

Escalonamento Distribuído com Sinalização Publish/Subscribe para Aplicações em WSANs com Restrições Temporais*

Geisa Cristina Negrão Alves^{1,2} e José Ferreira de Rezende¹

¹COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

²Petrobras Transporte S.A. (TRANSPETRO)

{geisa, rezende}@land.ufrj.br

Abstract. *The existence of nodes able to act on the sensed environment provides a direct interaction between nodes in the WSANs and the establishment of fully decentralized architectures. The communication model to be adopted should take into consideration the nature of the information. Event-driven applications are characterized by reactivity and the availability of information on demand, whose is well represented by the publish/subscribe model, while applications based on the regular data collection with timing constraints are characterized by the synchronism and the determinism of communications, are conveniently modeled by the request-response. In real world scenarios, however, these classes of applications can not only coexist, but also interact. For conciliation between them, the MAC layer may have a superframe divided into two periods, one regulated by the CSMA/CA and the other reserved for synchronous transmission of real-time applications. For the transmission scheduling, this paper proposes a decentralized signaling mechanism, based on the publish/subscribe paradigm, whose performance is evaluated in terms of success rate and deliverability and delay of published events.*

Resumo. *A existência de nós capazes de atuar no ambiente sensoriado propicia uma interação direta entre os nós nas WSANs e a instauração de arquiteturas totalmente descentralizadas. O modelo de comunicação a ser adotado deve levar em consideração a natureza das informações. Aplicações orientadas a eventos caracterizam-se pela reatividade e disponibilização de informações sob demanda, sendo bem representadas pelo paradigma publish/subscribe, enquanto as aplicações baseadas na coleta regular de dados com restrições temporais caracterizam-se pelo sincronismo e determinismo das comunicações, convenientemente modeladas pelo request-response. Em cenários reais, contudo, essas classes de aplicações podem não apenas coexistir, mas também interagir. Para a conciliação entre elas, a camada MAC pode ter seu superquadro dividido em dois períodos, um regulado pelo CSMA/CA e outro reservado para transmissões síncronas das aplicações de tempo-real. Para o escalonamento dessas transmissões, este artigo propõe um mecanismo de sinalização descentralizado, baseado no paradigma publish/subscribe, cujo desempenho é avaliado em termos da taxa de sucesso do escalonamento e da capacidade de entrega e atraso dos eventos publicados.*

*Este trabalho recebeu recursos do CNPq, CAPES, FAPERJ e TRANSPETRO.

1. Introdução

Nas redes de sensores e atuadores sem fio (WSANs - *Wireless Sensor and Actuator Networks*), os nós dotados de elementos capazes de realizar o sensoriamento do meio são denominados ‘nós sensores’, enquanto 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 and Kasimoglu 2004], os “atores tomam decisões e executam ações apropriadas sobre o ambiente, o que permite ao usuário efetivamente sensoriar e atuar à distância”. Outros trabalhos, como é o caso de [Melodia et al. 2007], utilizam o termo ‘ator’ para diferenciar a entidade de rede do “dispositivo que converte um sinal de controle elétrico em uma ação física”.

A coexistência de nós sensores e atuadores nas redes sem fio introduz dois novos requisitos de funcionamento quando comparadas às WSNs (*Wireless Sensor Networks*) tradicionais: coordenação e temporalidade. A necessidade de coordenação está relacionada com o controle das interações entre nós sensores e atuadores, advinda da mudança no paradigma de funcionamento dessas redes de ‘sensoriamento-comunicação’ para ‘sensoriamento-reação’, uma vez que seu objetivo primordial deixa de ser a comunicação das informações obtidas pelo sensoriamento ao sorvedouro e passa a focar-se na produção de ações de resposta ao parâmetro sensoriado.

A reatividade nas interações e a disponibilização de informações sob demanda caracterizam as aplicações orientadas a eventos. O paradigma *publish/subscribe* é um dos mecanismos de interação existentes capazes de modelar essa classe de aplicações. A principal vantagem de tal modelo em relação aos demais esquemas é o desacoplamento completo em espaço, tempo e sincronismo entre os agentes envolvidos na comunicação. Segundo [Eugster et al. 2003], estas três dimensões de desacoplamento permitem, respectivamente, o estabelecimento da comunicação: sem o reconhecimento entre os agentes envolvidos, sem a participação ativa dos agentes na comunicação durante o mesmo instante de tempo e sem a necessidade dos nós interromperem a execução de outras funções para participar da comunicação. Associado ao paradigma, a opção por uma arquitetura automatizada¹ e a conseqüente descentralização do controle lógico nas WSANs possibilitam o estabelecimento de uma infraestrutura mais adaptada à distribuição das aplicações e a melhoria do desempenho e do aproveitamento dos recursos das redes.

Com a concentração das atenções no papel reativo das WSANs, a temporalidade torna-se um importante requisito a ser observado, através do estabelecimento de condições limítrofes de tempo para que as informações recebidas pelos nós atuadores sejam consideradas aceitáveis. Portanto, o desempenho dessas redes passa a ser medido não apenas por uma resposta qualitativamente correta, mas também como uma função do tempo decorrido para que a ação de resposta seja executada.

Aplicações sensíveis a variações temporais, por definição, enquadram-se na categoria dos sistemas de tempo-real. Este tipo de sistema requer um comportamento determinístico, visando o atendimento dos tempos de resposta pré-estabelecidos pelas aplicações. O grau de criticidade envolvido nessa garantia de atendimento originou as

¹Classificação definida por [Akyildiz and Kasimoglu 2004].

classificações: *hard real-time* e *soft real-time*. Ambas possuem limites temporais a serem respeitados, contudo a primeira é atribuída àqueles sistemas nos quais uma falha temporal pode levar ao colapso do seu funcionamento [Kavi et al. 2008]. Complementarmente, a literatura apresenta uma terceira classificação: *non-real-time*, ou *best effort*, para designar sistemas que não impõem exigências temporais.

