

## Uma Solução de QoS com Processamento Centrado para Redes de Atuadores e Sensores sem Fio

Regina B. Araujo<sup>1</sup>, Leandro A. Villas<sup>1</sup> and Azzedine Boukerche<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Informática – Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)  
Caixa Postal 676 – 13.565-905 – São Carlos – SP – Brazil

{regina, leandro\_villas}@dc.ufscar.br

<sup>2</sup>Site – University of Ottawa  
Ottawa – Canada

boukerch@site.uottawa.ca

**Abstract.** *Wireless Actuators and Sensor Networks (WASNs) can be used as powerful and accurate tools for supervision and control applications. This class of applications poses strict requirements of latency, fault tolerance and delivery reliability. Quality of Service (QoS) mechanisms aims to meet those requirements. This paper presents QARP-CP, a novel QoS-based routing protocol, which is unique in at least three aspects: it meets the application requirements for low latency, high delivery reliability, uniform energy consumption and fault tolerance; it deals with interactions among sensors, actuators and sink; and handles optimal route selection. Performance evaluation of QARP-CP shows that it can be a potential solution for the monitoring of physical environments that are subject to emergency situations.*

**Resumo.** *Redes de Atuadores e de Sensores Sem Fio (RASSF) podem ser utilizadas como ferramentas poderosas em aplicações de supervisão e controle. Esta classe de aplicações impõe requisitos estritos de latência, tolerância a falhas e confiabilidade de entrega. Mecanismos de Qualidade de Serviço (QoS) visam garantir que esses requisitos sejam atendidos. Este artigo apresenta um protocolo baseado em QoS, QARP-CP, que diferencia-se das soluções existentes de QoS para RASSF em pelo menos três aspectos: atende os requisitos da aplicação de baixa latência, alta confiabilidade de entrega, consumo uniforme de energia e tolerância a falhas; trata da interação entre nós sensores, atuadores e sink; e trata da seleção de rotas ótimas. A avaliação de desempenho do QARP-CP mostra que este pode ser uma solução em potencial para a supervisão de ambientes físicos sujeitos a situações de emergência.*

### 1. Introdução

Com os recentes desenvolvimentos nas áreas de comunicação sem fio e sensores multifuncionais com capacidade de comunicação e processamento, as Redes de Sensores sem Fio (RSSF) têm sido usadas de forma crescente em inúmeras aplicações. Uma classe de aplicações em potencial que pode se beneficiar das RSSF é a preparação para emergências, em especial, as aplicações de monitoramento de ambientes físicos cientes do contexto, sujeitos a situações de emergência, que podem colocar em risco vidas e patrimônio [BOUK2006].

Apesar da crescente aplicação das RSSF, os sensores são dispositivos passivos que basicamente coletam e disseminam dados, mas não atuam no ambiente. Já as Redes

de Atuadores e Sensores sem Fio (RASSF), possuem os atuadores, dispositivos com maior potencial de processamento, comunicação e de energia, que podem tomar decisões e executar ações no ambiente físico, em resposta a situações interpretadas dos sensores. Por outro lado, os sensores são dispositivos altamente limitados em relação à energia e poder computacional e de comunicação. A combinação de sensores e de atuadores em uma mesma rede, chamadas de Redes de Atuadores e Sensores Sem Fio (RASSF), alavanca ainda mais o potencial das RSSF no monitoramento preciso de diferentes ambientes físicos que exigem resposta imediata sob pena de riscos de morte e de perda de patrimônio.

Na classe de aplicações de preparação para emergências, em que informações importantes devem ter garantia de entrega, soluções que oferecem qualidade de serviço (QoS) em RASSF são de fundamental importância. QoS é definido de várias formas na literatura [Akkaya and Younis 2003] [Carpenter and Nichols 2002]. No contexto deste trabalho, QoS é definida como a capacidade da rede de garantir que determinados fluxos de tráfego sejam tratados de forma diferenciada, de acordo com as necessidades da aplicação, e que recursos da rede sejam utilizados de forma otimizada. Nas RASSF, que possuem limitações estritas de recursos de energia, tráfego desbalanceado, redundância de dados, dinamicidade da rede, balanceamento do uso de energia, problema de escalabilidade, etc., QoS é uma questão importante, cuja solução apresenta grandes desafios comparada às soluções de QoS para redes tradicionais [Chen and Varshney 2004] [Wang, Liu and Yin 2006].

Este trabalho apresenta o QARP-CP (*QoS Aware Routing Protocol - Centered Processing*), um protocolo de roteamento ciente de QoS para Redes de Atuadores e Sensores Sem Fio. No QARP-CP, a RASSF é configurada através de árvores de saltos (*hops*), construídas durante a fase de configuração inicial da rede. O paradigma *Publish/Subscribe* [Eugster et. al. 2003] é usado para promover a interação entre nós sensores, atuadores e sorvedouro (*sink*). O QARP-CP provê maior longevidade da rede, baixa latência e confiabilidade na entrega de eventos mesmo na presença de falhas. Maior longevidade da rede é obtida através de consumo de energia uniforme (com o uso do trajeto mais econômico em termos de energia para os pacotes de baixa prioridade) – os trajetos são escolhidos em resposta às necessidades de latência e através de subscrição rápida de novos interesses e mecanismo de tolerância à falhas. QARP-CP diferencia-se de outras soluções existentes por tratar a interação entre sensor-atuador, atuador-atuador e atuador-*sink*, objetivando resposta ótima da rede a situações de emergência, e também por selecionar rotas ciente de energia, latência e taxa de recepção. O artigo é organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. A Seção 3 descreve o algoritmo QARP-CP. A avaliação do algoritmo é discutida na seção 4, seguida de conclusões na seção 5.

