ocorrer simultaneamente, sendo guardada a separação de $2H$ saltos entre elas.

Assim, estabelecida uma área de reserva de H saltos em torno dos nós transmissores e receptores, o reuso espacial determinará o dimensionamento sequencial das tabelas de escalonamento. A partir desse dimensionamento, conforme discutido na Seção 3.2, é possível determinar a duração mínima da parcela STDMA do período de comunicação e, por conseguinte, a duração dos superquadros.

Uma vez que são obtidas tabelas de escalonamento de diferentes tamanhos para os diversos nós da RASSF, em virtude da forma distribuída do mecanismo de sinalização e em função da própria descentralização do tráfego de dados, após a inicialização da rede, todos os nós devem divulgar aos demais a dimensão da sua tabela de escalonamento. Com essa divulgação, toda a rede passa a adotar uma única duração de superquadro, proporcional à maior tabela de escalonamento gerada pelo mecanismo.

A partir da definição da duração do superquadro, todas as transmissões alocadas nos *slots* da parcela STDMA do período de comunicação passam a ocorrer periodicamente a cada superquadro, independentemente do término da validade de subscrições e a consequente desocupação do *slot* correspondente ou da frequência de atualização requerida pelas aplicações. Ao acomodar todas as transmissões de tempo

real da RASSF no superquadro, sua duração deve determinar o atraso de entrega que pode ser esperado do escalonamento, delimitando assim as restrições temporais e, conseqüentemente, as aplicações passíveis de atendimento pelo mecanismo de sinalização proposto.

Contudo, se as aplicações existentes exigirem frequências de atualização inferiores ao atraso de entrega que pode ser proporcionado por um determinado escalonamento e seu respectivo superquadro, uma forma possível de atendê-las seria através de um escalonamento hierárquico, com tabelas de várias dimensões para atender às diferentes demandas de frequências de atualização. A próxima subseção descreve uma estratégia de escalonamento hierárquico que pode ser adotada em associação ao mecanismo de sinalização *publish/subscribe*.

3.3.4 Escalonamento Hierárquico

A estratégia de escalonamento hierárquico considera que, durante a divulgação dos interesses, os atuadores que representam as aplicações de tempo real devem informar, junto dos demais parâmetros, a maior frequência de atualização admitida por cada aplicação.

Assim, a maior frequência requerida pelos atuadores determinará o menor atraso de entrega t_{min} a ser atendido pelo escalonamento, determinando a duração do superquadro e, por conseguinte, o total de *slots* que estarão disponíveis em uma tabela de escalonamento. Por sua vez, a menor frequência de atualização anunciada pelas aplicações determinará o maior intervalo de tempo entre dois envios de dados sucessivos, ou seja, o maior atraso de entrega t_{max} .

Para atender os diferentes níveis de frequências de atualização, cada nó da RASSF deverá possuir T tabelas de escalonamento, conforme definido na Equação (3.1), considerando que, por aproximação, todas as frequências anunciadas sejam múltiplas de t_{min} e apresentem uma granulosidade de 2^T .

$$T = 1 + \log_2\left(\frac{t_{max}}{t_{min}}\right) \quad (3.1)$$

Assim, todas as publicações destinadas a atender tempos de resposta menores ou iguais a $2^{T-1}t_{min}$ devem reservar *slots* nas tabelas de escalonamento de nível T . Ou seja, as tabelas de nível 1 deverão ser populadas pelo escalonamento de publicações que serão atualizadas a cada t_{min} , enquanto que nas tabelas de nível 2 deverão constar as publicações existentes nas tabelas de nível 1 somadas a outras que requeiram tempos de resposta máximos de $2t_{min}$.

Esta lógica se repete para os sucessivos níveis de frequência de atualização requeridos pelas aplicações de tempo real, gerando tantas múltiplas tabelas quanto forem necessárias. Desta forma, os seguidos superquadros alternam as tabelas de escala-

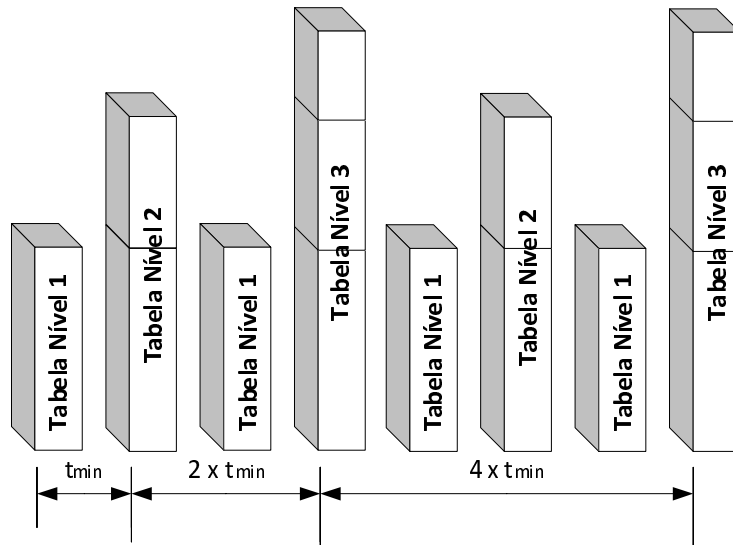


Figura 3.6: Tabelas de Escalonamento Hierárquico.

mento utilizadas, conforme exemplificado na Figura 3.6, com o objetivo de otimizar o uso dos recursos sem comprometer o atendimento às frequência de atualização requeridas.

3.4 Requisitos de Implementação e Uso

Conforme descrito nas seções anteriores, a proposta deste trabalho aborda uma solução para coordenação da comunicação entre os nós das RASSFs, visando o estabelecimento tanto das comunicações que não requerem o atendimento de restrições temporais quanto das comunicações de tempo real. Abordando exclusivamente as relações de comunicação entre os nós, a proposta não substitui a necessidade dos planos de gerenciamento que executam funções complementares e não prescindíveis ao funcionamento das redes, como a adoção de esquemas de conservação da energia e de gerenciamento da topologia da rede, entre outros.

Desta forma, para suprir tal necessidade e manter a descentralização objetivada para as RASSFs, essas redes devem contar com outros mecanismos que, uma vez empregados de forma conjunta à solução proposta neste trabalho, sejam capazes de gerenciar o funcionamento das RASSFs de modo igualmente distribuído e proporcionem um melhor aproveitamento dos recursos da rede.

Mecanismos distribuídos de gerenciamento da energia e dos períodos de dormência dos nós, a exemplo das propostas apresentadas em [61–63], quando associados ao mecanismo de sinalização *publish/subscribe* proposto, podem permitir a conciliação dos intervalos de tempo pré-definidos pelo escalonamento das comunicações com os períodos de dormência dos nós e, assim, possibilitar o uso mais

eficiente da energia disponível na rede.

Dispondo de um mecanismo de gerenciamento da topologia das RASSFs, este também pode ser associado à sinalização *publish/subscribe* de forma a controlar as potências de transmissão e, por conseguinte a conectividade da rede e seu consumo de energia, como foi sugerido em [64], ou visando estabelecer topologias de rede tolerantes a falhas, como a partir do algoritmo distribuído apresentado em [65].

Além dos mecanismos de gerenciamento necessários às funções complementares dessas redes, as RASSFs também devem contar com esquemas capazes de garantir o sincronismo entre seus nós para suportar as transmissões que se utilizam do acesso múltiplo por divisão do canal no tempo. Soluções existentes na literatura, como a proposta distribuída de CHENG *et al.* [66], podem fornecer a sincronização temporal entre os nós das redes de sensores sem fio e, com isso, possibilitar o atendimento às comunicações de tempo real através da parcela STDMA proposta neste trabalho.

As transmissões síncronas definidas nas tabelas de escalonamento das comunicações de tempo real requerem, ainda, que cada um dos nós da RASSF possua uma fila de interface de tamanho condizente à demanda da rede. Esta demanda pode ser definida a partir do número de *publishers* e *subscribers* existentes em cada RASSF, de tal forma que suas combinações de interesses originam o total de fluxos de dados fim a fim a ser transmitido de forma síncrona. Portanto, numa condição de pior caso, cada nó deve ser capaz de armazenar tantos pacotes quantos forem os fluxos de dados passíveis de serem estabelecidos em uma dada rede.

Assim, as aplicações que podem ser convenientemente atendidas pela solução proposta, apresentam limitações tanto no que tange ao tamanho das suas RASSFs quanto no que se refere à demanda imposta às redes.

Avaliando as diferentes demandas da rede, observa-se que, quanto maior for a demanda, mais fluxos de dados fim a fim devem ser estabelecidos para atender às aplicações e, desta forma, um maior número de *slots* deverá ser escalonado para uso dos nós. Assim, dependendo do maior ou menor reuso espacial adotado, o mecanismo de sinalização pode estabelecer tabelas de escalonamento de diferentes dimensões e, a partir delas, a duração da parcela STDMA e do período de comunicação da RASSF. Conforme discutido nas Seções 3.2 e 3.3, esses tempos determinam, respectivamente:

1. O maior atraso de entrega possível de ser observado, uma vez que o escalonamento gerado assegura que a publicação e entrega da informação ocorram dentro de um mesmo superquadro;
2. O intervalo dentro do qual um *subscriber* deve receber duas sucessivas atualizações de dados com origem em um único *publisher*.

Com isso, observa-se que a utilização da proposta deste trabalho pelas diferentes aplicações deve levar em conta os atrasos de entrega e as frequências de atualização

de dados compatíveis com o tamanho das tabelas de escalonamento geradas, proporcionalmente à demanda imposta à rede.

No entanto, apesar da abordagem utilizada neste trabalho conceder liberdade ao mecanismo de sinalização *publish/subscribe* para gerar tabelas de escalonamento sem um limite máximo de *slots* a serem reservados, com o objetivo de permitir uma análise de pior caso do seu desempenho também no que se refere aos tempos de entrega proporcionados, o uso efetivo da solução proposta deve considerar a limitação do tamanho do superquadro. Ao estabelecer um limite para a duração do período de comunicação, as restrições temporais impostas pelas aplicações podem ser atendidas na medida da sua necessidade, fazendo com que o mecanismo de sinalização rejeite novas solicitações de escalonamento de fluxos de dados quando não dispuser de *slots* livres nas tabelas de escalonamento.

Da mesma forma, considerando a relação de compromisso entre o reuso espacial adotado e as interferências admitidas na rede, conforme discutido na Subseção 3.3.2, a análise do desempenho do mecanismo de sinalização considerou diferentes valores para o parâmetro H , que determina o alcance das notificações de escalonamento e, por conseguinte, o reuso espacial estabelecido na RASSF. Contudo, no emprego efetivo da sinalização *publish/subscribe*, H pode ser definido a partir da subscrição dos interesses, de acordo com a criticidade de cada uma das suas aplicações.

A aplicação da solução proposta neste trabalho não é influenciada apenas pela demanda da rede e seu reuso espacial, como também pela própria topologia das RASSFs.

A disposição dos nós pode fazer com que as redes apresentem diferentes densidades de nós, refletindo num número maior ou menor de vizinhos dos nós e na quantidade de caminhos disponíveis entre *publishers* e *subscribers*, exercendo, assim, sua parcela de influência sobre os escalonamentos gerados para a RASSF. Em geral, diante da existência de mais vizinhos e rotas mais curtas, devem ser observados atrasos de entrega menores. Por outro lado, redes mais densas tendem a apresentar níveis mais altos de interferência durante as comunicações, requerendo a reserva de uma quantidade maior de *slots* nas tabelas de escalonamento para o estabelecimento de fluxos de dados concorrentes.

O número de nós existentes na rede, por sua vez, pode influenciar não somente os atrasos de entrega e os intervalos de atualização das aplicações, na medida em que define-se uma relação direta com a demanda por escalonamentos. Entretanto, o total de nós também pode afetar, em maior ou menor proporção, a capacidade dos sensores e atuadores de manterem o sincronismo das comunicações, dependendo do esquema de sincronização temporal adotado.

3.5 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foi apresentada a proposta de compartilhamento de redes de atuadores e sensores sem fio por aplicações com diferentes níveis de restrições temporais, utilizando o modelo de comunicação *publish/subscribe* para coordenar as interações entre os nós da rede, associado a uma estratégia de controle de acesso ao meio que preconiza a divisão do período de comunicação para permitir o uso concomitante de métodos de múltiplo acesso sujeitos à colisão e livres de contenção, e a adoção do próprio *publish/subscribe* para realizar a sinalização do escalonamento de forma distribuída.

Foi apresentado como o paradigma *publish/subscribe* pode ser utilizado para coordenar as interações entre os nós das RASSFs e permitir o compartilhamento dessas redes mesmo entre aplicações que apresentam diferentes restrições temporais. Em seguida foi descrito o particionamento do período de comunicação com a reserva de uma parcela para atender as aplicações de tempo real, enquanto o restante do superquadro destina-se às comunicações que não apresentam restrições temporais, incluindo as mensagens de controle para a coordenação e sinalização *publish/subscribe*.

Na Seção 3.3, foi detalhado o mecanismo de sinalização *publish/subscribe* proposto neste trabalho, apresentando sua integração ao modelo que coordena a interação entre os nós e descrevendo a nova funcionalidade introduzida pelas mensagens de notificação do escalonamento. Foi explicado através de algoritmos como os nós coordenam-se para a criação de seus escalonamentos de forma distribuída, visando o atendimento às restrições temporais impostas e a otimização dos recursos. No final dessa seção, foi apresentada uma estratégia de escalonamento hierárquico que pode ser aplicada ao mecanismo de sinalização proposto com o objetivo de atender frequências de atualização mais restritivas por parte das aplicações de tempo real e proporcionar uma otimização ainda maior de recursos.

Por fim, na Seção 3.4 foram discutidos os requisitos de implementação da proposta, incluindo a associação de outros mecanismos distribuídos destinados ao gerenciamento de funções complementares às funções de comunicação, como a conservação de energia e o sincronismo temporal dos nós. Também foram analisados os principais requisitos de uso da solução proposta e suas implicações para atendimento das aplicações de tempo real.

No próximo capítulo é realizada a avaliação da proposta através da implementação do mecanismo de escalonamento e da comunicação entre sensores e atuadores baseada no paradigma *publish/subscribe*.

Capítulo 4

Avaliação da Proposta

Este capítulo avalia a proposta apresentada no capítulo anterior através da implementação, em ambiente de simulação, do mecanismo de escalonamento e da comunicação entre sensores e atuadores baseada no paradigma *publish/subscribe*.

Para avaliar o desempenho da proposta, o modelo de comunicação utilizado na coordenação das interações entre os nós das RASSFs deve ser modificado para permitir a implementação do mecanismo de sinalização *publish/subscribe* proposto, mantendo a integração das diferentes demandas temporais que podem ser apresentadas pelas aplicações.

O uso do mecanismo de sinalização associado ao modelo *publish/subscribe* padrão deve permitir que aplicações com e sem restrições temporais compartilhem uma mesma rede, e possibilitar que aplicações sem restrições temporais se inscrevam e sejam atendidas através do próprio modelo de comunicação, enquanto aplicações de tempo real utilizam-se da sinalização *publish/subscribe* para escalonar sua comunicação de tempo real. A Seção 4.2 descreve a implementação, no ambiente de simulação, do mecanismo de sinalização proposto.

O desempenho do escalonamento obtido a partir do mecanismo de sinalização *publish/subscribe* para as comunicações entre sensores e atuadores em atendimento às aplicações de tempo real pode ser avaliado através das tabelas de escalonamento obtidas para os nós, bem como através da transmissão síncrona dos dados, segundo as reservas definidas nessas tabelas e a análise das interferências presentes, sobre o protocolo de múltiplo acesso TDMA. A Seção 4.3 descreve o protocolo de controle de acesso ao meio baseado na partição temporal do canal de comunicação que foi implementado, juntamente com os demais recursos usados para a avaliação do desempenho das comunicações de tempo real fundamentadas no mecanismo de escalonamento proposto.

Na próxima seção, é apresentado o ambiente de simulação escolhido para as implementações e os recursos disponíveis utilizados.

4.1 Ambiente de Simulação

A escolha do ambiente de simulação para a avaliação da proposta levou em consideração a existência prévia de uma implementação do paradigma *publish/subscribe* que pudesse ser modificada para possibilitar a coordenação das interações entre os nós, com o compartilhamento por aplicações com diferentes restrições temporais, e sua integração ao mecanismo de sinalização proposto.

O simulador escolhido foi o NS-2 [67], que conta com uma implementação do modelo *publish/subscribe* baseada no protocolo *Directed Diffusion*, brevemente citado no Capítulo 2. O protocolo foi disponibilizado nessa ferramenta para a simulação de redes de sensores sem fio por meio da adaptação de uma API descrita por SILVA *et al.* em [68]. Seus desenvolvedores disponibilizaram no simulador os três modos de comunicação desse protocolo descritos por HEIDEMANN *et al.* em [60], dentre os quais está o *Two-Phase Pull*.

O algoritmo *Two-Phase Pull* foi selecionado entre os modos de comunicação do *Directed Diffusion* para a implementação da proposta deste trabalho, em virtude da semelhança entre as mensagens *publish/subscribe* utilizadas nesse modo específico do *Directed Diffusion* e os tipos de mensagens que o mecanismo proposto requer que sejam trocadas para suportar a sinalização dos escalonamentos. Os detalhes da forma de implementação do mecanismo de sinalização são apresentados na próxima seção.