Diferentemente das comunicações orientadas a eventos, as aplicações que realizam a coleta regular de dados caracterizam-se pelo sincronismo das comunicações, que tem como principal modelo de representação o paradigma *request-response*. Quando tais aplicações são implementadas em rede, o que requer o compartilhamento do meio, uma das formas tradicionais de garantir o determinismo das comunicações se dá através do seu escalonamento e da utilização de mecanismos de múltiplo acesso por divisão no tempo.

Em cenários reais, contudo, as aplicações síncronas e orientadas a eventos podem não apenas coexistir, mas também exigir certo grau de interação. Além disso, muitas aplicações não operam de forma contínua e ininterrupta, tornando ineficiente a opção por uma alocação estática dos recursos da rede. Portanto, o desafio que se coloca é assegurar o atendimento aos requisitos de coordenação e temporalidade necessários ao funcionamento adequado das WSANs, sem perder os benefícios oriundos da descentralização e do desacoplamento entre os agentes da comunicação.

Visando a adoção de um esquema *publish/subscribe* para o controle descentralizado das comunicações das WSANs, associado a uma camada de controle de acesso ao meio que utiliza o CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance*) e reserva parte do período de comunicação para as transmissões síncronas das aplicações com restrições temporais, este trabalho propõe um mecanismo de sinalização descentralizado e baseado no paradigma *publish/subscribe* que realiza o escalonamento da comunicação de tempo-real.

A organização deste trabalho apresenta-se da seguinte forma. A Seção 2 apresenta a estratégia de comunicação e o mecanismo de sinalização propostos, enquanto o ambiente de simulação usado na avaliação de desempenho, os cenários de testes e os resultados das simulações realizadas são apresentados nas Seções 3 e 4. A Seção 5 trata da literatura existente. Por fim, na Seção 6, as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2. Proposta

A proposta deste trabalho consiste na adoção de um esquema de comunicação para WSANs descentralizado e baseado no paradigma *publish/subscribe*, que reserva parte do período de comunicação para a troca síncrona de informações entre sensores e atuadores. Seu objetivo é possibilitar que as redes de sensores e atuadores sem fio estejam aptas a atender aplicações com restrições temporais, sem abrir mão dos benefícios inigualáveis que este modelo de comunicação proporciona ao funcionamento das WSANs.

Através do modelo *publish/subscribe* é possível implementar um mecanismo de estabelecimento da comunicação no qual os nós da rede podem assumir ao menos um entre os papéis de *publisher* ou *subscriber*. Os *publishers* e *subscribers* podem divulgar para a rede as características dos dados que disponibilizam ou pelos quais nutrem interesse. As mensagens de ‘subscrição’ são enviadas pelos *subscribers* para a rede e aquelas que combinam com as publicações de dados disponíveis são encaminhadas desde os *publishers* até os *subscribers* através de ‘notificações’ de eventos. A Figura 1 exemplifica a

interação tipicamente estabelecida em uma comunicação *publish/subscribe* entre os nós de uma rede totalmente conectada. No exemplo, uma mensagem de subscrição para dados do tipo ‘Y’ é enviada pelo ‘Subscriber D’, após encontrada uma combinação do seu interesse com uma das publicações de dados anunciadas, a qual é respondida pelo ‘Publisher A’ através de mensagens de notificação que carregam a informação ‘Y’ solicitada.

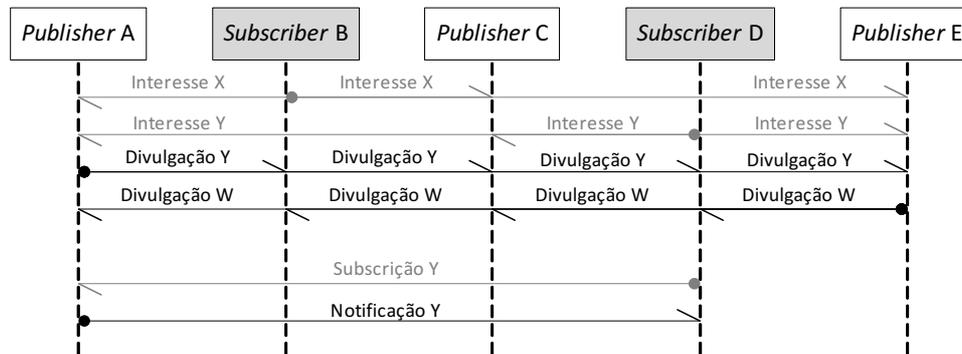


Figura 1. Diagrama sequencial de comunicação *publish/subscribe*

Caracteristicamente, este modelo de comunicação atende às aplicações orientadas a eventos e permite que as partes interajam sem conhecimento dos agentes envolvidos na comunicação, tendo como referência apenas 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.

Para conciliar as necessidades das aplicações *non-real-time*, *soft real-time* e *hard real-time*, e possibilitar o desenvolvimento de aplicações de complexidade condizente com cenários reais, a proposta considera que parte do período de comunicação coordenado pelo paradigma *publish/subscribe* com disputa de acesso ao meio segundo o mecanismo CSMA/CA, seja reservado para a transmissão síncrona das informações demandadas pelas aplicações com restrições temporais.

Nas transmissões síncronas, o determinismo da comunicação em meios compartilhados pode ser obtido através de mecanismos de múltiplo acesso, como o TDMA (*Time Division Multiple Access*), que divide o período de comunicação síncrona em *slots* de tempo. Seus *slots* podem, então, ser ocupados ordenadamente pelas transmissões determinísticas das aplicações de tempo-real. O escalonamento, ou a ordem de ocupação dos *slots*, é estabelecido por mecanismos que levam em consideração, entre outros, a capacidade de transmitir uma informação com integridade e livre da interferência causada por transmissões simultâneas.