## 2. Trabalhos Relacionados

O *Sequential Assignment Routing* (SAR) [Sohrabi, Gao, Ailawadhi and Pottie (2000)] foi um dos primeiros protocolos a tratar de QoS em suas decisões de roteamento para redes de sensores. O SAR utiliza múltiplos caminhos como solução para consumo de energia e tolerância a falhas – um caminho é selecionado de acordo com o seu nível de energia e qualidade de serviço. Em [He et al. 2003], é apresentado o SPEED, um protocolo de comunicação de tempo real, que usa uma combinação de controle de

retorno (*feedback*) e localização geográfica para encontrar os caminhos para disseminação de dados. O SPEED garante também que cada pacote na rede seja entregue dentro de um período determinado de tempo. Uma arquitetura de comunicação de tempo real para redes de sensores sem fio de larga-escala é reportado em [Lu et al. 2002], que descreve uma política de escalonamento de pacotes (*Velocity monotonic Scheduling*) baseada em restrições de tempo e distância. Em [Xiaoxia H., Yuguang F. (2005)] foi proposto o protocolo *PRIMAR (Prioritize Multipath Routing)* que tem como objetivo oferecer serviços diferenciados nas redes de sensores sem fio. Para isso, é utilizada a classificação de pacotes cientes de informação. O protocolo focaliza apenas no atraso fim-a-fim e o método de seleção de rotas é feito de forma distribuída.

Embora as soluções propostas de QoS relatadas na literatura, como as mencionadas acima, se mostrem eficientes para RASSF, estas não podem ser aplicadas diretamente às Redes de Atuadores e Sensores Sem Fio. Características inerentes às RASSF que incluem desde a estrutura heterogênea da rede (com os nós atuadores, sensores e sorvedouros), até a interação sensor-atuador e atuador-atuador, exigem soluções próprias de QoS. Soluções propostas que exploram redes de sensores heterogêneas, como em [Mhatre et al. 2005] e [Yarvis et al. 2005], não tratam das características especiais das RASSF e de suas formas de operar. Em [Hu et al. 2004], o paradigma de comunicação *anycast* é proposto, em que uma árvore *anycast* é construída em cada nó sensor. Essa árvore é atualizada dinamicamente de acordo com as ligações e permissões dos nós sorvedouros. Rotas são determinadas a partir de subscrição de interesse manifestado pelos nós sorvedouros. Já em [Cayirci et al. 2005] é proposto um protocolo de roteamento, ciente de energia, *muitos-para-muitos*, em que o atuador registra os tipos de dados de seu interesse, através do envio de uma mensagem de registro de tarefa - a partir disso, os sensores constroem suas tabelas de roteamento. Neste esquema, os dados capturados pelos nós sensores são enviados para cada atuador que mostrou interesse nesses dados.

O problema com as soluções de QoS para RASSF sumarizadas acima é a quantidade de tráfego que é gerado na rede. Mais ainda, essas soluções não exploram o potencial da interação entre sensores e atuadores, o qual poderia contribuir para a maior eficiência da rede quando da atuação no ambiente físico frente a situações de emergência. Em [Han et al. 2006], um esquema de roteamento ciente de energia é proposto para RASSF, em que atuadores enviam mensagem de estabelecimento de rotas para os sensores e estes armazenam as informações em tabela própria de roteamento. Quando um sensor precisa transmitir um dado para o atuador de sua área, ele escolhe um vizinho de forma aleatória, e o vizinho selecionado age da mesma forma até que o dado seja entregue ao atuador. Nesta solução, níveis de energia e atraso das rotas utilizadas não são levados em consideração.

Nossa solução, QARP-CP, diferencia-se das soluções de QoS para RASSF apresentadas na literatura em pelo menos três aspectos importantes: atende simultaneamente os requisitos da aplicação de baixa latência, alta confiabilidade de entrega, consumo uniforme de energia e tolerância a falhas; trata da *interação* entre sensor-atuador e atuador-atuador objetivando resposta ótima da rede à situações de emergência; e trata da seleção de rotas cientes de energia e de latência. O algoritmo é descrito em detalhes na próxima seção.

### 3. Descrição do QARP-CP (*QoS-Aware Routing Protocol-Centered Processing*) para RASSF

O QARP-CP é um protocolo para redes de atuadores e sensores sem fio que visa atender, simultaneamente, os principais requisitos de classes de aplicações de tempo real crítico, que utilizam RASSF para monitoramento e controle de ambientes físicos sujeitos a situações de emergência. Os requisitos atendidos incluem: baixa latência e confiabilidade na entrega de pacotes, reparo rápido de caminhos na presença de falhas, e economia de energia com gasto uniforme.

O algoritmo de roteamento QARP-CP é realizado em quatro fases. A primeira fase envolve a construção das árvores de saltos (*hops*). O nó sorvedouro inicia a configuração da rede emitindo um sinal para os nós atuadores. Os nós atuadores, ao receberem esse sinal, iniciam o processo de construção das árvores de saltos, que serão usadas para propagação de mensagens de subscrição e de dados na rede. A construção dessas árvores leva a uma divisão da rede em áreas de atuação (sub-redes), como mostra a figura 2. A segunda fase consiste da coleta de informações das sub-redes e sua entrega ao atuador da área. A terceira fase é responsável pelo processamento das informações coletadas na fase 2, gerando como resultado o estabelecimento de rotas. Finalmente, na quarta e última fase, os dados dos sensores são entregues ao Atuador/Sorvedouro utilizando rotas mais rápidas para pacotes de prioridade 1 (obtendo menor latência), rotas mais confiáveis na entrega para pacotes de prioridade 2 (através de rotas com maior taxa de entrega) e rotas de baixo custo para pacotes de prioridade 3 (economizando energia da rede). As prioridades podem ser alteradas pela aplicação, podendo inclusive haver combinação de requisitos (por exemplo, seleção de rota de menor latência e de maior taxa de recepção). Durante a fase 4, pode ser realizado o reparo de caminhos em caso de ocorrência de falhas, além da atualização da matriz de adjacência, que registra as rotas determinadas nos atuadores. As quatro fases do QARP-CP são descritas abaixo.