Além da disponibilidade do *publish/subscribe*, a escolha pelo simulador NS-2 também possibilitou o uso de alguns recursos que simplificaram as implementações necessárias para a simulação das transmissões síncronas por meio do protocolo TDMA, que permitiram avaliar o desempenho que pode ser obtido pelas RASSFs com o uso dos escalonamentos gerados segundo a proposta deste trabalho.

Um exemplo de recurso disponível para as simulações TDMA no NS-2 é o agente de roteamento NOAH (*No Ad-Hoc*) [69]. O NOAH suporta o estabelecimento de rotas estáticas em redes sem fio e poupa o esforço de desenvolvimento de um novo protocolo de roteamento para tratar especificamente das comunicações de tempo real que utilizam o TDMA como protocolo de múltiplo acesso. Este agente de roteamento pode ser adaptado para atuar individualmente em cada nó da RASSF e operar de forma associada às tabelas de escalonamento produzidas pelo mecanismo de sinalização proposto. Seu papel é dar o direcionamento adequado para todas as mensagens de tempo real recebidas e enviadas através de comunicações síncronas.

Esse e outros detalhes de implementação da comunicação síncrona no simulador NS-2 são apresentados na Seção 4.3.

4.2 Mecanismo de Sinalização do Escalonamento

Para a implementação da solução proposta para RASSFs compartilhadas por aplicações de tempo real e não tempo real, foi selecionado o algoritmo *Two-Phase Pull*, do protocolo *Directed Diffusion*, para ser adaptado e integrado ao mecanismo de sinalização proposto.

No *Directed Diffusion*, a difusão dos dados se dá sob demanda, quando um nó se inscreve a uma informação que conta com um conjunto particular de atributos, uma vez combinados com os atributos das próprias inscrições. Quando uma combinação de atributos é encontrada, estabelece-se um ‘gradiente positivo’ em direção ao nó, por meio do qual o interesse naquele particular conjunto de atributos se manifestou. Assim, uma vez publicado um dado, ele será encaminhado através de todos os gradientes estabelecidos até atingir o nó solicitante da inscrição.

O modo de comunicação *Two-Phase Pull* se caracteriza pelo estabelecimento da comunicação em duas fases: inicialmente, os *subscribers* buscam identificar os fornecedores de dados e, posteriormente, os *publishers* procuram os melhores caminhos até os *subscribers*.

Para esse esquema de comunicação, o algoritmo do *Directed Diffusion* utiliza o seguinte conjunto de mensagens *publish/subscribe*:

- As mensagens de ‘interesse’, que especificam os tipos de informações desejadas pelos *subscribers* e são disseminadas por inundação.
- O *Directed Diffusion* atribui a denominação de ‘dado exploratório’ às mensagens de dados enviadas, por inundação, em resposta a uma mensagem de interesse, com o objetivo de buscar os melhores caminhos até os nós de destino.
- As mensagens de ‘reforço positivo’ são enviadas pelo *subscriber* após o recebimento de um dado exploratório e têm a função de indicar ao *publisher* o melhor caminho para encaminhamento dos dados, enquanto as de ‘reforço negativo’ complementarmente indicam aos nós dos caminhos preteridos que seu uso não será mais necessário.
- Através de sucessivas mensagens de ‘dados’, as informações são enviadas dos *publishers* aos *subscribers* seguindo o gradiente que recebeu o reforço positivo.

Analisando as mensagens trocadas no modo *Two-Phase Pull*, observa-se a semelhança entre elas e as mensagens *publish/subscribe* indicadas no Capítulo 3 para a coordenação das interações entre os nós nas RASSFs, que permitem uma integração completa com o mecanismo proposto para a sinalização do escalonamento. Assim como descrito na Seção 3.1, as mensagens utilizadas pelo algoritmo *Two-Phase Pull* provocam a divulgação dos interesses e das informações disponíveis nos

publishers, seguida da confirmação dos interesses dos *subscribers* através das mensagens de ‘reforço positivo’, que direta ou indiretamente acabam realizando o registro das subscrições.

As mensagens de dados do *Directed Diffusion* equivalem, portanto, às notificações de eventos do modelo *publish/subscribe* e podem ser convenientemente modificadas para desempenhar as funções esperadas das mensagens de notificação do escalonamento, conforme detalhado na Seção 3.3.

Desta forma, para a implementação do mecanismo de sinalização do escalonamento, inicialmente foram realizadas as seguintes adaptações no protocolo do NS-2:

- **Interesse:**

As mensagens de interesse enviadas pelos *subscribers* receberam a inclusão de atributos que vão além da especificação do tipo de dado¹ e, quando requerido pelas aplicações de tempo real, eles se responsabilizam por caracterizar o nível de criticidade das suas restrições temporais e comunicar a frequência de atualização exigida pela aplicação.

- **Dado Exploratório:**

As mensagens enviadas pelos *publishers* para o anúncio dos dados disponíveis não só especificam o tipo de dado, como também associam à mensagem uma contagem de saltos, iniciada com o valor ‘1’ (um) pelo *publisher* e que deve ser incrementada por todos os nós que a reencaminharem.

Conforme detalhado na Seção 3.3, essa contagem fomenta o cômputo dos *slots* para as pré-reservas, ao mesmo tempo em que permite a manutenção da relação de anonimato entre *publishers* e *subscribers*. Além disso, essas mensagens podem informar uma possível previsão do *publisher* de interromper a publicação dos dados, como é o caso de sistemas que não operam de forma contínua e ininterrupta.

- **Reforço Positivo:**

As mensagens de reforço positivo, que confirmam a subscrição em determinado tipo de dado, além de conter sua especificação e a definição das suas características de tempo real, quando exigido pelas aplicações, também são acompanhadas da informação do *slot* que o mecanismo de escalonamento pré-reservou para o uso do próprio nó durante a parcela STDMA do período de comunicação.

¹A especificação do tipo dado é considerada toda e qualquer caracterização física da informação produzida, como o tipo de variável monitorada, o *range* de medição, sua localização física ou o objeto/equipamento monitorado.

As informações acrescentadas às mensagens do *Directed Diffusion* que seguem o modelo *publish/subscribe* oferecem, portanto, os subsídios necessários ao mecanismo proposto para realizar o escalonamento das comunicações de forma distribuída. Tais informações servem de parametrização para o mecanismo de sinalização do escalonamento que, após recebê-las, determina a reserva que será capaz de atender à subscrição que, então, será sinalizada aos demais nós afetados pela comunicação através do novo tipo de mensagem de notificação dos escalonamentos.

Na verdade, muito antes do envio das mensagens de notificação, o mecanismo proposto já atua junto às mensagens de subscrição, quando os nós intermediários identificam que, para atender um determinado pedido de subscrição com restrições temporais, precisarão realizar o escalonamento de um *slot* de tempo. Nesse momento, os nós consultam seu gerenciador de escalonamentos, que determinará, com base na tabela de escalonamento local do nó e a partir da contagem de saltos recebida junto com os dados exploratórios, qual será um possível *slot* capaz de atender à demanda

De forma geral, para a implementação propriamente dita do mecanismo de sinalização *publish/subscribe*, foi desenvolvido um gerenciador distribuído de escalonamentos que se responsabiliza pela execução do seguinte conjunto de ações no âmbito local de cada nó:

1. O cômputo das pré-reservas de *slots* originadas da necessidade de subscrição das aplicações de tempo real, conforme detalhado nos Algoritmos 1 e 2 do Capítulo 3;
2. O cálculo das reservas de *slots* a partir da capacidade de atendimento dos nós *publishers* e da disponibilidade de um caminho completo e sequencial para o estabelecimento de um fluxo de dados fim a fim, entre *publisher* e *subscriber*, de acordo com os Algoritmos 3 e 4, como também foi discutido no Capítulo 3;
3. A geração e tratamento de um novo tipo de mensagem, denominada ‘notificação de escalonamento’, que confirma a reserva do *slot* efetivamente utilizado no fluxo dos dados para seus nós vizinhos.

Para o cálculo das pré-reservas, o protocolo *Directed Diffusion* foi alterado de forma que, quando uma mensagem de dado exploratório é recebida, ao verificar a existência de uma subscrição compatível com o tipo de dado da mensagem, o nó consulta seu gerenciador de escalonamentos antes de encaminhar o possível reforço positivo confirmando a subscrição. Se necessário, o gerenciador adicionará uma pré-reserva à sua tabela de escalonamento e iniciará a contagem regressiva do intervalo dentro do qual será aguardada uma resposta de confirmação do escalonamento, antes de solicitar o reenvio do pedido de subscrição.

Quando a pré-reserva é gerada a partir da recepção de uma mensagem de reforço positivo, após verificar que não é o *publisher* da informação solicitada, o protocolo suspende o processo de encaminhamento do reforço positivo para realizar sua consulta ao gerenciador de escalonamentos. No gerenciador, novamente, todas as pré-reservas necessárias são criadas na tabela de escalonamento local e a informação do *slot* pré-reservado para uso do nó é retornada ao *Directed Diffusion* para que seja repassada juntamente com a mensagem de reforço positivo.

No cálculo das reservas, o protocolo nativo do NS-2 também foi modificado para, ao receber uma mensagem de reforço positivo com restrições temporais e se identificar como o *publisher* da informação solicitada, interromper o processo de encaminhamento de dados através das mensagens *publish/subscribe* padrão. Com a interrupção, o gerenciador de escalonamentos é chamado para cuidar de todas as etapas que se seguem. O gerenciador deve determinar o *slot* que irá atender à solicitação e criar a mensagem de notificação de escalonamento, que será enviada a todos os seus vizinhos.

Quando uma mensagem de notificação do escalonamento é recebida por um nó, a primeira ação desempenhada pelo gerenciador é verificar sua necessidade de reencaminhamento. Conforme discutido na Subseção 3.3.2, visando aumentar a imunidade dos escalonamentos aos sinais interferentes, o reuso espacial permitido pelo mecanismo de sinalização pode ser reduzido com o reencaminhamento das mensagens de notificação por uma distância de até $2H$ saltos do proprietário do *slot*, sendo H a distância (em saltos), ao redor os participantes da comunicação, protegida das interferências.

Após os reencaminhamentos necessários, o gerenciador dos escalonamentos faz o registro da reserva recebida na tabela de escalonamento do nó. Esse registro é efetuado independentemente do *slot* em referência encontrar-se vago ou não, como pode ser observado nas linhas 4 a 6 do Algoritmo 4. Conforme discutido na Subseção 3.3.1, sua presença na tabela de escalonamento evita que o mesmo *slot* seja usado indiscriminadamente, causando assim interferências indesejáveis. Contudo, conforme também discutido na Subseção 3.3.2, a depender do alcance das notificações de escalonamento, da disposição topográfica da rede e das demais interferências presentes no meio, o escalonamento simultâneo de um mesmo *slot* para dois nós distintos pode não originar, necessariamente, uma colisão.

Por fim, após realizar os reencaminhamentos e o registro da confirmação recebida através da notificação de escalonamento, o gerenciador de escalonamentos do nó verifica as pré-reservas existentes em sua tabela e avalia seu papel na continuidade do fluxo de dados até o *subscriber*. Uma vez que identifique-se como nó intermediário daquele fluxo de dados, o nó calcula sua própria reserva e envia sua confirmação aos vizinhos através de uma nova notificação de escalonamento.

Ao final das trocas de mensagens do *Directed Diffusion* e do mecanismo de sinalização, cada nó da rede de atuadores e sensores sem fio deve contar com um tabela de escalonamento em formato similar àquele apresentado na Tabela 3.1.

Assim, a partir do conjunto de tabelas de escalonamento dos nós das RASSFs, é possível estimar o desempenho do mecanismo proposto em termos de:

- Percentual de fluxos de dados fim a fim, avaliando a disponibilidade de *slots* que apresentem uma possibilidade nula de colisão capazes de estabelecer uma sequência, desde a publicação até a entrega ao *subscriber*;
- Atraso de entrega médio relativo, considerando a razão entre o total de *slots* decorridos desde a publicação do dado até a sua entrega e a distância (em saltos) entre *publisher* e *subscriber*.

Com base nas tabelas de escalonamento dos nós, também é possível simular as transmissões síncronas, levando em consideração as interferências causadas pelas sucessivas e simultâneas comunicações. A Seção 4.3 a seguir descreve as implementações desenvolvidas no NS-2 para viabilizar esse tipo de avaliação.

4.3 Comunicações Síncronas

A implementação das comunicações síncronas das aplicações de tempo real tem como objetivo avaliar o desempenho do mecanismo de sinalização *publish/subscribe* através da simulação das suas transmissões, utilizando a parcela STDMA do período de comunicação e adotando o reuso espacial definido pelas tabelas de escalonamento.

Uma vez que o *Directed Diffusion*, usado na implementação do mecanismo distribuído de escalonamento, não oferece os recursos necessários para a simulação das comunicações síncronas, foi desenvolvido um conjunto independente de implementações no NS-2 para representar a transmissão de dados entre os nós das aplicações de tempo real, através de uma camada de controle de acesso ao meio que utiliza o TDMA associado a um módulo, proposto originalmente por PIRES em [70], que analisa as interferências presentes no meio.

A estrutura completa de um nó das RASSFs de acordo com as implementações realizadas no NS-2 para permitir a simulação das comunicações síncronas das aplicações de tempo real é representada na Figura 4.1.

Com o objetivo de manter as premissas de desacoplamento de tempo e espaço adotadas para as RASSFs na implementação das comunicações síncronas, o anonimato das relações entre *publishers* e *subscribers* restringiu o conhecimento dos nós aos seus papéis de sensores ou atuadores, com seus respectivos dados e interesses, à sua vizinhança e sua própria tabela de escalonamento. Assim, partindo unicamente

das informações disponíveis localmente, os nós devem ser capazes de determinar o encaminhamento das mensagens publicadas e recebidas dos seus vizinhos ao longo dos sucessivos *slots* de tempo.

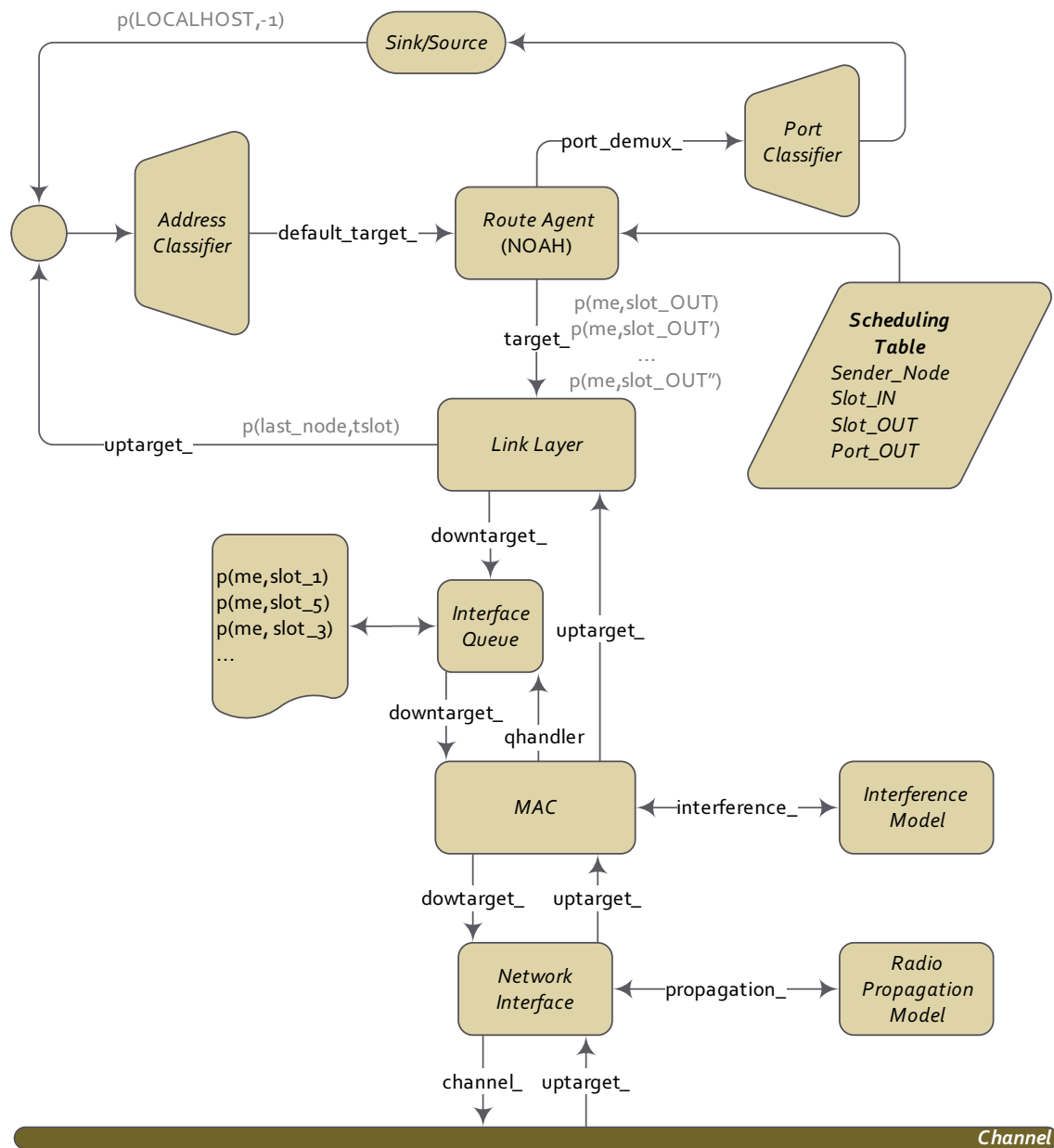


Figura 4.1: Estrutura de Implementação do Nó no NS-2.