Para manter a descentralização do controle lógico das WSAWs, este trabalho propõe que o paradigma *publish/subscribe*, que coordena as interações entre os nós, seja reutilizado para sinalizar as reservas de *slots* do escalonamento das comunicações de tempo-real. Além de permitir que o escalonamento das transmissões síncronas se dê de forma descentralizada, o uso deste paradigma na implementação do mecanismo de sinalização possibilita a integração e o reaproveitamento das mensagens trocadas pelas aplicações *non-real-time*, representando um menor acréscimo de tráfego de controle.

Além de minimizar o crescimento do tráfego de controle, valorosos ganhos são obtidos com o mecanismo de sinalização proposto como herança dos desacoplamentos de espaço, tempo e sincronismo proporcionados pelo modelo *publish/subscribe*.

Desnecessária ao mecanismo de sinalização do escalonamento e ao funcionamento das aplicações *non-real-time*, a troca de mensagens de reconhecimento, que atribui sincronismo à comunicação, pode ser suprimida, uma vez que “a produção e o consumo de eventos não ocorrem no fluxo principal de controle dos *publishers* e *subscribers*” [Eugster et al. 2003]. Por sua vez, o anonimato nas relações entre *publishers* e *subscribers*, que caracteriza o desacoplamento de espaço, possibilita o compartilhamento da WSA por aplicações distintas estabelecidas em um mesmo espaço geográfico e com interesses comuns, bem como permite um melhor uso dos recursos, não somente na fase de sinalização do escalonamento, mas também durante as transmissões síncronas, por possibilitar que uma única mensagem (de pedido de subscrição, de notificação de escalonamento ou de dados) atenda a mais de um nó de destino. Associado ao desacoplamento de tempo, que torna possível o estabelecimento da comunicação ainda que os nós de origem e destino não estejam ativos no mesmo instante de tempo, permite-se que uma única WSA integre aplicações com diferentes níveis de restrições temporais ou que não operam de forma ininterrupta ao longo do ciclo de vida da rede.

A subseção a seguir descreve, em detalhes, a adaptação do modelo de comunicação *publish/subscribe* para atuar na sinalização dos escalonamentos.

2.1. Mecanismo de Sinalização *Publish/Subscribe*

A adaptação do esquema *publish/subscribe* para o escalonamento distribuído das transmissões síncronas não requer profundas modificações no modo como os nós das WSAs interagem, possibilitando sua integração completa com as comunicações *non-real-time*.

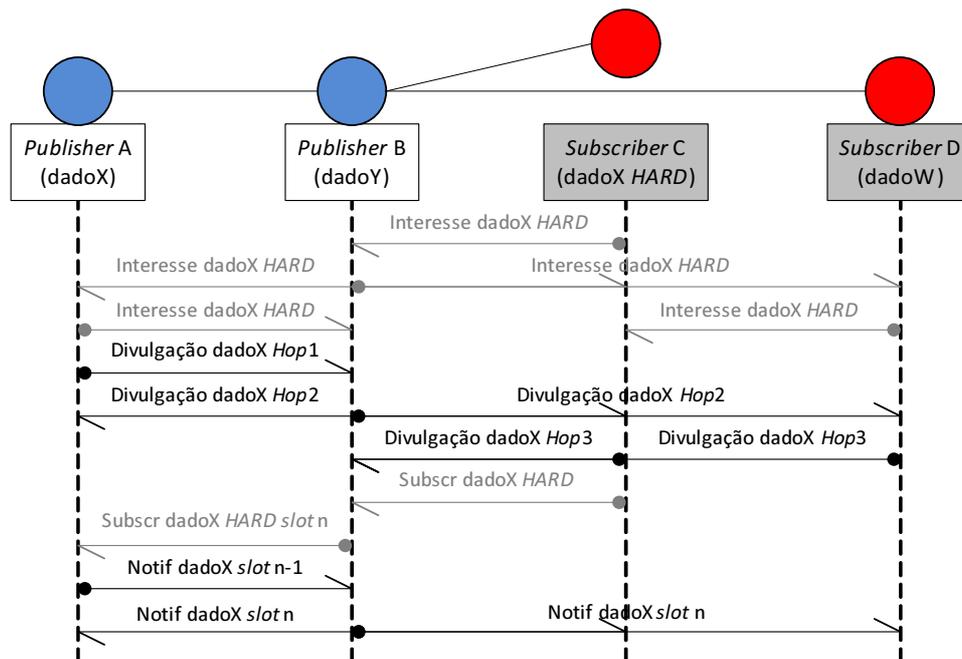


Figura 2. Diagrama sequencial do mecanismo de sinalização *publish/subscribe*

Essencialmente, as mensagens trocadas entre sensores e atuadores, originais desse modelo de comunicação, são utilizadas para realizar a combinação entre dados e interesses e sua consequente subscrição. Associada à 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 do pedido de subscrição, o nó *publisher* e os intermediários subsequentes encaminham mensagens de notificação exclusivas do mecanismo de sinalização. Estas mensagens destinam-se à ratificação² das pré-reservas enviadas e à efetivação das reservas de *slots* na tabela de escalonamento dos nós envolvidos na comunicação, bem como dos vizinhos localizados a H saltos.