#### 3.1. Construção das Árvores de Saltos

Na fase de construção das árvores de saltos, a área considerada é dividida em sub-áreas de atuação em que é configurado o nível de salto de cada nó sensor. Isso é feito a partir dos nós atuadores, logo após receberem do nó sorvedouro o sinal de configuração da rede. Os nós atuadores enviam então, através de inundação, uma mensagem MCHDR (*Mensagem de Configuração de Hops e Divisão da Rede*) para configuração de saltos e divisão da rede em áreas de atuação. A mensagem MCHDR é mostrada na figura 1 e descrita abaixo:



Figura 1. Formato da Mensagem MCHDR.

Onde:

- *ID\_A* - Identificador do Atuador que iniciou a mensagem MCHDR;
- *HOP* - Número de saltos pelos quais a MCHDR passou. HOP é iniciado com valor 0 no Atuador e incrementado de 1 cada vez que a MCHDR passa por um sensor;
- *TLM* - Indica o tempo de vida da mensagem MCHDR na rede, equivalente ao número máximo de hops que a mensagem MCHDR pode atingir na área de atuação do Atuador.

Na fase de construção das árvores de saltos, os nós sensores gravam os parâmetros  $ID\_A$  e  $HOP$  em sua tabela de Roteamento. O algoritmo para a construção da árvore de saltos é baseado na inundação da rede, com um valor de  $HOP$  iniciado no Atuador, que é armazenado, incrementado e transmitido aos nós vizinhos (através de difusão). Os nós vizinhos, por sua vez, armazenam, incrementam e transmitem o valor de  $HOP$  recebido para seus nós vizinhos, e assim sucessivamente, até que toda a rede esteja configurada, como mostra a Figura 2.

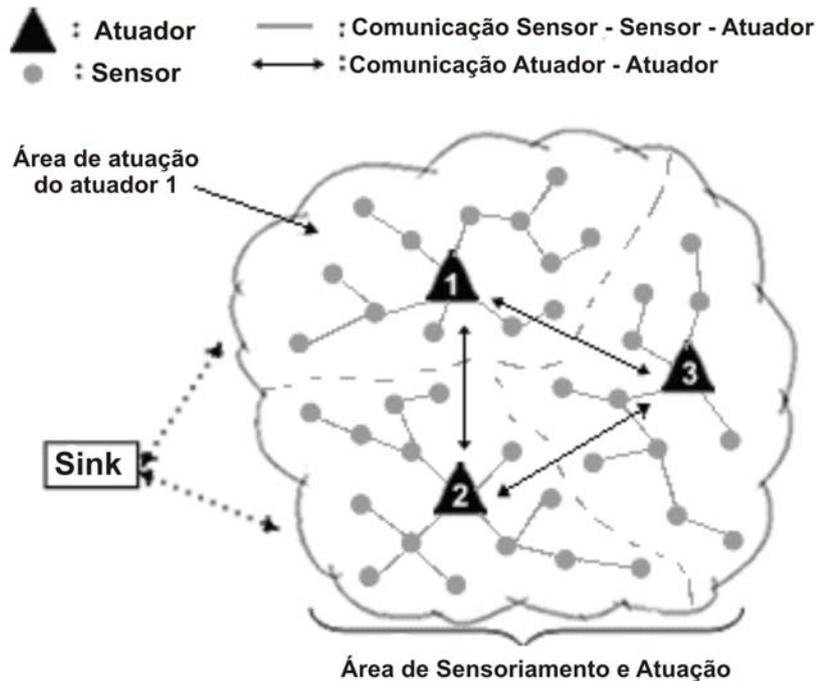


Figura 2. Construção das árvores de saltos e divisão em áreas de atuação.

Como a comunicação entre os nós da rede é realizada através da difusão de sinais de rádio (RF), todos os nós vizinhos recebem a transmissão. Dessa forma, um nó que acabou de transmitir uma mensagem, pode receber a mesma mensagem de seu vizinho, gerando um caminho fechado (*loop*). Para evitar essas transmissões inúteis e que geram gasto de energia, um conjunto de regras foi estabelecido como parte do algoritmo de difusão de  $HOP$ . Uma das regras locais estabelece que cada nó, ao receber uma transmissão com o  $HOP$ , compara o  $HOP$  recebido com o seu  $HOP$  local. Se o valor do  $HOP$  local for maior que o valor recebido, o nó atualiza seu  $HOP$ , incrementa seu valor e o retransmite para seus vizinhos. No caso do  $HOP$  armazenado no nó ser menor ou igual ao  $HOP$  recebido, o nó não atualiza seu  $HOP$  e não transmite, mas quando o  $HOP$  armazenado no nó for menor do que  $HOP$  recebido ele armazena o ID do nó que transmitiu a MCHDR como vizinho de nível de salto maior, para ser usado na segunda fase do algoritmo. A primeira fase termina quando o campo  $HOP$  tiver o mesmo valor que o campo  $TLM$  da mensagem MCHDR. Os nós sensores que receberem as mensagens MCHDR com os campos  $TLM$  e  $HOP$  de mesmo valor são chamados de nós folhas da área e são eles os responsáveis por iniciarem a segunda fase da configuração da rede.

### 3.2. Coleta de Informações da Rede

Os nós sensores responsáveis pela inicialização da segunda fase transmitem para seus vizinhos de nível de *hop* menor, da mesma área de atuação, uma Mensagem de Coleta de Informações de Rede (**MCIR**) mostrada na figura 3 que tem os seguintes parâmetros:

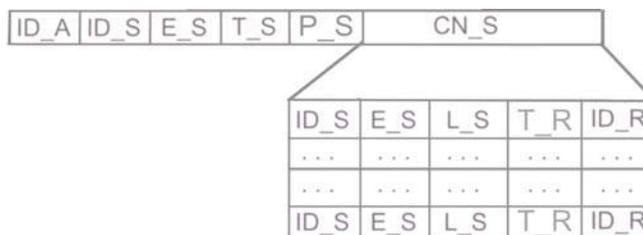


Figura 3. Formato da Mensagem MCIR.