A partir da possibilidade de realizar a transmissão das mensagens de dados de tempo real em *broadcast*, assegurada pelo próprio escalonamento quando concede ao nó o direito de transmitir um dado a quaisquer dos seus vizinhos, conforme mencionado na Subseção 3.3.3, tornou-se desnecessário o uso de um protocolo de roteamento pelos nós para permitir o estabelecimento das comunicações síncronas. Apesar disso, é conveniente o uso de um agente para coordenar as transmissões realizadas pelo nó durante as comunicações síncronas de forma a atender às neces-

sidades de encaminhamento das mensagens determinadas a partir do conhecimento local dos nós.

O agente de roteamento NOAH, escolhido para desempenhar esse papel de coordenação das transmissões durante as comunicações síncronas, caracteriza-se por executar o encaminhamento de mensagens através do uso de rotas estáticas, que dispensam a transmissão de qualquer tipo de pacote de roteamento. Essa característica possibilita inibir o processo de geração de rotas entre os nós da RASSF, uma vez que todo o relacionamento estabelecido entre os sensores e atuadores da rede é determinado pelas tabelas de escalonamento locais dos nós.

Assim, para possibilitar que o NOAH seja capaz de coordenar as transmissões síncronas das aplicações de tempo real, a implementação do agente disponível em [69] foi modificada para permitir a interpretação das tabelas de escalonamento dos nós que, no lugar dos tradicionais endereços de roteamento, indicam os *slots* de tempo que cada nó deverá utilizar na sua transmissão.

Entretanto, levando-se em consideração que as implementações do mecanismo de sinalização do escalonamento e das comunicações síncronas foram desenvolvidas de forma independente uma da outra, optou-se pela realização de um pré-tratamento das tabelas geradas pelo mecanismo de sinalização *publish/subscribe* para simplificar a utilização da tabela de escalonamento pelo NOAH. Com essa reestruturação, as tabelas foram reorganizadas para permitir identificar mais diretamente a destinação das mensagens recebidas, mantendo nas tabelas utilizadas pelo NOAH apenas as informações relevantes ao encaminhamento das mensagens de dados das aplicações de tempo real:

- O *slot* e o vizinho através do qual a mensagem deve ser recebida;
- A destinação a ser dada à mensagem recebida, especificando a porta através da qual ela deve ser repassada: *broadcast* para o reencaminhamento aos seus vizinhos e/ou com destino ao agente da aplicação;
- O *slot* que deverá ser utilizado no caso do reencaminhamento da mensagem.

Desta forma, as tabelas de escalonamento geradas pelo mecanismo de sinalização *publish/subscribe*, cujo formato foi representado na Tabela 3.1, foram reorganizadas em uma estrutura que associa os *slots* de entrada e saída, conforme exemplificado na Tabela 4.1.

Esta tabela apresenta a forma simplificada da suposta tabela de escalonamento do nó #25, utilizada pelo NOAH, considerando que todas as confirmações de reservas pendentes na Tabela 3.1 foram recebidas. Neste novo formato, nota-se que o nó #25 deve utilizar o *slot* 1 para publicar a sua própria informação e que, em seguida, no

Nó Remetente	<i>Slot</i> de Entrada	<i>Slot</i> de Saída	Porta de Saída
-	-	1	<i>broadcast</i>
9	2	5	<i>broadcast</i>
8	3	-	aplicação
8	3	7	<i>broadcast</i>

Tabela 4.1: Tabela de Escalonamento Simplificada de um Nó.

slot 2, deve receber uma mensagem de dado vinda do vizinho #9, para a qual deverá providenciar que o reencaminhamento ocorra durante o *slot* 5.

A tabela apresenta, em seguida, duas entradas que determinam duas ações diferentes que devem ser executadas mediante a recepção de um mesmo pacote enviado pelo vizinho #8 durante o *slot* 3. Assim, quando o nó receber esse pacote e encaminhá-lo ao NOAH, este deverá duplicar o pacote de encaminhar para ambos os destinos indicados. Nota-se, portanto, que todas as informações da Tabela 3.1 de uso irrelevante para o nó #25 foram descartadas com essa reestruturação.

Assim, quando um nó recebe uma mensagem de dado de uma aplicação de tempo real, o NOAH deve consultar a tabela de escalonamento simplificada e determinar o que deve ser feito com a mensagem. Se não for encontrada nenhuma referência ao seu *slot* e nó remetente, a mensagem é imediatamente descartada, uma vez que ela se enquadra na situação 4 apontada na Subseção 3.3.3. Caso contrário, se uma referência existente indicar que a mensagem destina-se à aplicação, a mensagem deve ser encaminhada às camadas superiores.

Por fim, se as referências existentes determinarem o encaminhamento da mensagem aos vizinhos do nó, o NOAH deve enviá-la para a camada de enlace, com destinatário em *broadcast* e acompanhada da informação do *slot* que as camadas inferiores deverão utilizar para transmití-la.

Na camada de enlace, as mensagens destinadas à transmissão em *broadcast* são enviadas para a fila da interface, ou do inglês IFQ (*Interface Queue*), onde devem permanecer armazenadas até o *slot* de tempo designado para serem encaminhadas. Desta forma, a implementação das comunicações síncronas também exigiu adaptações nos métodos da IFQ para possibilitar a retirada dos pacotes armazenados na fila de acordo com o *slot* informado, além de reposicionar aqueles que permanecem na fila.

A coordenação dos *slots* de tempo é realizada diretamente pela camada de controle de acesso ao meio, MAC (*Media Access Control*), que monitora os *slots* vigentes ao longo do ciclo de vida da rede. Por conseguinte, cabe a essa camada consultar a fila da interface e retirar as mensagens que devem ser encaminhadas em cada um

dos *slots* determinados.

Tal implementação não só exigiu a adaptação da IFQ, como o desenvolvimento completo de uma camada MAC tipo TDMA capaz de atender a essa demanda, uma vez que o NS-2 conta apenas com uma implementação simplificada deste tipo de acesso múltiplo, destinada a comunicações de único salto e de escalonamento centralizado, que designa apenas um *slot* por nó.

A MAC TDMA desenvolvida no ambiente do NS-2 determina a duração dos seus *slots* a partir do tamanho máximo do pacote que os *slots* deverão comportar e utiliza as especificações da camada física do padrão IEEE 802.11 [71] para implementar uma função que controla a contagem e o tempo de duração de cada *slot*, e as funções de transmissão e recepção de pacotes de dados.

Além de controlar as funções básicas do funcionamento desse tipo de camada, a nova MAC TDMA executa duas ações complementares:

1. O controle da retirada dos pacotes da IFQ conforme o *slot* de tempo corrente;
2. A interface com um módulo de interferência, que avalia o ruído e os sinais interferentes durante o *slot* para confirmar a capacidade de recepção dos nós.

No início de cada um dos *slots*, a MAC faz a verificação da fila de interface em busca dos pacotes que devem ser encaminhados durante o intervalo de tempo corrente. Sempre que existe um pacote a ser transmitido pelo nó, ele é retirado da IFQ e a função que controla a transmissão dos pacotes envia-o à camada física.

Por outro lado, para a recepção dos pacotes vindos da camada física, a MAC utiliza a função de controle do recebimento dos pacotes associada ao módulo de interferência, que avalia o ruído e os sinais interferentes durante o *slot* para confirmar se o nó será capaz de receber o pacote.

O ‘Módulo de SINR’ foi proposto no trabalho de PIRES [70] para medir o nível de interferência ao qual os receptores dos nós estão expostos durante o recebimento de um pacote numa rede sem fio, através da definição de um parâmetro de qualidade de recepção de um sinal, chamado SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) e calculado de acordo com a Equação (4.1).

$$SINR = \frac{P_r}{P_{nf} + \sum_{j=1}^n I_j} \quad (4.1)$$

A Equação (4.1) fornece o nível de SINR em um dado receptor, quando o nó recebe um pacote de potência P_r , num meio submetido a um ruído ambiente de potência P_{nf} e um conjunto de n sinais interferentes, onde cada sinal j chega ao receptor com uma potência igual a I_j . A cada instante o módulo atualiza o nível de SINR presente nos receptores dos nós, incrementado-os ou decrementado-os, de

acordo com “o início, término e nível de potência de todos os pacotes que atingem um terminal” [70].

Esta informação é utilizada, então, pela MAC TDMA para determinar o que deve ser feito com um pacote vindo da camada física em um dado *slot*:

1. Se a MAC TDMA não estiver ocupada com outra recepção de pacote e o nível de SINR percebido for superior à potência mínima de recepção do nó, definida como RX_{th} (do inglês, *Reception Threshold*), a MAC iniciará sua recepção;
2. Caso a MAC TDMA, apesar de não estar ocupada, identifique um nível de SINR inferior à potência mínima de RX_{th} , o pacote não poderá ser recebido e deverá incrementar a soma das interferências presentes no meio;
3. Quando a MAC não está ociosa, a entrega de um novo pacote pela camada física causa um incremento das interferências presentes e, conseqüentemente, modifica o nível de SINR, que se for mantido acima da RX_{th} não prejudica a recepção em curso, fazendo com que o novo pacote seja simplesmente capturado;
4. Se, no entanto, MAC não estiver ociosa e a entrega de um novo pacote causar a redução do nível de SINR abaixo da RX_{th} , o novo pacote provocará uma colisão, com o conseqüente incremento das interferências e descarte dos pacotes envolvidos.

Assim, a partir dessas implementações e das tabelas de escalonamento resultantes do mecanismo de sinalização *publish/subscribe* proposto é possível simular as transmissões síncronas previstas para a parcela STDMA de um superquadro e avaliar seu desempenho através de:

- Percentual de fluxos de dados fim a fim, desde o *publisher* até o *subscriber*, através da observação de *slots* em sequência e livres de colisão;
- Atraso de entrega médio, observado desde a criação do dado até a sua entrega ao *subscriber* (incluindo, portanto, todas as suas componentes citadas no Capítulo 2);
- A duração da parcela STDMA do período de comunicação.

4.4 Conclusões do Capítulo

Este capítulo apresentou as implementações desenvolvidas no NS-2 para permitir a avaliação do desempenho do mecanismo de sinalização *publish/subscribe* proposto.

As simulações foram divididas em duas etapas, onde a primeira se dedica à obtenção de resultados para a comunicação *publish/subscribe*, através do compartilhamento das RASSFs entre aplicações com diferentes restrições temporais, que dão origem ao escalonamento distribuído dos nós, registrado através de tabelas. A segunda etapa das simulações consiste na utilização das tabelas de escalonamento geradas anteriormente para promover a comunicação síncrona das aplicações de tempo real.

O próximo capítulo apresenta os cenários simulados e os resultados obtidos em cada uma das fases de simulação.

Capítulo 5

Resultados

Este capítulo analisa o desempenho do escalonamento das comunicações entre *publishers* e *subscribers* obtido a partir do mecanismo de sinalização implementado no NS-2. As avaliações realizadas examinam o sucesso do escalonamento gerado pelo mecanismo observando as chances e incidência de colisões, os fluxos de dados fim a fim estabelecidos, atrasos de entrega e a dimensão das tabelas de escalonamento.

Numa primeira etapa, são realizadas simulações baseadas no *Directed Diffusion* para o estabelecimento das interações entre os nós das RASSF e a troca de mensagens de controle *publish/subscribe*, visando o escalonamento distribuído das comunicações. Seus resultados são registrados em tabelas de escalonamento e outras estatísticas, que são apresentadas e analisadas na Seção 5.2.

Na etapa seguinte, as tabelas de escalonamento criadas pelo mecanismo de sinalização são utilizadas na simulação de transmissões síncronas, utilizando a implementação da camada MAC TDMA, possibilitando sua avaliação à luz das interferências observadas mediante o reuso espacial do meio. Os resultados registrados nessa segunda etapa são apresentados e analisados na Seção 5.3.

Na próxima seção são apresentados os cenários e os diferentes parâmetros utilizados em ambas as etapas de simulações.

5.1 Cenários de Simulação

Os cenários utilizados nas simulações são construídos em dois passos distintos. Inicialmente é criada a topologia da rede sem fio e, em seguida, seus nós recebem as atribuições dos papéis que deverão exercer nas redes de atuadores e sensores sem fio.

5.1.1 Geração da Topologia

As topologias de rede utilizadas nos cenários de redes sem fio das simulações foram obtidas a partir da disposição pseudoaleatória dos nós numa área quadrada de lado S . Para o posicionamento dos nós, aplicou-se um algoritmo que garante a conectividade da RASSF, ao mesmo tempo em que limita superiormente o grau de vizinhança possível de ser assumido pelos seus nós.

Esse grau máximo de vizinhança, G_{max} , é arbitrariamente definido no início das simulações e influencia diretamente o número médio de vizinhos, ou o ‘grau médio’, que os nós de cada topologia podem apresentar. Indiretamente, este parâmetro acaba por determinar o número médio de saltos entre cada dois pares de nós existentes na rede.

O algoritmo de posicionamento pseudoaleatório empregado define as coordenadas X e Y dos sucessivos nós, de tal forma que a escolha aleatória de um novo par de coordenadas respeite às seguintes restrições, quando consideradas as posições determinadas previamente para o conjunto de nós localizados dentro do alcance de transmissão do novo nó:

1. O novo nó deve ser posicionado dentro do alcance de transmissão de, pelo menos, um nó preexistente;
2. O total de nós preexistentes localizados dentro do alcance de transmissão do novo nó não deve ser superior ao valor definido para G_{max} ;
3. O novo nó não deve ser posicionado a uma distância inferior a 30% do alcance de transmissão de qualquer um dos nós do conjunto que compõe a sua vizinhança;
4. Com a inclusão do novo nó, nenhum nó preexistente deve ter o seu grau de vizinhança aumentado para um valor superior a G_{max} .

Caso alguma das restrições não seja respeitada, o algoritmo descarta as coordenadas pré-selecionadas e escolhe aleatoriamente um novo par de coordenadas, verificando igualmente sua conformidade às restrições impostas. Isso se repete até que a posição de todos os nós da rede esteja devidamente determinada. Com todos os nós posicionados, o algoritmo verifica a conectividade da rede e, caso encontre um nó desconexo, todas as coordenadas são descartadas e processo de posicionamento dos nós é completamente reiniciado.

Os resultados apresentados nas Seções 5.2 e 5.3 utilizam os seguintes valores de grau máximo de vizinhança na disposição dos nós durante a construção da topologia: 4, 6, 8 e 10, resultando nos graus médios e nas distâncias médias entre *publishers* e *subscribers* apresentadas na Figuras 5.1(a) e 5.1(b), respectivamente.

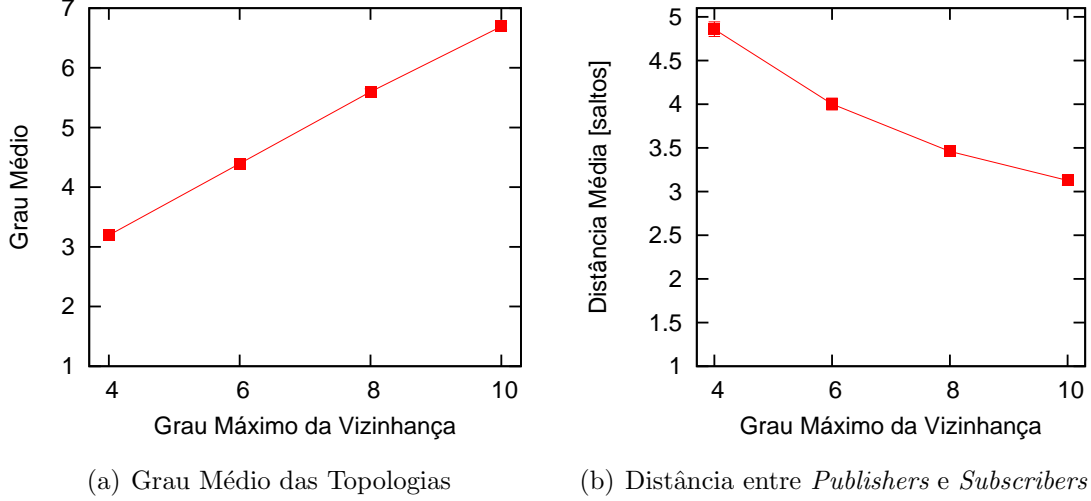


Figura 5.1: Grau dos Nós e Distância Média *Publisher-Subscriber*.