As aplicações de tempo-real devem adicionar às características dos dados de interesse, parâmetros que especifiquem as exigências temporais da sua subscrição, como a frequência com que espera receber atualizações de dados e o nível de QoS (*Quality of Service*): *best effort*, *soft* ou *hard real-time*. Na divulgação dos dados disponíveis, a inclusão de um parâmetro para contagem da distância (em saltos) desde sua publicação, permite que o mecanismo mantenha o desacoplamento de espaço proporcionado pelo *publish/subscribe* enquanto fomenta a estimativa de *slots* para a pré-reserva. Conforme detalhado nos algoritmos a seguir, estas informações são manipuladas nos diversos agentes da rede, culminando no envio pelos *publishers / subscribers* ou encaminhamento pelos nós intermediários, de mensagens de subscrição e de notificação do escalonamento acompanhadas da informação referente ao *slot* escalonado para o respectivo dado.

No diagrama sequencial simplificado da Figura 2, que exemplifica as interações do mecanismo de sinalização proposto, apenas o ‘*Subscriber C*’ apresenta uma demanda de dados com restrição temporal (*hard 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 aos seus vizinhos. Da mesma forma, os nós intermediários, neste caso representados pelo ‘*Publisher B*’, se baseiam na contagem de saltos da divulgação do dado para realizar sua pré-reserva e enviar o pedido de subscrição. Ao receber a subscrição, o *publisher* do dado ‘X’ confirma a reserva do *slot* ‘n-1’ em sua tabela de escalonamento e informa seus vizinhos através de uma mensagem de notificação. O nó intermediário, após reservar o *slot* ‘n-1’ para uso do *publisher*, confirma sua reserva no *slot* ‘n’ e envia sua própria notificação de escalonamento. Ao receberem a notificação, os vizinhos atualizam sua tabela de escalonamento, assim como o ‘*Subscriber C*’, encerrando a formação do fluxo de dados fim-a-fim.

Os Algoritmos 1 e 2 tratam da subscrição das informações. 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* não inferior ao estimado para aquele dado / nó usuário, o *subscriber* envia uma mensagem de subscrição informando o dado desejado, com seus atributos e o nível de QoS requerido, ao mesmo tempo em que inicia um temporizador de valor arbitrário, que culmina no reenvio da mensagem de subscrição uma vez expirado. O Algoritmo 2, por sua vez, é executado pelos nós intermediários que realizam de forma similar a pré-reserva dos *slots* que serão utilizados para o envio dos dados pelos mesmos, bem como por seus sucessores e antecessores, e encaminham ao *publisher* o pedido de subscrição correspondente.

²Podem destinar-se à retificação, quando a correção do *slot* se fizer necessária.

Algoritmo 1: Subscrição com restrição temporal.

entrada: $Escalona(Slot, Usuario, Dado), Interesse(Dado, QoS),$
 $Divulga(Dado, Saltos, Remetente)$
se $(Interesse.Dado = Divulga.Dado \text{ E } (Interesse.QoS = HARD \text{ OU } Interestse.QoS = SOFT))$ **então**
 procura $Escalona$ onde: $(Dado = Divulga.Dado \text{ E } Usuario = Divulga.Remetente \text{ E } Slot \geq Divulga.Saltos)$
 se $(\nexists Escalona)$ **então**
 procura primeiro $SlotLivre$ em $Escalona$ onde:
 $SlotLivre \geq Divulga.Saltos$
 adiciona
 $Escalona(SlotLivre, Divulga.Remetente, Divulga.Dado)$
 envia $Subscreve(Dado, QoS)$ para $Divulga.Remetente$

Os Algoritmos 3 e 4 tratam da notificação dos escalonamentos. O Algoritmo 3 é executado pelos *publishers* quando recebem os pedidos de subscrição vindos dos *subscribers*. Em resposta, o *publisher* escolhe em sua tabela de escalonamento o primeiro *slot* capaz de atender à subscrição e envia uma mensagem de notificação informando ao nó remetente (intermediário ou *subscriber*) qual *slot* será utilizado futuramente no envio daquele dado, além de registrar a pré-reserva recebida. O Algoritmo 4 encerra o processo de escalonamento do dado, seja no nó intermediário ou no próprio *subscriber* da aplicação. O nó registra a notificação recebida em sua tabela e, em seguida, envia sua própria notificação de escalonamento, caso seja um nó subsequente do fluxo de dados entre *publisher* e *subscriber* e, desta forma, possua uma pré-reserva correspondente.

As mensagens de notificação enviadas pelos nós nos Algoritmos 3 e 4 são encaminhadas a $2H$ saltos pelos vizinhos dos nós remetentes. A abrangência das notificações tem como objetivo impedir que qualquer nó, localizado a H saltos dos usuários do *slot* (sejam receptores ou o próprio emissor do dado), interfira no *slot* de comunicação.

Nas duas próximas seções, são apresentados o ambiente de simulação usado na avaliação de desempenho, os cenários de testes e os resultados das simulações realizadas.

3. Ambiente de Simulação

Para avaliar a capacidade do mecanismo de sinalização em viabilizar o escalonamento das transmissões de tempo-real ao mesmo tempo em que possibilita sua integração com as comunicações de ‘não-tempo-real’, foram realizadas simulações através do NS-2, utilizando como base o protocolo *Directed Diffusion*, que adota um modelo *publish/subscribe* padrão e foi originalmente proposto por [Intanagonwiwat et al. 2000]. A disponibilidade deste protocolo no NS-2 por meio da adaptação de uma API baseada no paradigma foi descrita por [Silva et al. 2004] e dispensa a necessidade de uma nova implementação do esquema *publish/subscribe* em um simulador de redes.