Onde:

- ID\_A - Indica para qual Atuador será encaminhada a mensagem **MCIR**;
- ID\_S - Denota o Identificador do Sensor que transmitiu a **MCIR**;
- E\_S - Denota a Quantidade de Energia disponível no sensor que transmitiu a **MCIR**;
- T\_S - Denota o tempo em que a mensagem MCIR foi transmitida;
- P\_S - Denota a Quantidade de pacotes enviados para o sensor ID\_R;
- CNs - Conjunto de informações coletadas nas retransmissões anteriores das mensagens **MCIR**;
- L\_S - Denota o tempo decorrente entre o envio da MCIR pelo sensor transmissor até a recepção da mensagem pelo sensor receptor, o calculo é o Tempo Corrente menos o T\_S;
- T\_R - Denota a Taxa de Recepção - o calculo é a divisão das mensagens recebidas pelo nó ID\_R pela quantidade de mensagens enviadas pelo nó ID\_S para o nó ID\_R;
- ID\_R - Denota o Identificador do Sensor que recebeu a **MCIR** do ID\_S.

Cada nó sensor, ao receber uma mensagem **MCIR** de seus vizinhos de nível de salto maior, monta um pacote de dados com as informações recebidas (no campo CNs). Após receber as **MCIR** de todos os vizinhos de nível de salto maior, o nó encaminha para seus vizinhos de nível de salto menor uma nova mensagem **MCIR** com as informações coletadas nas retransmissões anteriores das mensagens **MCIR**. Esse processo é repetido até que as mensagens **MCIR** sejam entregues ao atuador da área correspondente, conforme mostrado na figura 4.

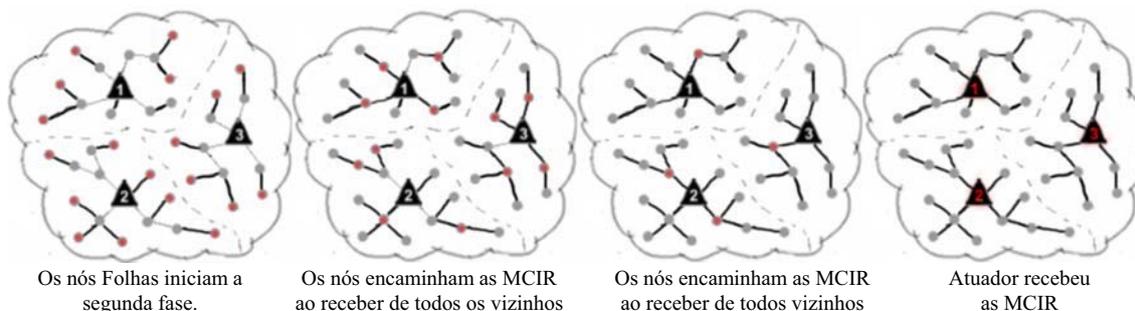


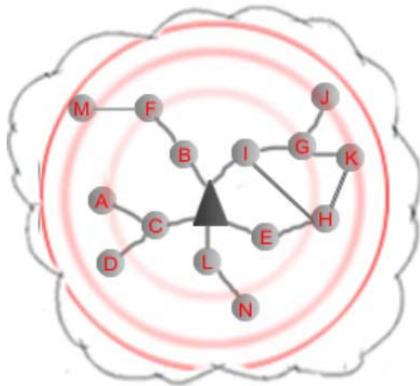
Figura 4. Exemplo da fase de coleta de informações da rede.

Após o recebimento das mensagens **MCIR** pelo atuador, este inicia a terceira fase da configuração da rede, descrita a seguir.

**3.3. Processamento das Informações Coletadas na Rede e Estabelecimento de Rotas**

Após a segunda fase da configuração da rede os nós atuadores têm informações dos nós sensores que estão na sua área de atuação, tais como: nível de energia, taxa de recepção e latência entre os nós sensores que se comunicam entre si. Com esses parâmetros, o nós atuadores iniciam a primeira etapa da terceira fase que é a construção da matriz de adjacências com os parâmetros coletados da segunda fase para representar a sub-rede computacionalmente - essa matriz representa um grafo da estrutura da sub-rede. O grafo é definido como  $G=(N,A)$  onde N corresponde aos nós da rede (vértices) e A corresponde às conexões entre dois nós (arestas).

Os grafos são representados através de uma matriz de adjacências armazenada nos atuadores. Assim, é possível para cada atuador, saber todas as rotas possíveis a partir de cada nó sensor da sua área de atuação até ele próprio. Com isso, os atuadores iniciam a segunda etapa da terceira fase, em que os nós atuadores executam um algoritmo de escolha de rotas. Esse algoritmo percorre a matriz que representa a sub-rede, analisando o nível de energia, latência e a taxa de recepção de cada trajeto. Após essa análise é gerado como resultado um pacote com a informação das melhores rotas para determinado tipo de tráfego. Os atuadores então, através de uma única mensagem, enviam o pacote na mensagem de estabelecimento de rotas (**MER**), conforme mostra a Figura 5. Os nós sensores da área de um atuador, ao receberem o pacote de estabelecimento de rotas, constroem suas tabelas de roteamento. Um exemplo de tabela de roteamento é mostrado na Tabela I.



**Figura 5 – Envio de Mensagem de Estabelecimento de rotas (MER)**

**Tabela I – Exemplo de Tabela de Roteamento do Nó K da Figura 3**

Prioridade	Próximo Nó
1	H
2	G
...	...
...	...

Após a construção da tabela de rotas em cada nó sensor, a terceira fase é finalizada e a rede está pronta para a fase de disseminação de dados com QoS, descrita na próxima seção.

**3.4. Entrega de Eventos aos Atuadores**

Quando um evento é capturado do ambiente físico por um nó sensor, este verifica sua tabela de subscrições de interesses para determinar se existe algum interesse registrado para aquele evento. Em caso afirmativo, o nó monta um pacote de notificação

e o envia para o atuador, através de rota selecionada na terceira fase de acordo com a prioridade do pacote, ou seja, de acordo com os requisitos exigidos para a entrega do evento detectado, conforme mostra a Figura 6.