Com o intuito de avaliar a influência da densidade da rede sobre os resultados obtidos, mantendo o total de nós N constante e variando G_{max} , como proposto em [72], as dimensões da topografia de cada simulação foram manipuladas de acordo com a Equação (5.1). Nesta equação, o alcance de transmissão d_{rx} é determinado segundo o modelo de propagação do sinal e outros parâmetros adotados nas simulações, como a altura das antenas, h_t e h_r , a frequência de transmissão, definida em função do comprimento de onda λ , a perda no sistema L e as potências de transmissão P_t e de recepção mínima RX_{th} dos nós.

$$S = d_{rx} \sqrt{\frac{N\pi}{G_{max} + 1}} \quad (5.1)$$

O uso do modelo de propagação *two-ray ground* divide a área de recepção do sinal de acordo com a distância de *cross-over*, calculada segundo a Equação (5.2). Até uma distância máxima de d_c a partir do transmissor, assume-se que a propagação ocorre em espaço livre e segue a Equação (5.3). Após essa distância, o modelo *two-ray ground* passa a considerar a influência da onda refletida no solo, calculando a potência recebida por meio da expressão (5.4).

$$d_c = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda} \quad (5.2)$$

$$d_{free} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r}{RX_{th} L}} \quad (5.3)$$

$$d_{2rg} = \sqrt[4]{\frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{RX_{th} L}} \quad (5.4)$$

Taxa de transmissão TX_{rate}	250 kbps [73]
Frequência de transmissão f_t	2,4 GHz [73]
Potência de transmissão P_t	0 dBm [73]
Potência mínima de recepção RX_{th}	-94 dBm [73]
Potência do ruído ambiente P_{nf}	-100,6 dBm
Potência mínima de detecção de sinal CS_{th}	-99,6 dBm
Perda no sistema L	0 dB
Altura da antena, h_t e h_r	0,25 m
Ganho da antena, G_t e G_r	0 dB

Tabela 5.1: Principais Parâmetros de Simulação.

Tendo isso em vista, as simulações utilizam ambas as Equações (5.3) e (5.4) na determinação do alcance de transmissão dos nós. Ou seja, d_{rx} será igual a d_{2rg} enquanto não ultrapassada a distância de *cross-over*, e igual a d_{free} em caso contrário.

Na seleção desses e outros parâmetros adotados em ambas etapas de simulação, a referência foi o *hardware* dos sensores sem fio tipo MICAz [73]. As especificações obtidas a partir da sua folha de dados e outros parâmetros definidos para as simulações são apresentados na Tabela 5.1. Com esses parâmetros e os valores de grau máximo definidos anteriormente, foram gerados 480 cenários, ou seja, 120 cenários para cada conjunto de topologias definido pelo grau máximo de vizinhança dos seus nós.

5.1.2 Estabelecimento das RASSFs

As simulações realizadas para avaliação do mecanismo de sinalização *publish/subscribe* utilizam cenários de redes sem fio de múltiplos saltos formadas por N nós, dentre os quais M operam como *publishers* de informações, representando os sensores das RASSFs, e $(N - M)$ atuam como *subscribers*, representando seus nós atuadores.

Todos os $(N - M)$ *subscribers* que participam das simulações apresentam interesses em um único tipo de dado, entretanto, considera-se que apenas alguns atendem aplicações que requerem algum tipo de restrição temporal. Desta forma, variando a proporção de atuadores que possuem restrições temporais ativas, aqui denominados ‘atuadores ativos’, modifica-se a demanda por escalonamentos da rede de atuadores e sensores sem fio.

O mesmo se dá com os M *publishers* existentes nas RASSFs simuladas, que disponibilizam dois conjuntos distintos de atributos para os dados. Apenas as divulgações

de dados que combinam com as especificações das subscrições dão origem a fluxos de dados entre *publishers* e *subscribers*. Assim, variando a proporção de sensores que publicam dados compatíveis com os interesses dos atuadores de tempo real, aqui denominados ‘sensores ativos’, o aumento no número de divulgações que combinam com os interesses dos *subscribers* também modifica a demanda por escalonamentos, aumentando o total de fluxos de dados que devem ser escalonados.

Os resultados apresentados nas próximas Seções consideram cenários formados por 30 nós, divididos equitativamente nos papéis de sensores e atuadores. O percentual de atuadores de tempo real ativos assumiu os seguintes valores nas diferentes simulações realizadas: 10, 20, 30 e 40% do total de nós. Da mesma forma, as diferentes simulações consideraram que o número de sensores ativos da RASSF foi de 10, 20, 30 e 40% do total de nós da rede.

Na primeira etapa de simulações, as combinações de dados e interesses que não apresentam restrições temporais estabelecem gradientes positivos para a troca de dados regida pelo protocolo *Directed Diffusion*, enquanto aquelas identificadas para aplicações de tempo real utilizam-se deste protocolo, associado ao mecanismo de sinalização, unicamente para a geração das tabelas de escalonamento, que serão utilizadas posteriormente nas transmissões síncronas.

Nessas simulações, os experimentos têm duração de 500 unidades de tempo, iniciados após o estabelecimento da topologia e da designação dos nós aos seus respectivos papéis. Seguindo o sequenciamento das mensagens definido pelo modo de comunicação *Two-Phase Pull* do *Directed Diffusion*, independentemente de tratar-se de uma subscrição de tempo real ou não, os interesses dos *subscribers* são divulgados nos primeiros instantes de simulação, escolhidos aleatoriamente. Ao término dos anúncios de interesses, ocorrem, em instantes igualmente aleatórios, as divulgações dos dados disponíveis pelos *publishers*.

Assim, a qualquer instante que os atuadores identifiquem a disponibilidade de dados que combinem com seus interesses, eles iniciam o processo de subscrição e de pré-reserva do escalonamento, este último quando têm a função de atender aplicações de tempo real. Neste caso, os atuadores iniciam uma contagem de tempo regressiva, de valor arbitrário, que realiza até três tentativas de reenvio da mensagem de subscrição contendo a pré-reserva, caso sua confirmação de reserva não chegue antes do prazo estipulado.

As mensagens de notificação do mecanismo de sinalização, por sua vez, conforme detalhado na Seção 4.2, são encaminhadas a até $2H$ saltos do proprietário do *slot*, resguardando a vizinhança de transmissor e receptor da comunicação síncrona por H saltos. Assim, a variação nos valores do parâmetro H adotados nas simulações possibilita analisar a relação de compromisso, discutida na Seção 3.3, entre o reuso espacial e a susceptibilidade a interferências do escalonamento viabilizado pela si-

nalização *publish/subscribe*. Desta forma, as simulações da Seção 5.2 consideram os seguintes valores de H para o encaminhamento das notificações do escalonamento: 2, 3, 4 e 5 saltos.

Na segunda etapa de simulações, considera-se que os cenários e as distribuições das funções de *publishers* e *subscribers* encontram-se consolidados e as tabelas de escalonamento geradas na primeira etapa determinam como cada nó utiliza o meio durante as comunicações síncronas regidas pela camada MAC TDMA. Entretanto, conforme discutido na Seção 4.3, a definição do tamanho dos *slots* de tempo utilizados nessa camada requer a determinação do tamanho máximo dos pacotes empregados. Desta forma, foram adotados pacotes de dados de 150 *bytes* para as simulações da Seção 5.3, tomando como referência o estudo desenvolvido por VU-RAN & AKYILDIZ em [74] para determinação do tamanho ótimo de pacotes para redes de sensores sem fio.

Considerando, assim, a taxa de transmissão definida na Tabela 5.1 e que os pacotes transmitidos através da MAC TDMA possuem um tamanho máximo (PKT_{size}) de 150 *bytes*, essas simulações determinam o tempo de duração de cada *slot* por meio da Equação (5.5). E, a partir desse tempo de *slot*, serão determinadas a duração do período STDMA e, em consequência deste, o tempo de duração dos experimentos realizados nesta segunda etapa.

$$t_{slot} = 1,1 \frac{8PKT_{size}}{TX_{rate}} \quad (5.5)$$

Assim como se deu na primeira etapa de simulações, somente após o estabelecimento da topologia e da designação dos nós aos seus respectivos papéis, os sensores iniciam a geração dos dados, que deverão ser disponibilizados para as aplicações de tempo real. Os pacotes são criados no início do período STDMA e aguardam o início do primeiro *slot* que deverá ser utilizado no seu envio. Os pacotes recebidos pelos nós intermediários, por sua vez, são armazenados até o próximo *slot* designado para o seu encaminhamento, o que se repete sucessivamente até sua entrega a um ou mais dos atuadores que se inscreveram ao dado. Assim, sempre que não houver uma colisão, um pacote transmitido por um sensor será certamente recebido pelo respectivo atuador dentro de um mesmo período STDMA.

Para possibilitar uma análise de pior caso dos escalonamentos, as simulações consideram a produção homogênea e periódica do dados para que todas as transmissões que possam causar possíveis interferências estejam presentes em todos os períodos STDMA simulados. Deste modo, as transmissões ocorridas em um período serão invariavelmente iguais aquelas transmitidas nos períodos subsequentes, possibilitando adicionalmente a redução do tempo de duração dos experimentos.

5.2 Escalonamento *Publish/Subscribe*

Conforme descrito no Capítulo 4, o *Directed Diffusion* existente no NS-2 foi modificado para integrar o mecanismo de sinalização *publish/subscribe* do escalonamento e permitir o compartilhamento de RASSF entre aplicações com diferentes restrições temporais [75]. Utilizando tal implementação, foram simuladas 64 combinações distintas de parâmetros H e proporções de atuadores e sensores ativos em cada uma das diferentes topologias geradas, totalizando 30.720 simulações.

Cada simulação resultou em um conjunto de tabelas de escalonamento, uma para cada nó da RASSF. O conjunto de tabelas obtido através de cada simulação foi analisado individualmente com o objetivo de estimar o seu desempenho para a aplicação nas comunicações síncronas dos dados de tempo real. As estimativas extraídas dão conta do:

1. Percentual de fluxos de dados fim a fim, estabelecidos entre *publishers* e seus respectivos *subscribers*;
2. Atraso de entrega médio relativo, em *slots*/saltos.

O percentual de fluxos de dados fim a fim proporcionado pelo mecanismo de sinalização avalia a disponibilidade de *slots* que, em sequência, sejam capazes de assegurar que um dado enviado por um *publisher* seja devidamente entregue aos *subscribers* de destino. A estimativa dessa medida foi obtida a partir da análise detalhada das tabelas de escalonamento dos nós em busca de sequências de *slots* que permitam que tais entregas se realizem.

O atraso de entrega médio relativo consiste na razão entre: o total de *slots* decorridos desde a publicação do dado até a sua entrega e a distância (em saltos) entre *publisher* e *subscriber*. Sua estimativa, portanto, é obtida a partir dos fluxos de dados estabelecidos que sejam considerados completos, sendo contabilizada a distância em saltos que deverá ser percorrida pelos dados entre cada par de *publisher* e *subscriber*, além dos *slots* empregados no primeiro e último saltos, fornecendo uma medida normalizada do atraso médio de entrega esperado para os dados.

5.2.1 Grau Máximo

Os resultados estimados para essas métricas são tão melhores quanto maior o grau máximo atribuído às suas topologias de rede, uma vez que, conforme demonstrado na Figura 5.1(b) da seção anterior, as distâncias entre *publishers* e *subscribers* tendem a reduzir com o aumento do grau de vizinhança dos nós. A Figura 5.2(a) apresenta a estimativa de fluxos de dados fim a fim estabelecidos para RASSFs com diferentes valores de grau máximo, demonstrando um desempenho superior a 85% e crescente, para quaisquer dos graus de vizinhança simulados.

Da mesma forma, é natural a melhoria de desempenho das estimativas de atraso de entrega médio, observadas na Figura 5.2(b), como um benefício direto do menor número de saltos que separam *publishers* e *subscribers*.

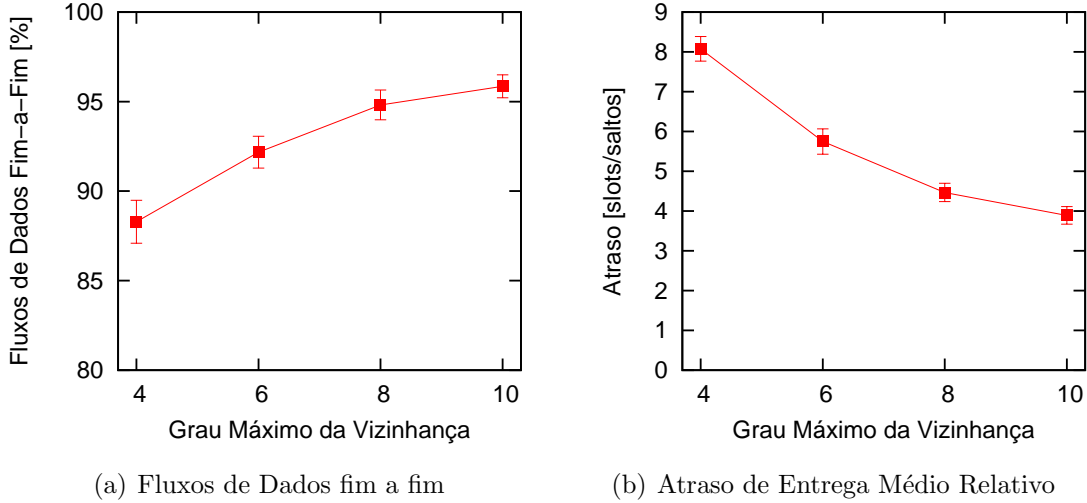


Figura 5.2: Influência do Grau Máximo sobre as Métricas Estimadas.

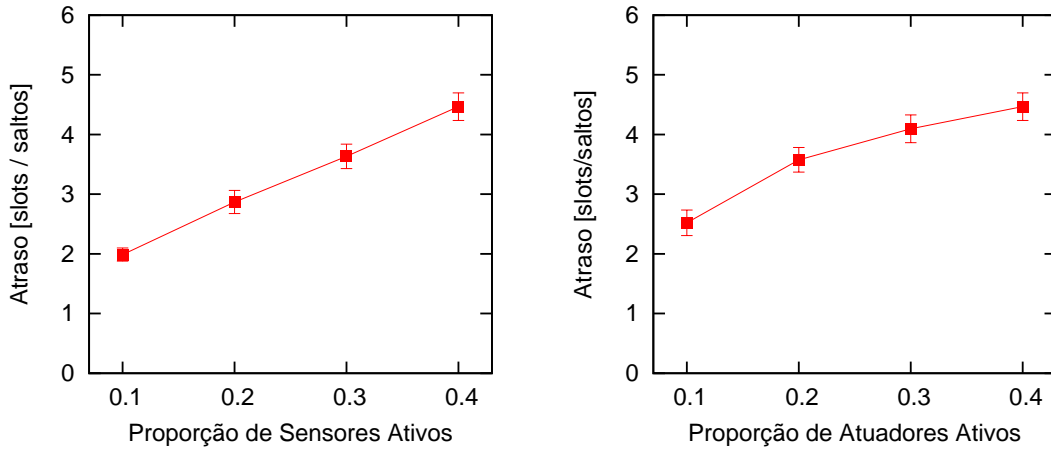
Os resultados apresentados na Figura 5.2 consideram que 40% dos nós atuam como sensores ativos e outros 40%, como atuadores de tempo real ativos. Espera-se, contudo, que a proporção de nós ativos nas RASSFs afete não só o percentual de fluxos de dados fim a fim, como também o atraso médio relativo, conforme será analisado na próxima subseção.

5.2.2 Proporção de Nós Ativos

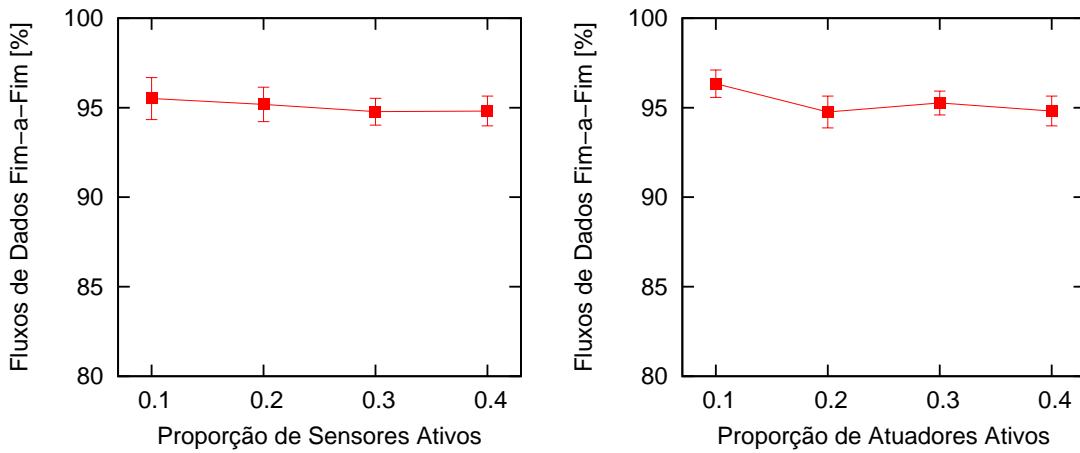
As variações na proporção de nós ativos nas redes, sejam sensores ou atuadores de tempo real, afetam o estabelecimento dos fluxos de dados fim a fim entre *publishers* e *subscribers* e o atraso de entrega dos dados em decorrência das mudanças provocadas na demanda por escalonamentos. Assim, foi realizada uma avaliação para diferentes percentuais de atuadores de tempo real e sensores ativos nessas redes.