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. A difusão nas redes se dá sob demanda, quando um nó se subscreve a uma informação com dado conjunto de atributos, desde que estes combinem com os atributos das próprias

Algoritmo 2: Encaminhamento das subscrições com restrição temporal.

entrada: *Subscreve(Dado, QoS, Slot, Remetente)*,
Escalona(Slot, Usuario, Dado), *Roteamento(Dado, Saltos, Remetente)*
se (*Subscreve.QoS = HARD OU Subscreve.QoS = SOFT*) **então**
 procura *Roteamento onde: (Dado = Subscreve.Dado)*
 procura *Escalona onde: (Dado = Subscreve.Dado E*
 Usuario = Roteamento.Remetente E Slot ≥ Roteamento.Saltos)
 se (\nexists *Escalona*) **então**
 procura primeiro *SlotLivre em Escalona onde:*
 SlotLivre ≥ Roteamento.Saltos
 adiciona
 Escalona(SlotLivre, Roteamento.Remetente, Subscreve.Dado)
 procura *Escalona onde: (Dado = Subscreve.Dado E*
 Usuario = esteNodo E Slot > SlotLivre)
 se (\nexists *Escalona*) **então**
 procura *NovoSlotLivre em Escalona onde:*
 NovoSlotLivre > SlotLivre
 adiciona *Escalona(NovoSlotLivre, esteNodo, Subscreve.Dado)*
 envia *Subscreve(Dado, QoS, NovoSlotLivre) para*
 Roteamento.Remetente
 procura *Escalona onde: (Dado = Subscreve.Dado E*
 Usuario = Subscreve.Remetente E Slot > NovoSlotLivre)
 se (\nexists *Escalona*) **então**
 procura *ProxSlotLivre em Escalona onde:*
 ProxSlotLivre > NovoSlotLivre
 adiciona
 Escalona(ProxSlotLivre, Subscreve.Remetente, Subscreve.Dado)

subscrições. Quando uma combinação é encontrada, estabelece-se um ‘gradiente positivo’ em direção ao nó por meio do qual o interesse se manifestou. Ao ser publicado, o dado é encaminhado através dos gradientes até alcançar o nó solicitante da subscrição.

Para a implementação da solução proposta para WSANs compartilhadas por aplicações de tempo-real e não-tempo-real, foi selecionado o algoritmo *Two-Phase Pull* do protocolo *Directed Diffusion*, disponível no NS-2, sendo adaptado e integrado ao mecanismo de sinalização proposto. Dentre as adaptações implementadas no algoritmo estão: 1) inclusão de atributos que caracterizam e diferenciam os tipos de dados ou que especificam a QoS requerida por uma aplicação; 2) contador de saltos associado ao envio das mensagens de ‘dado exploratório’, que divulgam os dados disponibilizados pelos *publishers*; 3) encaminhamento do *slot* selecionado pelo mecanismo, associado às mensagens de ‘reforço positivo’ do *Directed Diffusion*, que confirmam a subscrição dos dados.

Para a implementação do mecanismo de sinalização, foi desenvolvido um gerenciador distribuído de escalonamentos, responsável por executar no âmbito local de cada nó: 1) a estimativa das pré-reservas de *slots* originadas da necessidade de subscrição das aplicações de tempo-real, conforme detalhado nos Algoritmos 1 e 2; 2) o cálculo das

Algoritmo 3: Escalonamento e notificação.

entrada: $Escalona(Slot, Usuario, Dado), Subscrive(Dado, QoS, Slot)$
se ($Subscrive.QoS = HARD$ OU $Subscrive.QoS = SOFT$) **então**
 procura $Escalona$ onde: ($Dado = Subscrive.Dado$ E
 $Usuario = esteNodo$ E $Slot < Subscrive.Slot$)
 se ($\exists Escalona$) **então**
 procura primeiro $SlotLivre$ em $Escalona$
 adiciona $Escalona(SlotLivre, esteNodo, Subscrive.Dado)$
 envia $Notifica(SlotLivre, esteNodo, Dado)$ para todos vizinhos a
 $2H$ saltos
 procura $Escalona$ onde: ($Dado = Subscrive.Dado$ E
 $Usuario = Subscrive.Remetente$ E $Slot > SlotLivre$ E
 $Slot \geq Subscrive.Slot$)
 se ($\exists Escalona$) **então**
 procura $NovoSlotLivre$ em $Escalona$ onde:
 $NovoSlotLivre > SlotLivre$ E $NovoSlotLivre \geq Subscrive.Slot$
 adiciona
 $Escalona(NovoSlotLivre, Subscrive.Remetente, Subscrive.Dado)$

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; 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 os vizinhos a H saltos do nó participante e comunica aos demais vizinhos, a até $2H$ saltos, que o *slot* em questão encontra-se reservado.

O cenário utilizado nas simulações foi de redes sem fio de múltiplos saltos formadas por N nós, dentre os quais M operam como *publishers* de informações, representando os sensores, e $N - M$ atuam como *subscribers*, representando os nós atuadores. As topologias de rede foram geradas a partir de um modelo de posicionamento aleatório que garante a conectividade da rede ao mesmo tempo em que limita o maior grau possível de ser assumido pelos nós. O grau máximo, G_{max} , é arbitrariamente definido no início das simulações. Com o intuito de manter a densidade de nós aproximadamente constante, independentemente do grau máximo escolhido e do total de nós da rede, as dimensões da topografia, $L \times L$, de cada simulação são manipuladas, considerando um alcance de transmissão (Rad) constante para os nós, de acordo com a equação: $L = Rad \cdot \sqrt{\frac{N \cdot \pi}{G_{max} + 1}}$.

Para as simulações, foi considerada uma única especificação de tipo de interesse para todos os *subscribers*, dividindo-se entre subscrições de tempo-real e não-tempo-real. Ambos são divulgados pelos *subscribers* nos primeiros instantes da simulação, escolhidos aleatoriamente. A divulgação dos dados disponíveis nos *publishers* tem início ao término do anúncio dos interesses, disponibilizando dois conjuntos específicos de atributos para os dados. Apenas aqueles que combinam com as especificações das subscrições dão origem a um fluxo de dados entre *publisher* e *subscriber*.