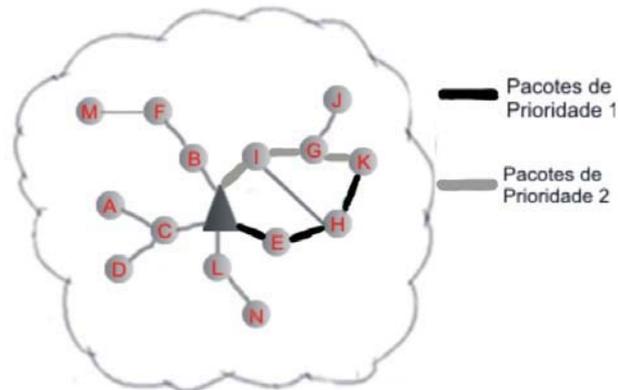


Figura 6 – Exemplo de seleção de rotas

Juntamente com as informações de sensoriamento a mensagem de notificação tem um campo “informações da rede” onde são gravadas informações sobre o nível de energia, taxa de recepção e latência ocorridas entre cada nó sensor percorrido pela mensagem para a entrega da notificação ao atuador. Ao receber a mensagem de notificação, o atuador realiza interpretação de contexto para determinar se precisa atuar no ambiente. O atuador atualiza então a sua matriz de adjacências e encaminha a mensagem para o nó sorvedouro.

Os Atuadores estarão com sua matriz de adjacências sempre atualizada devido ao fato de que toda vez que os nós sensores forem usados para entregar uma mensagem de notificação ao atuador, esta mensagem trará no campo “informações da rede” os novos parâmetros da rede, por onde essa mensagem de notificação passou. Sempre que necessário, os nós atuadores executarão a segunda etapa da terceira fase para escolher novas rotas, caso alguma rota que esteja sendo usada para a entrega de mensagens de notificação de um determinado tipo de prioridade não satisfizer mais o requisito exigido.

No caso de ocorrência de falhas nos nós que perfazem os trajetos, o nosso algoritmo usa a solução descrita em [Boukerche, Araujo and Villas (2006)] para a seleção de um novo caminho temporário até que o atuador seja avisado que o nó falhou. O atuador saberá que o nó falhou assim que a mensagem de notificação chegar pelo caminho temporário e com isso o atuador retira o nó que falhou de sua matriz de adjacências e executa a segunda etapa da terceira fase do algoritmo para restabelecer as rotas.

#### 4. Avaliação de Desempenho

A nossa solução é comparada a dois outros protocolos de roteamento baseados em QoS: o QARP [Boukerche, Araujo and Villas (2006)], uma versão de nosso protocolo para RASSF com processamento de rotas descentralizado, i.e., o processamento de rotas é realizado nos nós sensores; e com o PRIMAR [Xiaoxia H., Yuguang F. (2005)], um protocolo que utiliza classificação de pacotes em prioridades com o objetivo de oferecer

serviços diferenciados nas redes de sensores sem fio. Os objetivos principais dessa comparação são: avaliar o desempenho do QARP-CP em relação ao PRIMAR usando como métricas a Latência e Custos (*Overhead*) de mensagens de controle; e avaliar o desempenho do QARP-CP em termos de escalabilidade.

#### 4.1. Cenário de Simulação e Métricas Utilizadas

O cenário de simulação é o mesmo usado em [Xiaoxia H., Yuguang F. (2005)], e consiste de uma área de 200x200 metros, com 100 nós sensores, implantados aleatoriamente na área. Dez nós sensores foram escolhidos aleatoriamente como nós produtores de eventos com taxa de 1 pacote por segundo. Para testar o desempenho em diferentes condições de congestionamento, nós escolhemos um outro nó qualquer, também aleatoriamente, com taxa de 1 pacote por segundo aumentando gradualmente a 100 pacotes por segundos.

A Tabela 2 contém os parâmetros utilizados na simulação. O QARP-CP, o QARP e o PRIMAR foram simulados no simulador de redes NS-2 com os mesmos valores e cenários.

**Tabela 2. Parâmetros de simulação.**

Parâmetros	Valores
Número de nós Sensores	100
Numero de nós Produtores	10
Alcance do rádio do Sensor	40 m
Energia para transmissão	14.88 mW
Energia para recepção	12.50 mW
Energia em modo ocioso	12.36 mW
Energia em modo <i>Sleep</i>	0.016 mW
Largura de Banda	200Kb/s
Tamanho dos Pacotes	32 bytes

As seguintes métricas foram implementadas na simulação:

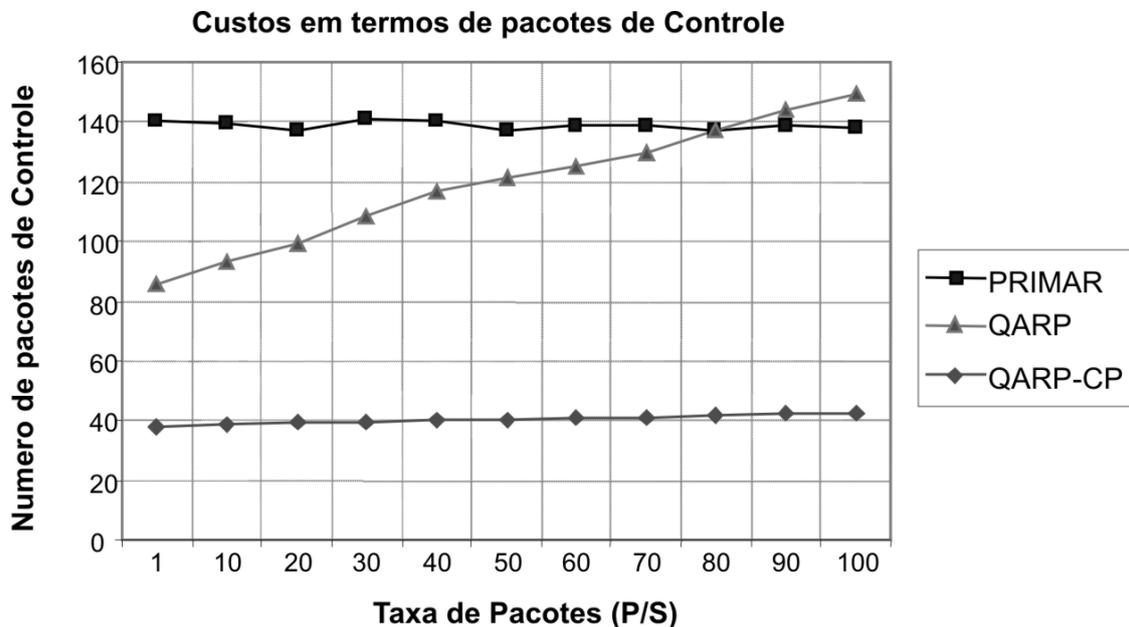
- **Custo de mensagens de controle:** define o número de mensagens de controle transmitidas para manter a rede atualizada;
- **Atraso Fim-a-Fim:** é definido como o tempo em que o pacote ficou na rede, desde o momento em que ele foi gerado até o momento em que ele foi entregue ao nó sorvedouro.

#### 4.2 Avaliação e Resultados Obtidos

##### 4.2.1 Custo de Mensagens de Controle

Mensagens de controle são usadas para configurar a rede e para manter atualizada a tabela de roteamento dos nós sensores. A métrica “Custos de Mensagens de Controle” é importante, pois existe uma relação com o custo de energia e latência. Essa métrica é usada para mostrar a eficiência do QARP-CP x PRIMAR x QARP em relação ao custo que cada algoritmo tem para manter as funcionalidades da rede. Esses custos são avaliados, através do número de mensagens de controle que são transmitidas para configurar a rede e manter atualizadas as tabelas de roteamento dos nós sensores. A

figura 7 mostra que o QARP-CP é quase três vezes mais eficiente que o PRIMAR e também que o QARP. A eficiência do QARP-CP é devida principalmente ao fato do QARP-CP fazer a seleção das rotas de modo centralizado no Atuador/Sorvedouro.



**Figura 7. Custos de Controle: QARP-CP X QARP x PRIMAR.**

A vantagem do QARP-CP ser quase três vezes mais eficiente que o PRIMAR e QARP, como mostrado na figura 7, tem um impacto na longevidade da rede, pois a transmissão é o que consome mais energia de um nó sensor. Além disso, o impacto é sentido também na latência, pois quanto menor for o número de mensagens de controle enviadas, menor será o tráfego na rede. A Figura 8 mostra a eficiência do QARP-CP em relação ao PRIMAR em termos de latência.

#### 4.2.2 Atraso Fim-a-Fim

Esta métrica reflete o tempo que a RSSF necessita para informar o observador da ocorrência de um determinado fenômeno – no caso, o atuador da área monitorada. Algumas aplicações são sensíveis à latência e necessitam de tempos de resposta curtos (ex: monitoramento de *tsunamis*). Como mostra a figura 8, o QARP-CP demonstra ter um melhor desempenho na entrega de mensagens em termos de latência. Isto se deve ao fato de que no PRIMAR, a transmissão de mensagens de controle é de quase três vezes mais do que no QARP-CP, e essas mensagens de controle aumentam o tráfego na rede, aumentando também o atraso fim-a-fim. Mais ainda, a escolha dos trajetos também impacta na latência.

No QARP-CP, pacotes de prioridade 1 escolhem dentre todos os trajetos possíveis aquele de menor latência; pacotes de prioridade 2 escolhem dentre todos os trajetos possíveis o de maior taxa de recepção; e pacotes de prioridade 3 escolhem trajetos com o maior nível de energia.

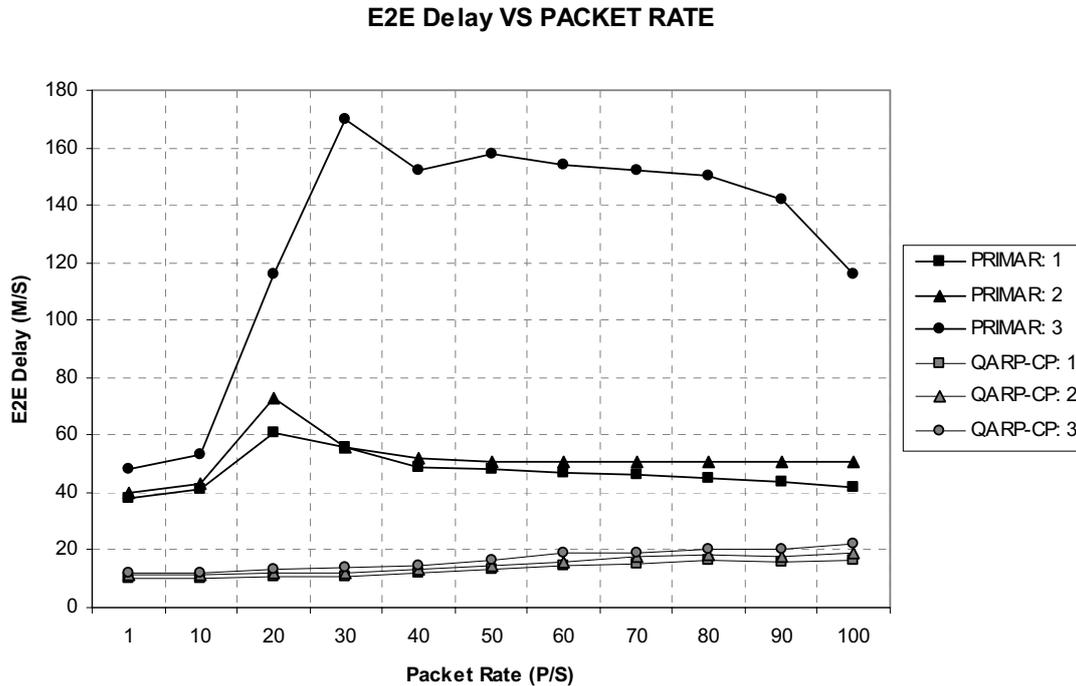


Figura 8. Atraso Fim-a-Fim: QARP-CP vs PRIMAR.