A Figura 5.3 apresenta os efeitos observados sobre as estimativas dessas métricas em função dos diferentes percentuais de nós sensores e atuadores ativos, em topologias com grau máximo igual a 8. Nas simulações que avaliam a influência da variação de sensores ativos, o percentual de atuadores de tempo real ativos foi mantido em 40% e, da mesma forma, quando foi avaliada a variação dos atuadores, a proporção de sensores ativos foi mantida no mesmo patamar.

As Figuras 5.3(a) e 5.3(b) demonstram que, conforme esperado, o atraso de entrega médio relativo cresce com o aumento da demanda de escalonamentos, uma vez que a maior proporção de nós ativos entre os sensores ou atuadores de tempo real



(a) Percentual de Sensores e o Atraso de Entrega Médio Relativo (b) Percentual de Atuadores e o Atraso de Entrega Médio Relativo



(c) Percentual de Sensores e o Fluxo de Dados fim a fim (d) Percentual de Atuadores e o Fluxo de Dados fim a fim

Figura 5.3: Influência dos Percentuais de Nós Ativos sobre as Métricas Estimadas.

representa um aumento no número de reservas de *slots* necessárias no escalonamento. Com o aumento na proporção de atuadores de tempo real ativos, cresce o número de *subscribers* e subscrições para um mesmo tipo de dado. Da mesma forma, o aumento na proporção de sensores ativos, leva à disponibilização de um número maior de novos dados a serem transmitidos. Em ambos, o crescimento esperado para a tabela de escalonamento tende a gerar um maior afastamento entre os *slots* utilizados para as transmissões do primeiro e último saltos no encaminhamento do fluxo de dados fim a fim, implicando no maior atraso de entrega estimado.

Contudo, nos resultados da Figura 5.3(b), nota-se que o crescimento da tabela de escalonamento é acompanhado por um aumento no reuso espacial, refletindo um dos benefícios do anonimato proporcionado pelo modelo *publish/subscribe*, discutido no Capítulo 3, e demonstrando a capacidade do mecanismo de sinalização proposto em reservar um mesmo *slot* para os diferentes *subscribers* de um dado, à medida que

guardem uma distância mínima de separação uns dos outros.

Na Figura 5.3(c), observa-se que o aumento da demanda de escalonamentos proporcionada pelo maior número de sensores ativos nas RASSFs apresenta pouca influência sobre a estimativa de fluxos de dados fim a fim proporcionados pelo mecanismo de escalonamento. Estima-se assim que, mantendo o número de subscrições constante de rede, o mecanismo de sinalização deva ser capaz de atender a demanda de escalonamento dos *subscribers* com uma redução quase imperceptível diante da maior disponibilidade de dados para publicação.

Na Figura 5.3(d), por sua vez, observa-se que o aumento na proporção de atuadores de tempo real ativos nas RASSFs provoca uma pequena redução na estimativa de fluxos de dados fim a fim proporcionados pelo mecanismo de escalonamento. Essa redução é esperada em virtude do aumento da disputa entre os nós pela atribuição de *slots* para as suas respectivas tabelas de escalonamento, pois, com o maior número de atuadores, observa-se um maior volume de pedidos de subscrição na rede, aumentando a quantidade de *slots* que deverão ser escalonados pelos *publishers* e nós intermediários.

Tal condição também aumenta a susceptibilidade do mecanismo de sinalização às falhas, causadas principalmente pelo envio simultâneo de notificações de escalonamento para um mesmo *slot* por dois ou mais nós localizados a uma distância inferior a $2H$ saltos uns dos outros. Desta forma, espera-se que a distância H atribuída para as mensagens de notificação do escalonamento também influencie as estimativas de percentuais de fluxos de dados fim a fim, como será analisado na próxima subseção.

5.2.3 Alcance das Notificações de Escalonamento

Pelos resultados apresentados na Figura 5.4(a), constata-se que, apesar do objetivo do aumento do parâmetro H consistir na ampliação da área de proteção contra interferências ao redor dos nós transmissores e receptores das comunicações, as estimativas para o percentual de fluxos de dados fim a fim apresentam uma tendência inversa de redução do desempenho.

Esse comportamento é observado devido à forma como são obtidas as estimativas através das tabelas de escalonamento, as quais consideram inadequados ao uso os *slots* designados a mais de um nó, quando separados por uma distância de até $2H$ saltos. Sua ocorrência se justifica pelo aumento das chances de um envio simultâneo com a elevação do parâmetro H , uma vez que uma maior distância e um maior número de nós estão envolvidos.

O mesmo acontece com os resultados observados para o atraso de entrega médio relativo, apresentados na Figura 5.4(b), para os quais era esperada uma elevação desse tempo com o aumento de H . Tal diferença é gerada diretamente pelo compro-

metimento das estimativas dos fluxos de dados fim a fim, que são desconsideradas da contabilização do atraso de entrega relativo.

Assim, a pequena redução observada na estimativa do atraso de entrega ocorre porque, com o aumento do parâmetro H , os fluxos de dados de rotas mais longas apresentam chances maiores de ocorrência de notificações simultâneas de um mesmo *slot*, restando às estimativas de atraso de entrega médio relativo contabilizar apenas os fluxos com menor sujeição à simultaneidade, que são os mais curtos e menos sujeitos a atrasos.

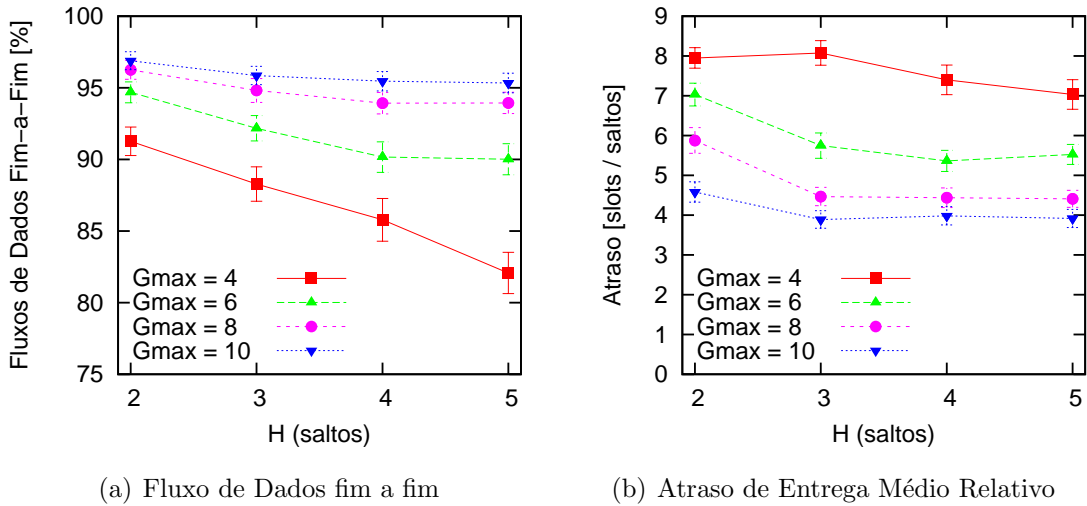


Figura 5.4: Influência do Alcance das Notificações de Escalonamento sobre as Métricas Estimadas.

No entanto, apesar das estimativas extraídas das tabelas de escalonamento apontarem para essa redução de desempenho na construção de fluxos de dados fim a fim pelo mecanismo de simulação com a elevação do valor de H , espera-se que o menor reuso espacial proporcione uma redução nos sinais interferentes presentes no meio de comunicação e gere um efeito diametralmente oposto sobre o percentual de fluxos de dados fim a fim observado durante as comunicações síncronas. A análise do desempenho do mecanismo de sinalização durante as comunicações síncronas é apresentada na próxima seção.

Analisando ainda os resultados da Figura 5.4(a) sob o ponto de vista das topologias obtidas com diferentes graus de vizinhança, observa-se que o efeito do parâmetro H sobre o percentual de fluxos de dados fim a fim é fortemente influenciado pelo valor do maior grau admitido para os nós da rede ou, mais diretamente, pela distância média observada entre *publishers* e *subscribers*, apresentada na Figura 5.1(b). Da mesma forma, a partir da Figura 5.4(b), nota-se que a influência do parâmetro H sobre do atraso de entrega tende a ser igualmente mais acentuada das topologias de menor grau. Com efeito, a adoção de valores de H superiores a 3 saltos deve

exercer pouca influência sobre a métrica em topologias com grau máximo igual a 10, uma vez que a distância média entre seus *publishers* e *subscribers* é pouco superior a 3 saltos, enquanto é esperado das notificações de escalonamento que sejam encaminhadas por até 6 saltos (ou $2H$ saltos).

Um dos efeitos negativos do aumento excessivo do parâmetro H , diz respeito ao volume de *overhead* introduzido na comunicação *publish/subscribe*, conforme será analisado na próxima subseção.

5.2.4 *Overhead* do Escalonamento

Além das estimativas extraídas das tabelas de escalonamento, obtidas a partir do mecanismo de sinalização *publish/subscribe*, foi realizada uma análise estatística das mensagens de controle trocadas durante a inicialização da rede, incluindo tanto as mensagens de divulgação e subscrição quanto as notificações introduzidas pelo mecanismo de escalonamento. Com a totalização das mensagens de controle trocadas, foi calculado o *overhead* gerado pelo mecanismo de escalonamento, correspondendo à razão entre as mensagens de notificação do escalonamento e o total de mensagens de controle transmitidas.

O *overhead* gerado pelo encaminhamento das notificações de escalonamento deve ser influenciado, principalmente, pelo aumento da demanda, impulsionado pela variação nas proporções de nós ativos nas RASSFs, mas também pelo alcance das notificações de escalonamento determinado a partir do parâmetro H .

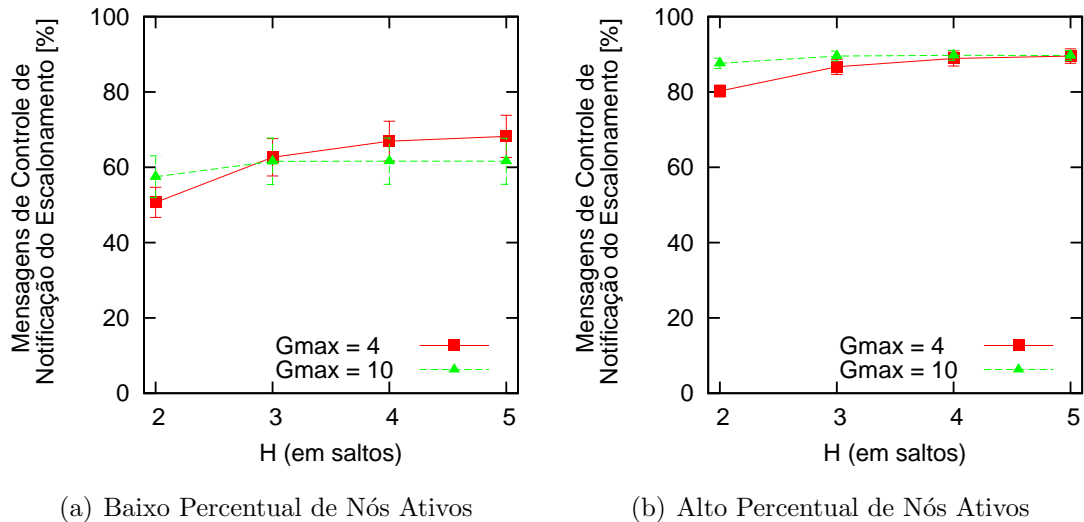


Figura 5.5: Influência de H e do Grau Máximo sobre o *Overhead*.

Os resultados apresentados na Figura 5.5 demonstram o *overhead* gerado pelo mecanismo de sinalização em diferentes condições de carga da RASSF. Na Figura 5.5(a), o escalonamento das subscrições de apenas 10% dos nós, como atuadores de tempo

real ativos, recebidas por outros 10% de nós, no papel de sensores ativos, demonstra que cerca de 60% de mensagens de controle trocadas na rede correspondem a mensagens de escalonamento. Assim, quando a proporção de nós ativos atinge 80%, sendo 40% sensores e o restante atuadores de tempo real, a sobrecarga requerida pode atingir 90% do tráfego de controle durante as comunicações *publish/subscribe*, enquanto os *subscribers* aguardam pelo estabelecimento dos fluxos de dados, como demonstrado na Figura 5.5(b).

A partir da Figura 5.5 observa-se ainda que, da mesma forma como as demais métricas obtidas a partir das tabelas de escalonamento, detalhadas nas subseções anteriores, a influência do parâmetro H sobre a medida de *overhead* está fortemente ligada à distância média entre os pares de *publishers* e *subscribers* e, por conseguinte, ao grau máximo das topologias. Desta forma, nota-se um efeito mais acentuado da elevação de H sobre as topologias de menor grau de vizinhança.

Por outro lado, como também pode ser verificado na Figura 5.5, as topologias de grau máximo elevado apresentam um grande número de vizinhos para receber e encaminhar cada uma das notificações de escalonamento geradas a partir da reserva de um *slot*. Com isso, elas devem apresentar um *overhead* naturalmente alto, mesmo quando considerada a utilização de valores mais baixos para o parâmetro H .

5.3 Comunicação de Tempo Real

As estimativas de fluxos de dados fim a fim e atraso de entrega obtidas para o escalonamento do meio compartilhado entre os nós das RASSFs, proporcionado pelo mecanismo de sinalização *publish/subscribe*, podem ser validadas frente às comunicações síncronas simuladas através do protocolo de acesso múltiplo por divisão no tempo implementado no NS-2, conforme descrito no Capítulo 4.

Utilizando as tabelas de escalonamento previamente geradas, a camada MAC TDMA desenvolvida no simulador e o agente NOAH adaptado para o encaminhamento temporal das comunicações, nessa segunda etapa foram simulados os mesmos 30.720 cenários empregados anteriormente. Diferentemente das estimativas obtidas através das tabelas de escalonamento, nessas simulações foi possível avaliar o desempenho do mecanismo de sinalização através da efetivação das transmissões síncronas, que levam em consideração o conjunto das potências interferentes presentes no meio em razão do reuso espacial.

Desta forma, foram extraídas as seguintes métricas desta etapa de simulações:

1. Duração do período STDMA, em *slots*;
2. Atraso de entrega médio, em *slots*;
3. Razão percentual de entrega dos dados.

A duração do período STDMA é determinada pelo tamanho das tabelas de escalonamento geradas pelo mecanismo de sinalização, acrescido de um *slot* que deve ser utilizado a título de sincronismo da rede, conforme discutido na Seção 3.4. Assim, a partir da duração do *slot*, estimada na Seção 5.1, pode-se determinar o período de comunicação das transmissões síncronas e, por conseguinte, o intervalo com que duas publicações de dados consecutivas serão entregues os atuadores da RASSF. Da mesma forma, a frequência de atualização pode ser determinada com base na duração estimada do *slot* e no atraso de entrega médio, que avalia o tempo total decorrido para a entrega dos dados, desde seu sensoriamento até sua entrega aos devidos atuadores.

Diferentemente da Seção 5.2, onde o atraso de entrega médio relativo foi obtido a partir da diferença entre o primeiro e último *slots* utilizados por um fluxo de dados, normalizada pela distância que separa *publisher* e *subscriber*, nesta seção o atraso de entrega médio é contabilizado desde a criação do pacote pelo nó sensor até sua entrega ao nó atuador. Entretanto, como explicado anteriormente na Subseção 5.1.2, todos os pacotes são gerados no início do período STDMA e devem aguardar até o primeiro *slot* designado para o seu fluxo de dados para que possam começar a ser transmitidos. Desta forma, o atraso de entrega extraído dessas simulações acrescenta à métrica o tempo de espera do pacote até o primeiro *slot* designado para transmissão, conforme representado na Figura 5.6.

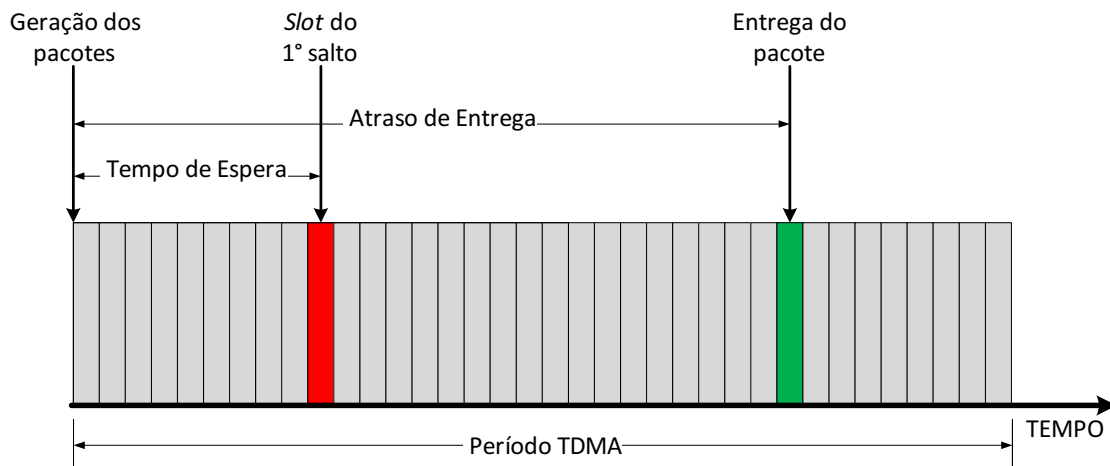


Figura 5.6: Composição do Atraso de Entrega Observado.