As combinações entre publicações e subscrições de não-tempo-real estabelecem

Algoritmo 4: Repasse de notificação de escalonamento.

entrada: $Escalona(Slot, Usuario, Dado)$,
 $Notifica(Slot, Usuario, Dado)$

procura $Escalona$ onde: $(Dado = Notifica.Dado \text{ E } Usuario = Notifica.Usuario \text{ E } Slot = Notifica.Slot)$

se $(\nexists Escalona)$ **então**

- adiciona**
 $Escalona(Notifica.Slot, Notifica.Usuario, Notifica.Dado)$

procura $SlotLivre$ em $Escalona$ onde: $SlotLivre > Notifica.Slot$

procura $Escalona$ onde: $(Dado = Notifica.Dado \text{ E } Usuario = esteNodo)$

se $(\exists Escalona)$ **então**

- se** $(Escalona.Slot \leq Notifica.Slot)$ **então**
 - move** $Escalona.Slot$ para $SlotLivre$
 - envia** $Notifica(Escalona.Slot, esteNodo, Escalona.Dado)$ para todos vizinhos a $2H$ saltos

gradientes positivos para a troca de dados regida pelo protocolo *Directed Diffusion*, enquanto aquelas identificadas para aplicações de tempo-real utilizam-se deste protocolo (e do período de comunicação por ele governado) unicamente para a geração das tabelas de escalonamento que serão utilizadas posteriormente nas transmissões síncronas.

4. Resultados de Simulação

Na alocação dos nós nos cenários, foram observados diferentes percentuais de *subscribers* com restrições temporais: 20, 40, 60, 80 e 100%, a partir do total de atuadores existentes na WSN. Estes percentuais também foram considerados para a proporção de *publishers*, dentro do universo de sensores da rede sem fio, que disponibilizam dados compatíveis com a especificação requerida nas subscrições. Estabelecida uma combinação para atendimento a uma subscrição de tempo-real, é gerada uma notificação do escalonamento que reserva o uso do *slot* em todos os vizinhos localizados a 2 saltos dos nós participantes daquele fluxo de dados e, em seguida, comunica a reserva aos demais vizinhos localizados a até 4 saltos. Após um período arbitrário, definido aleatoriamente por cada nó, se a notificação de escalonamento não for recebida pelo *subscriber* e sua pré-reserva confirmada, o nó realiza até 3 tentativas de reenvio da mensagem de subscrição.

Cada experimento foi executado por 500 unidades de tempo e as métricas avaliadas foram: 1) a taxa de sucesso do escalonamento, representando o número de *slots* alocados pelo mecanismo que apresentam uma possibilidade nula de colisão durante as transmissões síncronas; 2) o percentual de fluxos de dados fim-a-fim, avaliando a disponibilidade de *slots* em sequência desde a publicação até a entrega ao *subscriber*; 3) o 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*.

Nas simulações realizadas, 30 nós (sendo 20 sensores e 10 atuadores) foram dispostos em uma área quadrada de lado L , calculado conforme descrito na Seção 3, considerando um alcance de transmissão (Rad) de 250 metros e duas possibilidades de grau máximo (G_{max}): 4 e 8, visando avaliar o impacto da topologia e do número de saltos

sobre as métricas analisadas. Reunindo os diferentes graus atribuídos aos nós do núcleo e de borda nos cenários simulados, o grau médio observado para cada uma de tais possibilidades foi de 3.0 e 5.0, respectivamente.

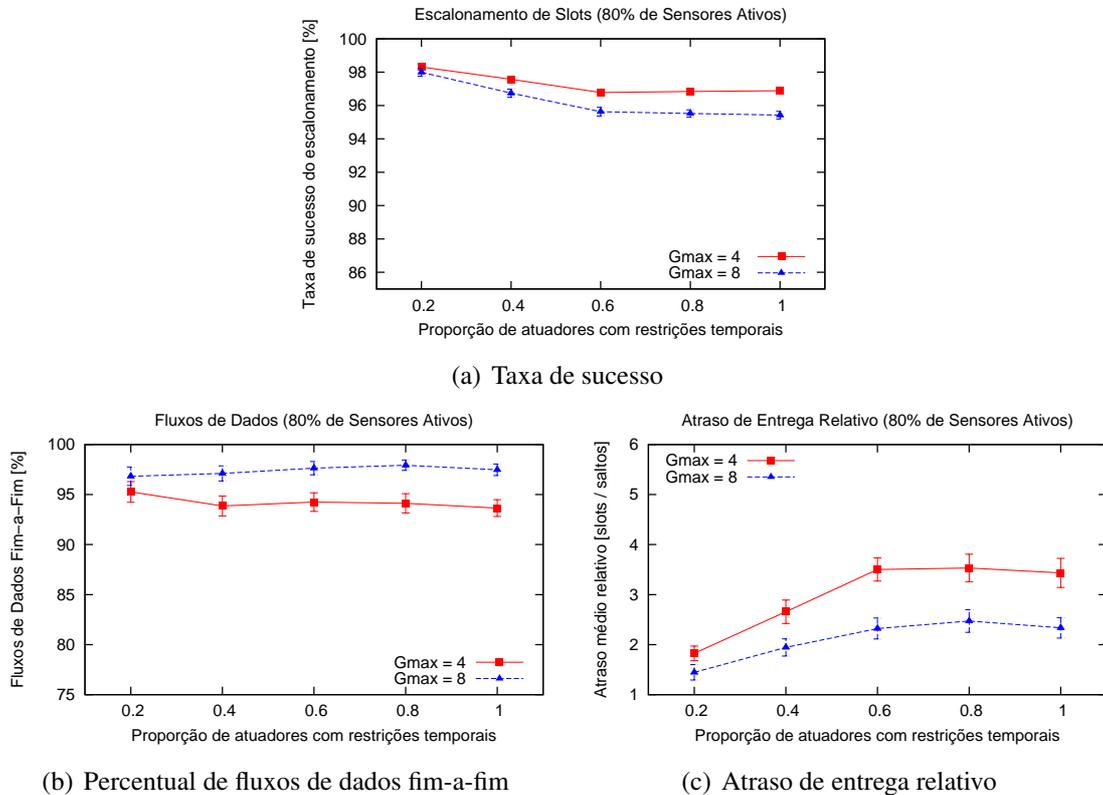


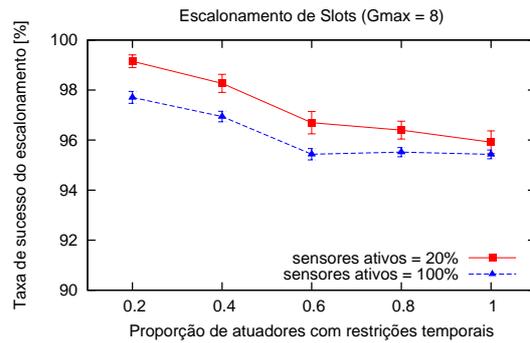
Figura 3. Influência do Grau Máximo

Os gráficos da Figura 3 mostram a interferência exercida pela escolha do grau máximo da topologia nas métricas avaliadas neste trabalho. Os resultados observados demonstram que, apesar da elevação do grau máximo aumentar a susceptibilidade das WSAWs à interferência entre os nós e aumentar as chances de colisões entre os *slots* (Figura 3(a)), as redes de grau máximo superior possuem tendência a apresentar melhores resultados em termos de fluxos de dados fim-a-fim e atraso de entrega relativo, conforme pode ser observado nas Figuras 3(b) e 3(c), pois dispõem de caminhos mais curtos ou em maior número entre cada par de *publisher* e *subscriber*.

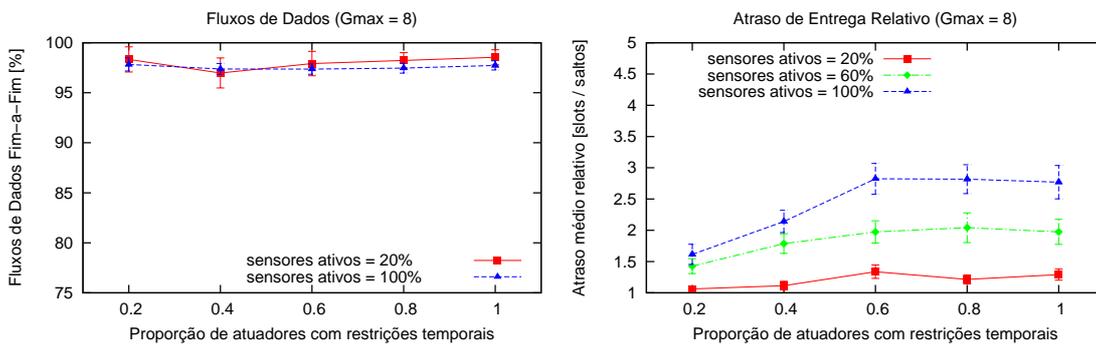
Os resultados apresentados na Figura 3 advêm de simulações que contém 80% dos sensores ativos (ou seja, nessas simulações a maior parte dos *publishers* existentes geram dados que combinam com os interesses dos *subscribers*). Para as demais proporções de *publishers* simuladas, resultados semelhantes foram observados.

O gráfico da Figura 4(a) apresenta a influência do percentual de sensores ativos nas simulações e, portanto, de combinações entre publicações e subscrições, sobre a taxa de sucesso do escalonamento. Observa-se que mesmo diante de grandes variações sobre o número de sensores ativos, os efeitos sobre a taxa de sucesso são inferiores a 2%, tanto para topologias com maior grau de vizinhança ($G_{max} = 8$) quanto para as de menor grau.

A Figura 4(b) explora os resultados obtidos para o percentual de fluxos de dados



(a) Taxa de sucesso do escalonamento



(b) Percentual de fluxos de dados fim-a-fim

(c) Atraso de entrega relativo

Figura 4. Influência do percentual de sensores ativos

fim-a-fim, influenciado principalmente pelas colisões: tanto aquelas relacionadas com a existência de *slots* cuja transmissão simultânea pode resultar em interferências (representadas pela taxa de sucesso), como a ocorrência de colisões durante as trocas de mensagens do mecanismo de sinalização. A adoção de estratégias de auto-correção, como o reenvio das subscrições pelos *subscribers* ou a retransmissão de notificações quando uma subscrição já confirmada é recebida pela segunda vez, possibilitou a obtenção de resultados para esta métrica superiores a 95%, mesmo nos cenários que contam com a totalidade dos sensores publicando dados compatíveis com as subscrições.

Os resultados da Figura 4(c) confirmam as expectativas de que, com o aumento da demanda de escalonamento para um maior número de publicações, a elevação da disputa pode ampliar o intervalo requerido desde a publicação até sua entrega ao *subscriber*.

Sob o ponto de vista dos diferentes percentuais de *subscribers* com algum tipo de restrição temporal, observa-se que o aumento na proporção eleva o atraso de entrega, contudo, mantendo a tendência de permanecer dentro de valores finitos. A taxa de sucesso do escalonamento, por sua vez, torna-se ligeiramente inferior (não maior que 4%), enquanto o fluxo de dados tende a manter-se aproximadamente constante.

Analisando os resultados das Figuras 3 e 4 sob um ponto de vista global, podem ser observados excelentes resultados para a taxa de sucesso (superiores a 95%). Este número é excepcionalmente positivo porque retrata uma análise de pior caso das simulações, pois a utilização de um mesmo *slot* por dois nós da rede não representa uma garantia de ocorrência de colisão, uma vez que os nós podem apresentar frequências de

publicação distintas durante as transmissões síncronas. O mesmo pode-se dizer do percentual de fluxos de dados fim-a-fim que, em geral, mantém-se no intervalo de 90 a 100%. Tais resultados demonstram a habilidade do mecanismo de gerar escalonamentos distribuídos capazes de suportar o fluxo dos dados desde os *publishers* até os *subscribers*. Os atrasos de entrega observados, mantidos em um intervalo finito, demonstram, por fim, a capacidade dos escalonamentos em atender a aplicações de tempo-real.

5. Trabalhos Relacionados

A literatura apresenta diversos esquemas de comunicação que se utilizam da divisão do período de comunicação para a priorização de fluxos de dados nos mais variados tipos de redes. Os mais conhecidos dentre eles são os protocolos [IEEE 802.11e 2005] e [IEEE 802.15.4 2011]. Em comum, as propostas consideram o particionamento do tempo de comunicação em ciclos, conhecidos como superquadros. Os superquadros são divididos 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.

No que tange ao escalonamento das transmissões síncronas, a literatura apresenta propostas com as mais variadas soluções para o problema. A maioria delas aborda o escalonamento de forma centralizada, contando com as informações globais da rede. Dentre as propostas que tratam o escalonamento de forma distribuída, [Rhee et al. 2006] destaca-se entre as mais citadas. Seu trabalho utiliza um mecanismo baseado em uma máquina de estado que, a partir de informações da topologia local, garante a inexistência de transmissões simultâneas a até 2 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 a seus vizinhos de até 2 saltos, desencadeando o envio de um número significativamente elevado de mensagens. Somado a isso, observa-se que a proposta não contempla uma abordagem fim-a-fim, que foque na alocação sequencial de *slots* para reduzir o tempo de resposta ao usuário da informação.

A proposta aqui apresentada, por sua vez, ao utilizar-se dos benefícios advindos do modelo *publish/subscribe* descritos na Seção 2, além de permitir a integração das transmissões assíncronas e síncronas com restrições temporais distintas em uma única WSA, é capaz de promover um melhor aproveitamento dos recursos por meio da minimização do tráfego de controle, bem como através de uma maior eficiência no envio e destinação das mensagens de dados.

Assim, apesar da existência de diferentes propostas de escalonamento distribuído, não foi possível identificar na bibliografia uma abordagem que permitisse uma comparação representativa entre as taxas de sucesso, atraso de entrega e fluxos de dados fim-a-fim, pois não seriam capazes de capturar as melhorias supracitadas.

6. Conclusão

O compartilhamento das WSANs e a integração entre aplicações com e sem restrições temporais constitui-se um desafio passível de ser vencido com o reaproveitamento de um esquema *publish/subscribe* para o controle descentralizado da comunicação assíncrona e a reserva de um período de comunicação para as transmissões síncronas, associado a um mecanismo de sinalização para o escalonamento distribuído, que realiza o reuso das mensagens *publish/subscribe* e minimiza o aumento do tráfego de controle.

As métricas obtidas neste trabalho para avaliar o mecanismo de sinalização proposto confirmam a viabilidade de utilização do paradigma *publish/subscribe* para o escalonamento distribuído e sua sinalização, ao mesmo tempo em que possibilita sua integração completa com as comunicações *non-real-time*. Os resultados demonstram que a taxa de sucesso do escalonamento, o percentual de fluxos de dados fim-a-fim e o atraso de entrega relativo oferecem valores condizentes com as aplicações que apresentam diferentes graus de exigências temporais.

Na continuidade deste trabalho pretende-se desenvolver o mecanismo de sinalização proposto para permitir o escalonamento em níveis de prioridade variados e avaliar o impacto do intervalo entre as publicações e da frequência de atualização esperada pelos *subscribers* sobre o escalonamento gerado.

Referências

- Akyildiz, I. F. and Kasimoglu, I. H. (2004). Wireless sensor and actor networks: research challenges. *Ad Hoc Networks*, 2(4):351–367.
- Eugster, P. T., Felber, P. A., Guerraoui, R., and Kermarrec, A.-M. (2003). The many faces of publish/subscribe. *ACM Computing Surveys*, 35(2):114–131.
- IEEE 802.11e (2005). IEEE Supplement to Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements. *IEEE Std. 802.11e-2005*, pages 1–189.
- IEEE 802.15.4 (2011). IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). *IEEE Std. 802.15.4-2011*, pages 1–314.
- Intanagonwiwat, C., Govindan, R., and Estrin, D. (2000). Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 56–67, New York, NY, USA. ACM.
- Kavi, K. M., Akl, R., and Hurson, A. R. (2008). Real-time systems: An introduction and the state-of-the-art. In Wah, B. W., editor, *Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering*. John Wiley & Sons, Inc.
- Melodia, T., Pompili, D., Gungor, V. C., and Akyildiz, I. F. (2007). Communication and coordination in wireless sensor and actor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 6(10):1116–1129.
- Rhee, I., Warrier, A., Min, J., and Xu, L. (2006). Drand: distributed randomized tdma scheduling for wireless ad-hoc networks. In *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, pages 190–201, New York, NY, USA. ACM.
- Silva, F., Heidemann, J., Govindan, R., and Estrin, D. (2004). Directed diffusion. Technical Report ISI-TR-2004-586, USC/Information Sciences Institute.