#### 4.2.3 - Análise de Desempenho do QARP-CP

Nessa análise consideramos um cenário de 600x600 metros, variando o número de nós sensores de 400 a 800 nós, implantados aleatoriamente na área. Foram utilizados também quatro nós atuadores, sendo eles implantados nas posições (150,150), (450,150), (150,450), (450,450), além de um nó sorvedouro na posição (600,300). Quarenta nós foram escolhidos aleatoriamente como nós produtores de eventos com taxa variando de 5 a 20 pacotes por segundo, sendo 10 nós produtores de evento para cada atuador. Os parâmetros de energia, largura de banda e tamanho de pacote são os mesmos mostrados na tabela 2. Todos os experimentos foram executados em 10 simulações e foram calculados a média aritmética e o intervalo de confiança para 95%. Os gráficos desta seção incluem os valores médios e o intervalo de confiança representado por barras de erros.

As seguintes métricas foram usadas para avaliação:

- **Taxa de Entrega:** definida como a razão entre o número de pacotes recebidos e o número de pacotes enviados.
- **Latência:** definida como o tempo de permanência do pacote na rede: do momento em que ele foi gerado até o momento em que ele foi entregue ao nó atuador (ou nó sorvedouro no caso do PRIMAR).

**Confiabilidade de entrega:** Conforme mostrado na figura 9, o QARP-CP tem um bom desempenho na taxa de entrega de pacotes e a sua eficiência aumenta quando a densidade dos nós aumenta no campo sendo monitorado. Isto ocorre porque a inserção de nós aumenta o número de trajetos entre o nó fonte e o nó destino. Como o QARP-CP utiliza os melhores trajetos possíveis entre fonte e destino, com o aumento de nós

sensores aumentam os números de trajetos e também as chances de se ter trajetos melhores em maior quantidade.

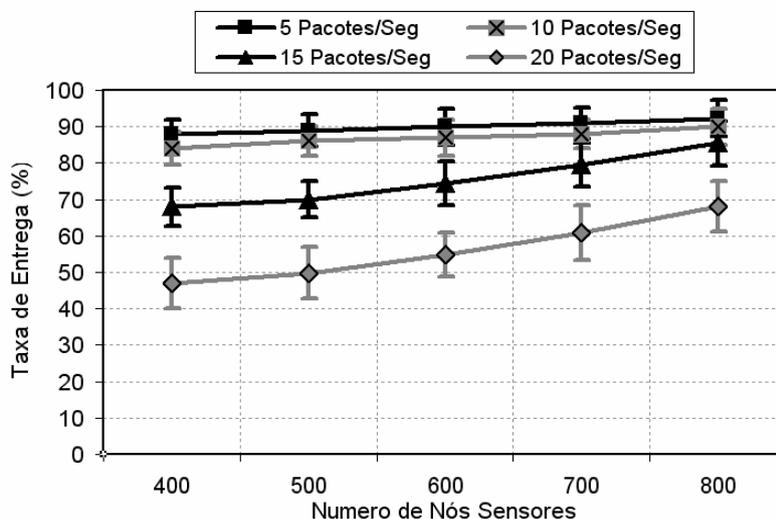


Figura 9. Taxa de Entrega.

Além disso, com o aumento do número de trajetos, há uma diminuição do número de pacotes perdidos por falta de espaço na fila de armazenamento de pacotes nos nós sensores quando de uma sobrecarga de tráfego – quando os nós começam a perder pacotes no enfileiramento por sobrecarga de tráfego, as rotas são recalculadas e atualizadas. Com isso, a taxa de entrega aumenta.

**Latência:** Podemos observar na Figura 10 que o QARP-CP se torna mais eficiente em termos de latência quando a densidade da rede aumenta, já que a inserção de nós sensores aumenta o número de trajetos entre fonte e destino e, por consequência, haverá um número maior de melhores trajetos em termos de latência.

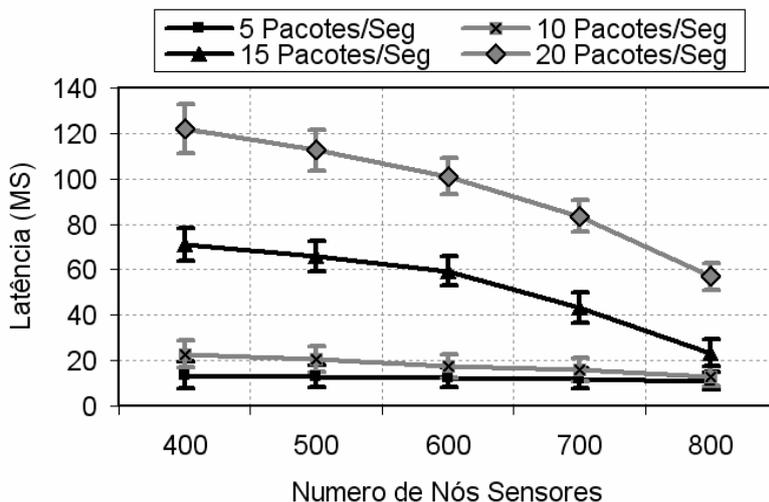


Figura 10. Latência.