Cabe observar que, uma vez que os *slots* empregados nas transmissões síncronas simuladas correspondem aos *slots* da mesma tabela de escalonamento utilizada para a obtenção do atraso de entrega médio relativo na Seção 5.2, os mesmos valores de atrasos seriam observados nessa etapa de simulações caso o tempo de espera do pacote fosse desconsiderado. Além disso, o atraso de entrega medido conforme a representação da Figura 5.6, consitui-se uma métrica complementar ao atraso de

entrega médio relativo, sendo capaz de representar um comportamento também observado nas aplicações reais, apesar de, na prática, a geração dos pacotes não ocorrer da forma determinística como foi simulada. Assim, pelos motivos expostos, nessa etapa de simulações, optou-se por avaliar o atraso de entrega dos dados de forma absoluta.

O percentual de fluxos de dados fim a fim estimado na seção anterior, que avalia a habilidade do escalonamento em realizar a entrega dos dados publicados aos *subscribers* da informação, nesta etapa é mensurado através do percentual de entrega dos dados, que verifica o razão de dados efetivamente entregues aos atuadores dentro do universo de dados publicados.

As subseções a seguir apresentam os resultados observados nas comunicações síncronas e a influência exercida pelo grau máximo dos nós, as proporção de sensores e atuadores de tempo real e o parâmetro H .

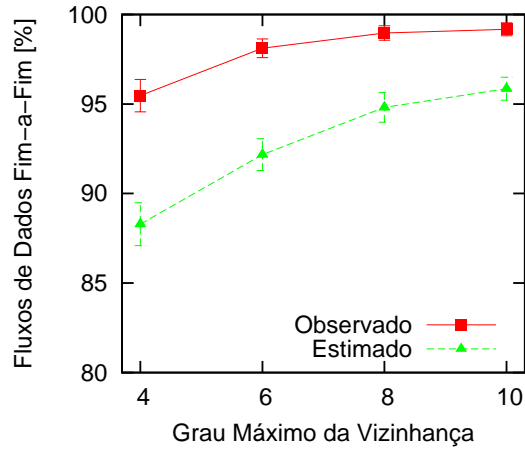
5.3.1 Grau Máximo

Os resultados apresentados na Figura 5.7 ratificam as estimativas da seção anterior de que o desempenho das métricas melhora nas topologias com valores maiores de grau máximo.

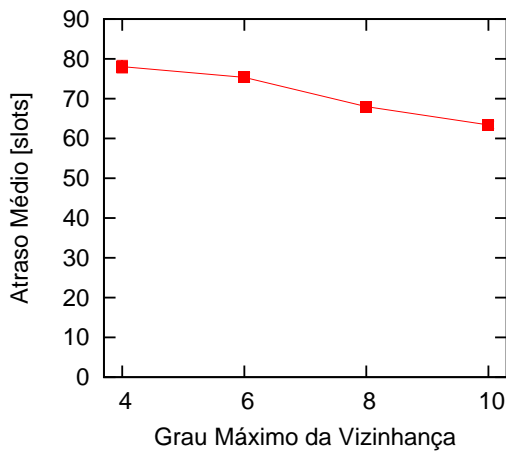
Como pode-se notar na Figura 5.7(a), a razão percentual de entrega dos dados aumenta com a elevação do grau máximo. Entretanto, seu resultado supera em aproximadamente 5% as estimativas inicialmente verificadas para o percentual de fluxos de dados fim a fim, não apenas porque as estimativas consideram uma análise de pior caso, mas principalmente porque muitas das colisões previstas para ocorrer na primeira análise não se confirmam com a verificação das interferências.

De forma equivalente, os resultados observados para os atrasos de entrega dos dados, apresentados na Figura 5.7(b), confirmam as estimativas da Seção 5.2, pois são minimizados com a elevação do número máximo de vizinhos admitidos por nó na rede. O mesmo comportamento é esperado para a duração do período STDMA, conforme a Figura 5.7(c).

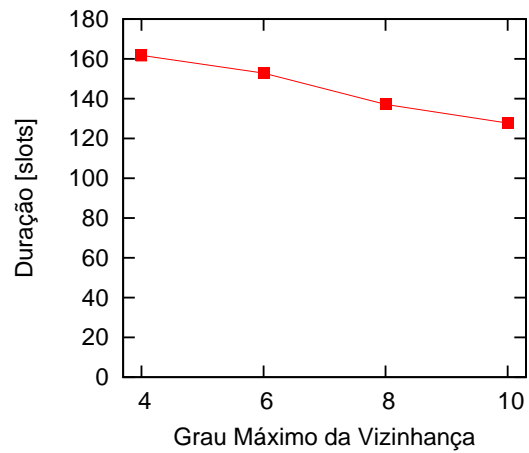
Apesar dos resultados da Figura 5.7(b) não se apresentarem de forma normalizada como na Figura 5.2(b), é possível notar que os atrasos observados são superiores aos estimados na seção anterior. As mesmas condições de contorno estão presentes em ambos: as mensagens de notificação são encaminhadas por 6 saltos (sendo, portanto, $H = 3$), 40% dos nós atuam como sensores ativos e outros 40% exercem ativamente o papel de atuadores de tempo real. Porém, o atraso médio estimado para topologias de grau máximo 4, por exemplo, considerando uma distância média entre *publishers* e *subscribers* de 5, deveria ser de aproximadamente 20 *slots*. O valor observado, no entanto, foi pouco inferior a 80 *slots*. Conforme explicado anterior-



(a) Razão Percentual de Entrega dos Dados



(b) Atraso de Entrega Médio



(c) Duração do Período STDMA

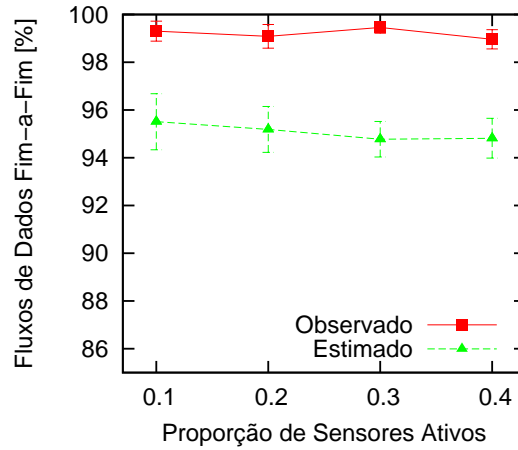
Figura 5.7: Influência do Grau Máximo sobre as Métricas Observadas.

mente, esta diferença se justifica pelo tempo de espera dos dados nos nós sensores, desde o instante em que todos os pacotes são gerados, no início do período STDMA, até o primeiro *slot* designado para o seu envio.

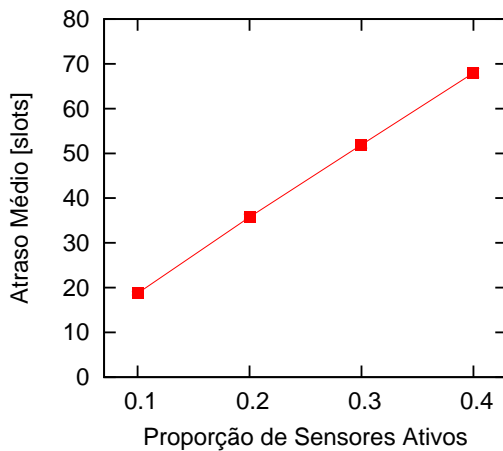
Assim, considerando a duração do *slot*, que pode ser estimada em $5ms$ a partir Equação (5.5), o atraso médio observado nas topologias de grau máximo igual a 4 seria de, aproximadamente, $0,4s$ e a duração da parcela STDMA seria de $0,8s$, representando um intervalo de $1,6s$ entre duas entregas de dados consecutivas a um atuador.

5.3.2 Proporção de Nós Ativos

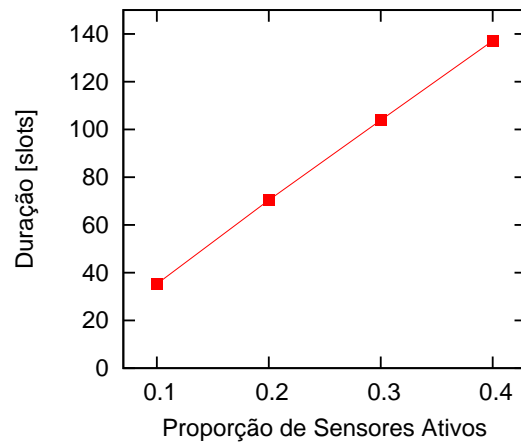
A avaliação da influência da proporção de nós ativos na RASSF através das comunicações síncronas traz confirmações às estimativas da Seção 5.2, e analisa seu grau de influência sobre os resultados, como pode ser observado nas Figuras 5.8 e 5.9.



(a) Razão de Entrega dos Dados



(b) Atraso de Entrega Médio



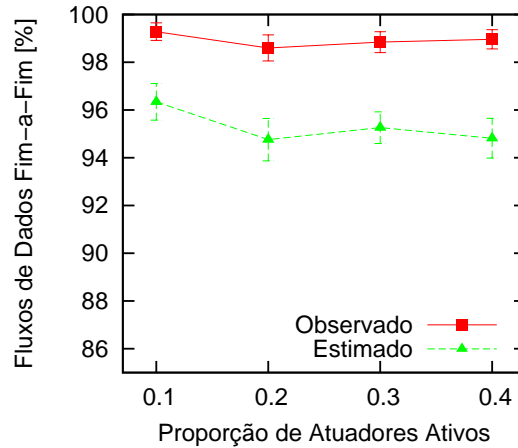
(c) Duração do Período STDMA

Figura 5.8: Influência dos Percentuais de Sensores Ativos sobre as Métricas Observadas.

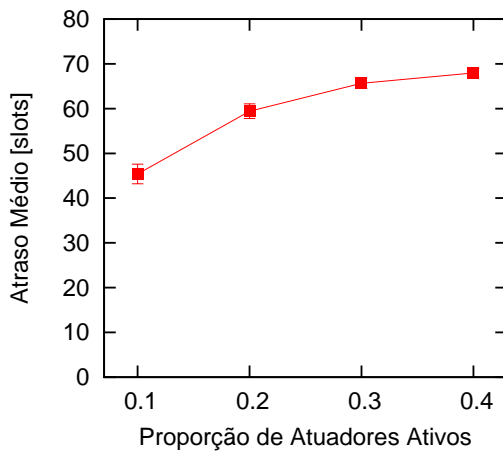
As Figuras 5.8(b) e 5.8(c), que comparam os resultados dos atrasos de entrega e da duração do período STDMA frente às várias proporções de sensores ativos, confirmam a evolução linear dessas métricas com o aumento na disponibilidade de novos dados como consequência da extensão das tabelas de escalonamento geradas pelo mecanismo de sinalização *publish/subscribe* para atender ao crescimento da demanda.

Conforme já identificado nos resultados estimados, o aumento na proporção de nós que exercem ativamente o papel de atuadores de tempo real nessas redes, evidencia não só a extensão das tabelas de escalonamento, como o aumento do reuso espacial através do crescimento menos acentuado observado em ambas as métricas, tanto o atraso de entrega apresentado na Figura 5.9(b) quanto a duração do período STDMA, conforme a Figura 5.9(c).

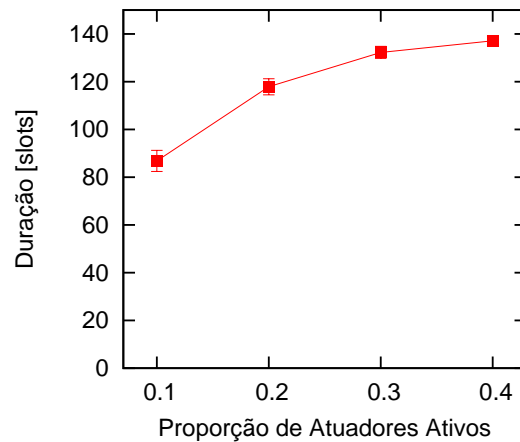
Analisando as Figuras 5.8(a) e 5.9(a), além de ser notável a superioridade da



(a) Razão de Entrega dos Dados



(b) Atraso de Entrega Médio



(c) Duração do Período STDMA

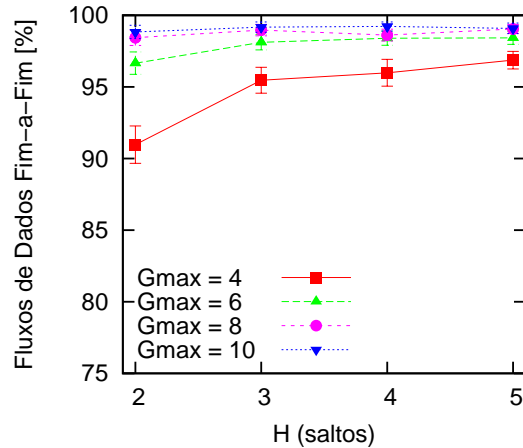
Figura 5.9: Influência dos Percentuais de Atuadores de Tempo Real Ativos sobre as Métricas Observadas.

razão de entrega dos dados quando comparada à sua correspondente estimada, observa-se que a influência exercida sobre os resultados pelo aumento na proporção de nós ativos é pouco significativa e se mantém em patamares inferiores a 2%. Na prática, esses resultados demonstram que o mecanismo de sinalização *publish/subscribe* tal como proposto é capaz de lidar com tais variações de demanda, sem que seu desempenho seja comprometido.

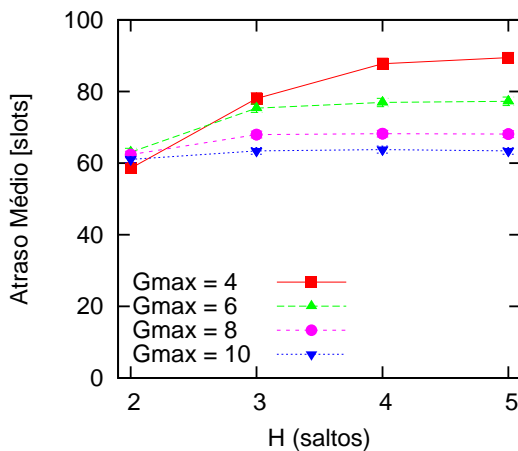
Conforme discutido anteriormente, a pequena redução que pode ser observada nessas métricas deve-se ao aumento da disputa pela atribuição de *slots* para atender à maior demanda. Esse crescimento da demanda implica no aumento da quantidade de *slots* que deverão ser alocados, mas também proporciona maior susceptibilidade a colisões devido às chances de reserva simultânea e envio de notificações de escalonamento entre nós localizados a menos de $2H$ saltos uns dos outros.

5.3.3 Alcance das Notificações de Escalonamento

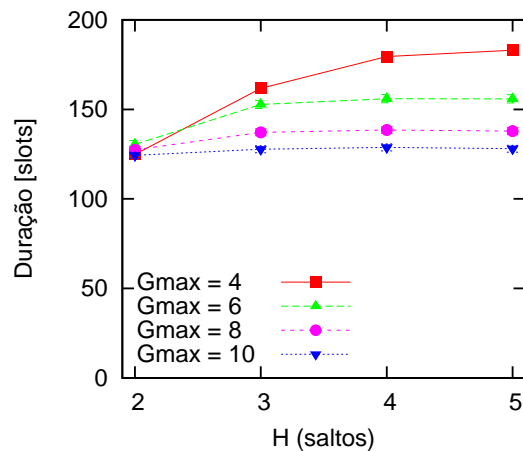
Os resultados apresentados na Figura 5.10 demonstram o comportamento esperado das métricas avaliadas frente ao aumento do alcance das notificações de escalonamento, ao contrário das estimativas obtidas na Seção 5.2. O aumento desse alcance, realizado através da variação do parâmetro H , tem como objetivo ampliar a área ao redor dos nós transmissor e receptores de uma comunicação e, desta forma, coibir outras transmissões simultâneas que possam afetá-la.



(a) Razão de Entrega dos Dados



(b) Atraso de Entrega Médio



(c) Duração do Período STDMA

Figura 5.10: Influência do Alcance das Notificações de Escalonamento sobre as Métricas Observadas.

Conforme pode ser observado na Figura 5.10(a), a redução do reuso espacial proporcionado pelo aumento dos valores de H , eleva a razão de entrega dos dados e, portanto, a construção de um maior número de fluxos de dados fim a fim. Esse aumento é um reflexo da redução das interferências ao redor da comunicação, que é obtido com o encaminhamento das mensagens de notificação por um maior número de saltos, fazendo com que todos os nós receptores da notificação também efetuem

a reserva do *slot*.

Assim, verifica-se que, ao contrário de como foi suposto na Figura 5.4(a), o escalonamento simultâneo de dois ou mais *slots* dentro de uma área de $2H$ saltos pode não representar mais do que um pequeno incremento na percepção de sinais interferentes pelo nó, incapaz de dar origem a uma colisão. Tal percepção reforça a importância do compromisso entre o reuso espacial e as interferências admitidas, necessário para evitar tanto o reuso excessivo quanto o desperdício de recursos.

Da mesma forma, como era esperado, os resultados apresentados nas Figuras 5.10(b) e 5.10(c) demonstram a tendência de aumento de ambos, atraso de entrega e duração do período STDMA, com o maior alcance das notificações de escalonamento e a redução do reuso espacial, obtidos com a variação de H .

Analisando, por outro lado, a influência do parâmetro H sobre as diferentes topologias obtidas para os diversos valores de grau máximo, nota-se que o reflexo da variação desse parâmetro é tão menor quanto maior é o grau máximo da topologia. Pois, conforme já discutido na Seção 5.2, com o aumento do grau de vizinhança, reduz-se, em média, a distância entre os *publishers* e *subscribers* envolvidos na comunicação a tal ponto que o aumento do alcance das notificações exerce pouca influência sobre os resultados.

Esse comportamento é evidenciado em todos os gráficos da Figura 5.10, onde pode ser observado a ínfima influência sobre as topologias com grau máximo igual a 10, enquanto aquelas de menor grau têm sua razão de entrega de dados, atraso de entrega médio e duração do superquadro mais fortemente afetados pelos diversos alcances de notificação do escalonamento.

5.4 Conclusões do Capítulo

Este capítulo apresentou a avaliação do desempenho do escalonamento das comunicações síncronas proporcionado pelo mecanismo de escalonamento distribuído baseado no modelo *publish/subscribe*.

As avaliações realizadas consideraram métricas estimadas a partir do conjunto de tabelas de escalonamento geradas por uma implementação do mecanismo no NS-2, além das métricas correspondentes observadas através de comunicações síncronas obtidas com a implementação de uma camada MAC associada à análise dos sinais interferentes.

Os resultados permitiram observar que o mecanismo de sinalização *publish/subscribe* proposto apresenta um melhor desempenho, em qualquer das métricas avaliadas, para as redes de maior densidade média, onde os nós possuem uma maior vizinhança e, portanto, uma distância média entre *publishers* e *subscribers* menor. Estas redes também apresentam maior imunidade às variações de reuso

espacial, tanto no que se refere às métricas temporais quanto de entrega dos dados.

Além disso, nota-se que melhores resultados para a construção dos fluxos de dados fim a fim são obtidos com o maior alcance das notificações de escalonamento, enquanto o maior do reuso espacial leva à otimização das métricas vinculadas ao atraso de entrega dos dados.

Os resultados obtidos também demonstram que, conforme discutido no Capítulo 3, com o intuito de priorizar as restrições temporais impostas pelas aplicações, a implementação da solução proposta neste trabalho pode se utilizar do emprego de topologias de rede mais densas, além da limitação das demandas da RASSF e da manipulação do parâmetro H , modificando o reuso espacial adotado na rede.

Capítulo 6

Conclusões

Este trabalho teve como objetivo oferecer uma solução para o atendimento dos requisitos de coordenação e temporalidade de aplicações que apresentam diferentes restrições temporais e devem operar de forma integrada através do compartilhamento de uma mesma rede de atuadores e sensores sem fio.

Em resposta a esse desafio, as principais contribuições desse trabalho foram a proposição de um mecanismo de sinalização dos escalonamentos integrado à coordenação das interações entre os nós, capaz de proporcionar o compartilhamento das RASSFs entre aplicações distintas que apresentam diferentes restrições temporais, e o escalonamento distribuído das comunicações, visando o estabelecimento de fluxos de dados fim a fim entre os nós das redes de atuadores e sensores sem fio.

A próxima seção apresenta as conclusões do trabalho e a Seção 6.2, por fim, apresenta as sugestões de trabalhos futuros e as considerações finais.

6.1 Conclusões do Trabalho

Tendo em vista as áreas que podem se beneficiar do uso das RASSFs, dentre as quais é comum encontrar aplicações distintas que compartilham, além do espaço físico, interesses e/ou objetivos comuns, foi identificada a necessidade de uma solução que permita o atendimento a diferentes tipos de aplicações com limites temporais diversos e que, simultaneamente, possibilite a integração entre essas aplicações e o compartilhamento de uma mesma rede de atuadores e sensores sem fio.

Este trabalho apresentou uma proposta que considera a adoção de um esquema *publish/subscribe* para o controle descentralizado das comunicações das RASSFs associada a uma camada de controle de acesso ao meio que divide a comunicação em períodos e reserva uma parcela de cada período para as transmissões síncronas das aplicações de tempo real. Para o escalonamento das transmissões síncronas, este trabalho propôs um mecanismo de sinalização que utiliza o próprio modelo *publish/subscribe* para realizar o escalonamento distribuído das comunicações que

requerem o atendimento a restrições temporais, ao mesmo tempo em que permite uma integração completa com as comunicações *non-real-time*.

A capacidade de compartilhamento das redes entre diferentes aplicações pode ser obtida diretamente pelo uso do modelo *publish/subscribe*, em função do anonimato oferecido às interações entre os agentes da comunicação. Na literatura das RASSFs, existem algumas propostas que sugerem formas descentralizadas de coordenação das interações entre os nós, como os trabalhos [33, 36, 39], que apresentam soluções para o controle distribuído através de comunicações por múltiplos saltos coordenadas pelo paradigma *publish/subscribe*. No entanto, apesar deste modelo de comunicação possuir a capacidade de possibilitar que esses trabalhos ofereçam o compartilhamento da rede entre aplicações diferentes, nenhum deles aborda o atendimento a restrições temporais. De fato, o comportamento assíncrono exibido pelo modelo de comunicação *publish/subscribe*, impossibilita que soluções que adotam exclusivamente esse modelo sejam capazes de oferecer o determinismo requisitado pelas aplicações de tempo real.

Para conciliar o uso desse modelo de comunicação com métodos de múltiplo acesso que assegurem o determinismo necessário ao atendimento das restrições temporais, este trabalho considerou a adoção de uma estratégia que reserva uma parte do superquadro para as transmissões escalonadas das aplicações de tempo real. Trabalhos da literatura de redes sem fio, como os protocolos IEEE 802.11.e [3] e o IEEE 802.15.4 [4], confirmam a viabilidade de uso desse tipo de solução na priorização de fluxos de dados, de forma semelhante à empregada no presente trabalho.

O uso do meio de comunicação durante a parcela do superquadro destinada às transmissões síncronas pode ser ordenado por meio de mecanismos que realizam o escalonamento das comunicações. Dentre as abordagens distribuídas existentes na literatura, destaca-se [51], que utiliza um mecanismo baseado em uma máquina de estado e informações da topologia local para garantir a inexistência de transmissões simultâneas a até dois saltos de distância do usuário do *slot*. Apesar de proporcionar um escalonamento livre de colisões, essa proposta apresenta um *overhead* duas vezes superior quando um alcance de notificação equivalente (ou seja, com $H = 1$) é adotado no mecanismo *publish/subscribe*, além de não contemplar uma solução de escalonamento sequencial de *slots* fim a fim.

O mecanismo de sinalização proposto neste trabalho, ao utilizar-se dos benefícios advindos do modelo *publish/subscribe* e permitir a integração das transmissões assíncronas e síncronas com restrições temporais distintas em uma única RASSF, promove um melhor aproveitamento dos recursos por meio da minimização do tráfego de controle adicionado. O reaproveitamento das mensagens de coordenação das interações entre os nós oferece as informações necessárias para que o mecanismo realize o escalonamento distribuído das comunicações e acrescente ao tráfego de controle

apenas as mensagens de notificação desse escalonamento. Apesar disso, o *overhead* gerado pelo encaminhamento das notificações ainda é considerado alto, podendo atingir valores próximos a 90% das mensagens de controle em cenários com grande número de nós ativos, conforme os resultados apresentados no Capítulo 5.

O escalonamento gerado a partir do mecanismo de sinalização *publish/subscribe* proposto determina o conjunto de *slots* que serão utilizados pelos diferentes nós para realizar a entrega de dados entre cada *publisher* e seu *subscriber* correspondente na RASSF. A ocupação sequencial dos *slots*, desde que respeite o afastamento necessário para evitar a ocorrência de colisões durante as transmissões síncronas, garante o estabelecimento de fluxos de dados fim a fim.

Assim, o percentual dos fluxos de dados fim a fim estabelecidos foi uma das métricas utilizadas para avaliar o desempenho dos escalonamentos proporcionados pelo mecanismo de sinalização *publish/subscribe*. As avaliações realizadas, tanto aquelas obtidas a partir das previsões de sucesso sobre as tabelas de escalonamento quanto aquelas geradas observando a existência de sinais interferentes durante as transmissões síncronas, demonstram a capacidade do mecanismo de sinalização proposto em estabelecer escalonamentos para atender as comunicações entre sensores e atuadores nas RASSFs.

Os resultados apresentados no Capítulo 5 revelam que os escalonamentos gerados pelo mecanismo de sinalização *publish/subscribe* são capazes de fornecer às redes de atuadores e sensores sem fio taxas de entrega de dados superiores à 90%, apresentando-se tão melhores quanto maior o número máximo de vizinhos por nó admitidos na topologia da rede. Confirmou-se que o alcance das notificações de escalonamento também exerce influência sobre o desempenho do mecanismo, de tal forma que a redução do reuso espacial tende a proporcionar uma menor susceptibilidade das comunicações síncronas às interferências.

Através do atraso de entrega médio foi avaliado o desempenho dos escalonamentos diante das restrições temporais impostas pelas aplicações de tempo real, assegurando a essas aplicações uma frequência de atualização dos dados e um tempo de entrega máximo não superior à duração dos superquadros. Nos resultados observados nas Seções 5.2 e 5.3, essa métrica apresenta uma relação direta de crescimento com o número de subscrições encaminhadas para atendimento das aplicações de tempo real, bem como com a quantidade de dados disponíveis nos nós sensores para atendê-las. Observou-se também que os atrasos de entrega tendem a ser tão menores (e, portanto, melhores) quanto menor a distância média entre *publishers* e *subscribers* na RASSF.

Reforçando a importância da relação de compromisso entre o reuso espacial e a susceptibilidade a interferências, os resultados do capítulo anterior também demonstram que, apesar do aumento do alcance das notificações de escalonamento

beneficiarem as taxas de entrega de dados, um melhor desempenho temporal das RASSFs, seja no atraso de entrega médio, seja na duração do período STDMA e, conseqüentemente, dos superquadros, será observado para um maior reuso espacial.

Assim, além de promover um melhor aproveitamento dos recursos com a minimização do tráfego de controle adicionado, verifica-se que a solução proposta nesse trabalho é capaz de proporcionar, com alto índice de desempenho, a formação de fluxos de dados fim a fim para as comunicações síncronas de tempo real, assegurando o atendimento a tempos de entrega equivalentes à duração do superquadro gerado pelo mecanismo de sinalização e, acima de tudo, possibilitando o compartilhamento das redes de atuadores e sensores sem fio com a integração de diferentes aplicações com restrições temporais distintas.

6.2 Trabalhos Futuros

Para os trabalhos futuros sugere-se o desenvolvimento de três propostas complementares que podem possibilitar um melhor desempenho da solução apresentada neste trabalho.

A primeira sugestão refere-se à duração dos superquadros que, neste trabalho, possuem um tamanho fixo tal que, dividido proporcionalmente entre as parcelas CSMA/CA e STDMA, permita a transmissão de todos os *slots* escalonados pelo mecanismo de sinalização *publish/subscribe* durante esta segunda parcela, conforme discutido no Capítulo 3. O desenvolvimento de um mecanismo distribuído que ofereça o controle e a flexibilização tanto da duração dos superquadros quanto das proporções atribuídas às parcelas CSMA/CA e STDMA pode proporcionar uma melhor eficiência do aproveitamento dos recursos das redes de atuadores e sensores sem fio.

Como segunda sugestão de complementação à proposta deste trabalho considera-se o desenvolvimento, implementação em simulador e avaliação da estratégia de escalonamento hierárquico introduzida no Capítulo 3. Conforme discutido ao longo deste trabalho, considerando um fluxo de dados fim a fim perfeitamente estabelecido, é assegurado às aplicações de tempo real que elas sejam atualizadas periodicamente uma vez a cada superquadro. No entanto, se as aplicações existentes exigirem o atendimento de atrasos de entrega inferiores, o uso do escalonamento hierárquico aplicado ao mecanismo de sinalização *publish/subscribe* pode permitir o atendimento de diferentes níveis de frequências de atualização, incluindo aquelas mais restritivas, além de proporcionar uma otimização ainda maior dos recursos.

Uma terceira possibilidade de complementação da solução proposta neste trabalho poderia considerar o desenvolvimento de uma heurística para a determinação de um possível valor ótimo para o parâmetro H , que determina o alcance de envio

das notificações de escalonamento do mecanismo de sinalização. Conforme discutido no Capítulo 3, o valor ótimo de H representa o ponto de equilíbrio na relação de compromisso entre o reuso espacial e as interferências admitidas na RASSF.

Além das propostas complementares mencionadas, outras duas formas de avaliação do desempenho podem ser empregadas, visando estimar o comportamento esperado para o mecanismo em condições ainda mais próximas da realidade.

Neste trabalho, a geração de tráfego homogênea e periódica proporcionou uma análise de pior caso, onde esse comportamento determinístico, aliado a um modelo de propagação de sinal também determinístico, assegura que todas as transmissões simultâneas com potencial de gerar colisões ocorram. Utilizando um modelo de desvanecimento do sinal segundo uma distribuição de Rice [76], o desempenho dos escalonamentos gerados pelo mecanismo pode ser avaliado de acordo com um modelo probabilístico, que modifica a potência do sinal recebido pelos nós e, desta forma, afeta as interferências a que estão sujeitos seus receptores e, portanto, a ocorrência de colisões.

Por fim, com a disponibilidade de equipamento de *hardware*, como os sensores sem fio tipo MICAz [73], pode-se sugerir a implementação real das redes de acordo com o mecanismo proposto, possibilitando a realização de testes de campo e avaliações mais detalhadas do seu desempenho.

Referências Bibliográficas

- [1] EUGSTER, P. T., FELBER, P. A., GUERRAOUI, R., et al. “The many faces of publish/subscribe”, *ACM Computing Surveys*, v. 35, n. 2, pp. 114–131, Junho 2003.
- [2] AKYILDIZ, I. F., KASIMOGLU, I. H. “Wireless sensor and actor networks: research challenges”, *Ad Hoc Networks*, v. 2, n. 4, pp. 351–367, Outubro 2004.
- [3] 802.11e. *IEEE 802.11e-2005. IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements*, 2005.
- [4] 802.15.4. *IEEE 802.15.4-2011. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, 2011.
- [5] EFSTRATIOU, C., LEONTIADIS, I., MASCOLO, C., et al. “A shared sensor network infrastructure”. In: *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, Novembro 2010.
- [6] XIA, F. “QoS Challenges and Opportunities in Wireless Sensor/Actuator Networks”, *Sensors*, v. 8, n. 2, pp. 1099–1110, Fevereiro 2008.
- [7] AKYILDIZ, I. F., SU, W., SANKARASUBRAMANIAM, Y., et al. “Wireless sensor networks: a survey”, *Computer Networks*, v. 38, n. 4, pp. 393–422, Março 2002.
- [8] YICK, J., MUKHERJEE, B., GHOSAL, D. “Wireless Sensor Network Survey”, *Computer Networks*, v. 52, n. 12, pp. 2292–2330, Agosto 2008.

- [9] PAGANO, P., CHITNIS, M., LIPARI, G., et al. “Simulating Real-Time Aspects of Wireless Sensor Networks”, *EURASIP J on Wireless Communications and Networking*, v. 2010, n. 2, pp. 2:1–2:12, Abril 2010.
- [10] DESHPANDE, A., GUESTRIN, C., MADDEN, S. R. “Resource-aware Wireless Sensor-Actuator Networks”, *IEEE Data Engineering Bulletin*, v. 28, n. 1, pp. 40–47, Março 2005.
- [11] MELODIA, T., POMPILI, D., GUNGOR, V. C., et al. “Communication and Coordination in Wireless Sensor and Actor Networks”, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, v. 6, n. 10, pp. 1116–1129, Outubro 2007.
- [12] CACCAMO, M., ZHANG, L. Y., SHA, L., et al. “An Implicit Prioritized Access Protocol for Wireless Sensor Networks”. In: *Proceedings of the 23rd IEEE Real-Time Systems Symposium*, Dezembro 2002.
- [13] LIU, X., GOLDSMITH, A. J. “Cross-layer design of distributed control over wireless network”. In: *Systems and Control: Foundations and Applications*, Birkhauser, 2005.
- [14] CICIRIELLO, P., MOTTOLA, L., PICCO, G. P. “Building virtual sensors and actuators over logical neighborhoods”. In: *Proceedings of the international workshop on Middleware for sensor networks*, Dezembro 2006.
- [15] MOTTOLA, L., PICCO, G. P. “Using logical neighborhoods to enable scoping in wireless sensor networks”. In: *Proceedings of the 3rd international Middleware doctoral symposium*, Dezembro 2006.
- [16] OZAKI, K., WATANABE, K., ITAYA, S., et al. “A Fault-Tolerant Model for Wireless Sensor-Actor System”. In: *Proceedings of the 20th International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, Abril 2006.
- [17] PRINSLOO, J., SCHULZ, C. L., KOURIE, D. G., et al. “A service oriented architecture for wireless sensor and actor network applications”. In: *Proceedings of the 2006 annual research conference of the South African institute of computer scientists and information technologists on IT research in developing countries*, Outubro 2006.
- [18] REZGUI, A., ELTOWEISSY, M. “Service-oriented sensor-actuator networks: Promises, challenges, and the road ahead”, *Computer Communications*, v. 30, n. 13, pp. 2627–2648, 2007.

- [19] BRANCH, J. W., CHEN, L., SZYMANSKI, B. K. “A middleware framework for market-based actuator coordination in sensor and actuator networks”. In: *Proceedings of the 5th international conference on Pervasive services*, Julho 2008.
- [20] CHEN, J. “A dependable middleware for the development of applications for wireless sensor and actor networks”. In: *Proceedings of the 13th international conference on Ubiquitous computing*, Setembro 2011.
- [21] MATTHYS, N., MICHIELS, S., JOOSEN, W., et al. “Language and middleware support for dynamism in wireless sensor and actuator network applications”. In: *Proceedings of the 6th International Workshop on Middleware Tools, Services and Run-time Support for Networked Embedded Systems*, Dezembro 2011.
- [22] CHATZIGIANNAKIS, I., KINALIS, A., NIKOLETSEAS, S. “Priority based adaptive coordination of wireless sensors and actors”. In: *Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Quality of service & security for wireless and mobile networks*, Outubro 2006.
- [23] COSTA, P., MOTTOLA, L., MURPHY, A. L., et al. “TeenyLIME: transiently shared tuple space middleware for wireless sensor networks”. In: *Proceedings of the international workshop on Middleware for sensor networks*, Dezembro 2006.
- [24] YUAN, H., MA, H., LIAO, H. “Coordination Mechanism in Wireless Sensor and Actor Networks”. In: *Proceedings of the First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences - Volume 2 (IMSCCS'06) - Volume 02*, Junho 2006.
- [25] ZHENYANG, X., GUANGSHENG, Z., WENHUA, D., et al. “A hop-bounded single-actor selection algorithm for wireless sensor and actor networks”. In: *Proceedings of the 2006 international conference on Wireless communications and mobile computing*, Julho 2006.
- [26] BARBARAN, J., DIAZ, M., ESTEVE, I., et al. “Programming Wireless Sensor and Actor Networks with TC-WSANs”. In: *IEEE International Conference on Pervasive Services*, Julho 2007.
- [27] BOUKERCHE, A., ARAUJO, R. B., VILLAS, L. “Optimal route selection for highly dynamic wireless sensor and actor networks environment”. In: *Proceedings of the 10th ACM Symposium on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems*, Outubro 2007.

- [28] DRESSLER, F., DIETRICH, I., GERMAN, R., et al. “Efficient operation in sensor and actor networks inspired by cellular signaling cascades”. In: *Proceedings of the 1st international conference on Autonomic computing and communication systems*, Outubro 2007.
- [29] LE-TRUNG, Q., KOTSIS, G. “A network model for manet nodes and actors collaboration to optimize processing in event areas”. In: *Proceedings of the 4th ACM workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks*, Outubro 2007.
- [30] MUNIR, M. F., FILALI, F. “Analyzing the performance of a self organizing framework for wireless sensor-actuator networks”. In: *Proceedings of the 2007 spring simulaiton multiconference*, Março 2007.
- [31] NGUYEN, H. A., GIORDANO, S. “PROSAN: probabilistic opportunistic routing in SANETs”. In: *Proceedings of the First ACM workshop on Sensor and actor networks*, Setembro 2007.
- [32] ROZELL, C. J., JOHNSON, D. H. “Power scheduling for wireless sensor and actuator networks”. In: *Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks*, Abril 2007.
- [33] TAHERIAN, S., BACON, J. “SPS: a middleware for multi-user sensor systems”. In: *Proceedings of the 5th international workshop on Middleware for pervasive and ad-hoc computing: held at the ACM/IFIP/USENIX 8th International Middleware Conference*, Novembro 2007.
- [34] DEMIRBAS, M., SOYSAL, O., HUSSAIN, M. “TRANSACT: A Transactional Framework for Programming Wireless Sensor/Actor Networks”. In: *Proceedings of the 7th international conference on Information processing in sensor networks*, Abril 2008.
- [35] GUNGOR, V. C., AKAN, O. B., AKYILDIZ, I. F. “A real-time and reliable transport (RT) 2 protocol for wireless sensor and actor networks”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 16, n. 2, pp. 359–370, 2008.
- [36] SCHÖNHERR, J. H., PARZYJEGLA, H., MÜHL, G. “Clustered publish/subscribe in wireless actuator and sensor networks”. In: *Proceedings of the 6th international workshop on Middleware for pervasive and ad-hoc computing*, Dezembro 2008.
- [37] ABBASI, A. A., BAROUDI, U., YOUNIS, M. F., et al. “C²AM: an algorithm for application-aware movement-assisted recovery in wireless sensor

- and actor networks”. In: *Proceedings of the International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing: Connecting the World Wirelessly*, Junho 2009.
- [38] VASANTHI, N. A., ANNADURAI, S. “Pattern based routing for event driven wireless sensor-actor networks”. In: *Proceedings of the 1st Amrita ACM-W Celebration on Women in Computing in India*, Setembro 2010.
- [39] RUSSELLO, G., MOSTARDA, L., DULAY, N. “A policy-based publish/subscribe middleware for sense-and-react applications”, *J. of Systems and Software*, v. 84, n. 4, pp. 638–654, Abril 2011.
- [40] THOELLEN, K., MICHIELS, S., JOOSEN, W. “On-demand attribute-based service discovery for mobile WSANs”. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Communication System Software and Middleware*, Julho 2011.
- [41] LAPLANTE, P. A. *Real-Time Systems Design and Analysis: An Engineer’s Handbook*. Piscataway, NJ, USA, IEEE Press, 1992. ISBN: 0780304020.
- [42] KAVI, K. M., AKL, R., HURSON, A. R. “Real-Time Systems: An Introduction and the State-of-the-Art.” In: *Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [43] RAMANATHAN, S., LLOYD, E. L. “Scheduling algorithms for multihop radio networks”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, v. 1, n. 2, pp. 166–177, Abril 1993.
- [44] KRUMKE, S. O., MARATHE, M. V., RAVI, S. S. “Models and approximation algorithms for channel assignment in radio networks”, *Wireless Networks*, v. 7, n. 6, pp. 575–584, Novembro 2001.
- [45] GRÖNKVIST, J. “Assignment methods for spatial reuse TDMA”. In: *Proceedings of the 1st ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, Agosto 2000.
- [46] GANDHAM, S. “Link scheduling in sensor networks: Distributed edge coloring revisited”. In: *Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Março 2005.
- [47] JAIN, K., PADHYE, J., PADMANABHAN, V. N., et al. “Impact of interference on multi-hop wireless network performance”. In: *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*, Setembro 2003.

- [48] WANG, Y., WANG, W., LI, X.-Y., et al. “Interference-Aware Joint Routing and TDMA Link Scheduling for Static Wireless Networks”, *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, v. 19, n. 12, pp. 1709–1726, 2008.
- [49] AUGUSTO, C. H. P., CARVALHO, C. B., DA SILVA, M. W. R., et al. “Escala-
 onamento de Enlaces com Reuso Espacial em Redes em Malha Sem Fio”,
*Revista Brasileira de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (RES-
 D)*, v. 3, n. 2, pp. 9–19, Dezembro 2010.
- [50] WU, Z., RAYCHAUDHURI, D. “Integrated routing and MAC scheduling for
 single-channel wireless mesh networks”. In: *International Symposium on
 a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, Junho 2008.
- [51] RHEE, I., WARRIER, A., MIN, J., et al. “DRAND: distributed randomi-
 zed TDMA scheduling for wireless ad-hoc networks”. In: *Proceedings of
 the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and
 computing*, Maio 2006.
- [52] CARLEY, T. W., BA, M. A., BARUA, R., et al. “Contention-Free Periodic
 Message Scheduler Medium Access Control in Wireless Sensor / Actuator
 Networks”. In: *Proceedings of the 24th IEEE International Real-Time
 Systems Symposium*, 2003.
- [53] MUNIR, M. F., FILALI, F. “Maximizing network-lifetime in large scale he-
 terogeneous wireless sensor-actuator networks: a near-optimal solution”.
 In: *Proceedings of the 4th ACM workshop on Performance evaluation of
 wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks*, Outubro 2007.
- [54] BHATTACHARYA, S., SAIFULLAH, A., LU, C., et al. “Multi-Application
 Deployment in Shared Sensor Networks Based on Quality of Monitoring”.
 In: *Proceedings of the 16th IEEE Real-Time and Embedded Technology
 and Applications Symposium*, Abril 2010.
- [55] XU, Y., SAIFULLAH, A., CHEN, Y., et al. “Near optimal multi-application al-
 location in shared sensor networks”. In: *Proceedings of the eleventh ACM
 international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*,
 Outubro 2010.
- [56] WU, C., XU, Y., CHEN, Y., et al. “Submodular Game for Distributed Appli-
 cation Allocation in Shared Sensor Networks”. In: *The 31st IEEE Inter-
 national Conference on Computer Communications*, Março 2012.

- [57] EFSTRATIOU, C. “Challenges in Supporting Federation of Sensor Networks”. In: *NSF/FIRE Workshop on Federating Computing Resources*, Maio 2010.
- [58] HUANG, Y., GARCIA-MOLINA, H. “Publish/Subscribe in a Mobile Environment”. In: *Proceedings of 2nd ACM International Workshop on Data Engineering for Wireless and Mobile Access*, Maio 2001.
- [59] INTANAGONWIWAT, C., GOVINDAN, R., ESTRIN, D. “Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks”. In: *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, Agosto 2000.
- [60] HEIDEMANN, J., SILVA, F., ESTRIN, D. “Matching data dissemination algorithms to application requirements”. In: *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, Novembro 2003.
- [61] HOHLT, B., BREWER, E. “Network power scheduling for TinyOS applications”. In: *Proceedings of the Second IEEE international conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, Junho 2006.
- [62] KESHAVARZIAN, A., LEE, H., VENKATRAMAN, L. “Wakeup scheduling in wireless sensor networks”. In: *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, Maio 2006.
- [63] KONG, Z., YEH, E. M. “Distributed energy management algorithm for large-scale wireless sensor networks”. In: *Proceedings of the 8th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, Setembro 2007.
- [64] NARAYANASWAMY, S., KAWADIA, V., SREENIVAS, R. S., et al. “Power Control in Ad-Hoc Networks: Theory, Architecture, Algorithm and Implementation of the COMPOW Protocol”. In: *Proceedings of European Wireless Conference*, Fevereiro 2002.
- [65] CARDEI, M., YANG, S., WU, J. “Algorithms for Fault-Tolerant Topology in Heterogeneous Wireless Sensor Networks”, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, v. 19, n. 4, pp. 545–558, 2008.
- [66] CHENG, K.-Y., LUI, K.-S., WU, Y.-C., et al. “A distributed multihop time synchronization protocol for wireless sensor networks using Pairwise Broadcast Synchronization”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 8, n. 4, pp. 1764–1772, 2009.

- [67] “The Network Simulator - ns-2”. <http://nsnam.isi.edu/nsnam/index.php>, 2011. [Último acesso: 12/12/2012].
- [68] SILVA, F., HEIDEMANN, J., GOVINDAN, R., et al. *Directed Diffusion*. Relatório técnico, USC/Information Sciences Institute, Fevereiro 2004.
- [69] “NO Ad-Hoc Routing Agent (NOAH)”. <http://icapeople.epfl.ch/widmer/uwb/ns-2/noah/>, 2004. [Último acesso: 19/04/2013].
- [70] PIRES, A. A. *Controle de Potência em Redes Ad Hoc 802.11*. Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - COPPE/UFRJ, 2005.
- [71] 802.11. *IEEE 802.11-2007. IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, 2007.
- [72] PIRES, A. A., DE REZENDE, J. F. “Independent links: A new approach to increase spatial reuse in wireless networks”, *Computer Networks*, v. 57, n. 8, pp. 1880 – 1893, 2013.
- [73] “MICAz”. <http://bullseye.xbow.com:81/Products/productdetails.aspx?sid=164>. [Último acesso: 26/06/2013].
- [74] VURAN, M., AKYILDIZ, I. “Cross-Layer Packet Size Optimization for Wireless Terrestrial, Underwater, and Underground Sensor Networks”. In: *The 27th Conference on Computer Communications*, Abril 2008.
- [75] ALVES, G. C. N., DE REZENDE, J. F. “Escalonamento Distribuído com Sinalização Publish/Subscribe para Aplicações em WSAWs com Restrições Temporais”. In: *III Workshop de Redes de Acesso em Banda Larga*, Maio 2013.
- [76] “Additions to the NS network simulator to handle Ricean and Rayleigh fading”. http://www.ece.cmu.edu/wireless/downloads/ns2_ricean_dist.tgz, 2007. [Último acesso: 11/09/2013].

Apêndice A

Glossário

Arquitetura Automatizada : refere-se à arquitetura que não apresenta controle central, onde “os sensores detectam um fenômeno e transmitem suas leituras para os nós atuadores que processam todos os dados de entrada e iniciam as ações apropriadas” [2];

Arquitetura Semi-Automatizada : refere-se à arquitetura onde um “controlador central coleta dados e coordena o processo de atuação” [2];

Atuador : nó que conta com elementos de interação destinados à produção de modificações no meio a partir de decisões de controle;

Atuador Ativo : corresponde ao atuador que, nas simulações realizadas neste trabalho, apresenta ao menos uma demanda de atendimento a aplicações que possuem restrições temporais;

Atraso de Entrega : composição dos tempos transcorridos nas diversas fases observadas na transmissão da informação de um nó sensor até um nó atuador, considerando não apenas o tempo usado na transmissão do dado, mas também os atrasos decorrentes da espera em filas e *buffers* no nó sensor e demais nós ao longo do caminho;

Atraso Total : composição dos tempos transcorridos nas diversas fases observadas na comunicação da informação, incluindo o atraso de entrega, além dos tempos de sensoriamento e de atuação;

Desacoplamento de Espaço : “as partes que interagem não precisam conhecer uns aos outros” [1];

Desacoplamento de Sincronismo : “os *publishers* não são bloqueados enquanto produzem eventos, e os *subscribers* podem ser notificados de forma assíncrona (através de um *callback*) da ocorrência de um evento durante a execução de alguma atividade concorrente” [1];

Desacoplamento de Tempo : “as partes que interagem não precisam de estar participando ativamente da interação, ao mesmo tempo” [1];

Frequência de Atualização : intervalo de tempo entre duas publicações sucessivas de um nó sensor, estipulado pela própria aplicação a partir da sua demanda de atualização;

Hard Real-Time : restrição temporal rígida, na qual a perda de prazos especificados é inaceitável e uma falha temporal pode levar ao colapso do funcionamento de um sistema [42];

Interferência Primária : “quando uma estação está envolvida em mais de uma tarefa de comunicação ao mesmo tempo (enviando e recebendo, recebendo de dois diferentes transmissores, etc)” [44];

Interferência Secundária : “quando um receptor R sintonizado com um transmissor T específico está dentro do alcance de um outro transmissor, cuja transmissões, embora não destinadas R, interferem nas transmissões de T” [43];

Non-Real-Time : termo que remete à inexistência de restrições temporais de qualquer caráter (ver ‘*Hard Real-Time*’ e ‘*Soft Real-Time*’);

Sensor : nó dotado de elementos capazes de realizar o sensoriamento do meio;

Sensor Ativo : corresponde ao sensor que, nas simulações realizadas neste trabalho, disponibilizam dados compatíveis com os interesses dos atuadores de tempo real;

Sink : nó que recebe os dados coletados pelos nós sensores e os encaminha ao usuário final, podendo se comunicar com o nó gerenciador de tarefas via internet ou satélite [7];

Sistema de Tempo Real : aquele cuja corretude envolve simultaneamente a precisão lógica de suas saídas e sua conveniência temporal [41];

Soft Real-Time : restrição temporal menos rígida, na qual o não cumprimento dos prazos especificados pode levar à degradação de desempenho do sistema;

Sorvedouro : ver ‘*Sink*’;

Superquadro : período recorrente de comunicação dividido em duas parcelas temporais, uma destinada ao uso de métodos de múltiplo acesso com contenção e outra reservada a métodos de múltiplo acesso por divisão do canal no tempo;

Tempo de Atuação : compreende o processamento das informações recebidas por meio da rede e o comando oriundo da decisão resultante do processamento, além da própria alteração de estado gerada pela interação com o meio;

Tempo de Sensoriamento : período necessário para que o nó realize o sensoriamento do meio e o processamento das informações obtidas;