Quando o tráfego na rede aumenta, os pacotes sofrem um atraso maior na fila resultando em uma latência maior. Como o QARP-CP realiza balanceamento de carga, se existir um número maior de sensores na área, esse atraso na fila vai ser menor, o que

significa latência menor. Conforme mostra a figura 10, com uma taxa de geração de 20 pacotes por segundos em uma rede com 400 nós, a latência é aproximadamente de 123 milissegundos. Com a mesma taxa de geração de pacotes, se a rede tiver 800 nós, a latência diminui para 57 milissegundos, ou seja, a latência diminui em aproximadamente 213%. Isso é conseguido devido ao balanceamento de tráfego que é realizado pelo QARP-CP que recalcula e atualiza as rotas quando a rede mostra sinais de sobrecarga.

## 5. Conclusões

As Redes de Atuadores e Sensores Sem Fio podem aumentar muito a precisão em aplicações de monitoramento de ambientes físicos sujeitos a situações de emergência. Esta classe de aplicações impõe requisitos estritos de latência, tolerância a falhas e confiabilidade na entrega de eventos dentro de limites estabelecidos de tempo. O Protocolo de roteamento QARP-CP é apresentado neste artigo, que atende os requisitos mencionados, através de um mecanismo de Qualidade de Serviço, que utiliza os atuadores como catalizadores de informações de configuração de rede para a construção de rotas ótimas, com priorização de tráfego, que são passadas aos sensores para que estes as utilizem para a entrega dos eventos em tempo especificado pela aplicação. O QARP-CP utiliza o paradigma de publicação/subscrição para promover a interação entre os nós sensores, atuadores e sorvedouro. O desempenho do QARP-CP em termos de Latência e Custos de mensagens de controle, mostra-se superior quando comparado a dois outros protocolos: QARP, que faz o processamento de rotas de forma descentralizada nos nós sensores; e PRIMAR, um protocolo de roteamento para as RSSF, com diferenciação de serviço. Os resultados mostraram que o QARP-CP é mais eficiente quando comparado ao QARP e PRIMAR. Na análise do QARP-CP, este mostrou suporte a escalabilidade em termos de latência e confiabilidade de entrega. QARP-CP pode ser uma solução em potencial para o monitoramento de ambientes físicos sujeitos a situações de emergência que possam colocar em risco vidas e patrimônio.

## Agradecimentos:

Os autores agradecem à Fapesp (Proc.: 2006/00741-7 ) pelo financiamento deste projeto e também ao CNPq pelo financiamento do bolsista de mestrado, Sr. Leandro Villas. Este projeto é parte de um projeto maior, realizado em colaboração com o laboratório Paradise do SITE da Universidade de Ottawa, parcialmente financiado pelo *Canada Research Chair Program, NSERC*.

## Referências

- Akkaya, K. and Younis, M. (2003) "An Energy-Aware QoS Routing Protocol for Wireless Sensor Networks," in the IEEE Proceedings of Workshop on Mobile and Wireless Networks, Providence, Rhode Island.
- Boukerche, A., Araujo, R. B., Villas, L. A. (2006) "QoS Based Routing protocol for Wireless Sensor networks". In: Local Computer Networks, Proceedings 2006 31st IEEE Conference on Performance Management of Wireless and Mobile Networks (P2MNet), Nov. 2006, p. 832-839, Digital Object Identifier: 10.1109/LCN.2006.322184.

- Carpenter, B. E., Nichols, K. (2002) "Differentiated services in the Internet". Proceedings of the IEEE Volume 90, Issue 9, Sep 2002 Page(s): 1479 - 1494 Digital Object Identifier 10.1109/JPROC.2002.802000.
- Cayirci, E., Coplu, T. and Emiroglu, O., (2005) "Power aware many to many routing in wireless sensor and actuator networks", in Proc. of the Second European Workshop, pp. 236 – 245.
- Chen, D. and Varshney, PK (2004) "QoS Support in Wireless Sensor Network: A Survey," Proc. of the 2004 International Conference on Wireless Networks.
- Eugster, P. T., Felber, P., Guerraoui, R. and Kermarrec, A. (2003) "The many faces of publish/subscribe". ACM Computing Surveys. 35(2): 114-131.
- Han, P., Huaifeng, W., Dilin, M., Chuanshan, G. (2006) "ELRS: an energy-efficient layered routing scheme for wireless sensor and actor networks", Advanced Information Networking and Applications. AINA 2006. 20th International Conference on Volume 2, pp. 18-20.
- He, T., Stankovic, J., Lu, C. and Abdelzaher, T. (2003) "SPEED: a real-time routing protocol for sensor networks," in IEEE Proc. of ICDCS, Providence, RI, USA, pp. 46-55.
- Hu, W., Jha, S. and Bulusu, N., (2004) "A communication paradigm for hybrid sensor/actuator networks," in Proc. Of the 15th IEEE Int. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Bachelona, Spain.
- Lu, C., Blum, B. M., Abdelzaher, T. F., Stankovic, J. A. and He, T. (2002) "RAP: a real-time communication architecture for large-scale wireless sensor networks," in IEEE proc of RTAS, San Jose, CA, USA.
- Mhatre, V. P., Rosenberg, C., Kofman, D., Mazumdar, R., Shroff, N. (2005) "A minimum cost heterogeneous sensor network with a lifetime constraint," IEEE Transaction on Mobile Computing, vol. 4, no. 1.
- Sohrabi, K., Gao, J., Ailawadhi, V., Pottie, G.J., (2000) "Protocols for self-organization of a wireless sensor network," IEEE Personal Communications, Vol. 7, No. 5, pp. 16-27.
- Xiaoxia H., Yuguang F. , "End-to-end delay differentiation by prioritized multipath routing in wireless sensor networks", Military Communications Conference, 2005. MILCOM 2005. IEEE Vol. 2 , Issue , 17-20 Oct. 2005 Page(s): 1277 - 1283.
- Yarvis, M., Kushalnagar, N., Singh, H., Rangarajan, A., Liu, Y. and Singh, S. (2005) "Exploiting Heterogeneity in Sensor Networks," in Proc. of IEEE Infocom 2005, Miami, FL, USA.
- Wang, Y. Liu, X., Yin J. (2006) "Requirements of Quality of Service in Wireless Sensor Network", Networking, International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies.