

Proposta de protocolo de roteamento de dados e camada de supervisão adaptativos em rede de sensores com nós móveis

I. M. Santos e C. E. Cugnasca

Resumo— Rede de Sensores Sem Fio é um tipo especial de rede *ad hoc*, formada por vários sensores capazes de coletar e processar informações do ambiente em que estão distribuídos. Essa tecnologia tem sido empregada em diversos tipos de problemas, inclusive no monitoramento em agricultura de precisão. Este trabalho apresenta um protocolo de roteamento de dados para o contexto da aplicação de pulverização agrícola, considerando a comunicação entre a rede de sensores e um nó móvel embarcado no veículo pulverizador. Desenvolver protocolos de roteamento para contextos específicos é importante pois visa a otimização do funcionamento da rede de sensores e a eficiência da aplicação. O protocolo proposto compreende duas etapas: uma de construção da topologia inicial e outra de sua manutenção. A tecnologia adaptativa atua na fase de manutenção da topologia da rede de sensores, buscando decidir pelas ações mais adequadas e evitando o consumo excessivo de energia dos nós sensores. Além disso foi incorporada uma camada supervisora adaptativa que monitora diferentes aspectos do protocolo de roteamento, podendo emitir alertas ao usuário ou mesmo atuar sobre o protocolo de roteamento de modo a otimizá-lo. O trabalho apresenta a especificação do protocolo de roteamento, sua Tabela de Decisão Adaptativa e a arquitetura do sistema, considerando a camada supervisora adaptativa.

Palavras-chave— redes de sensores sem fio, protocolo de roteamento, nós móveis, pulverização agrícola, tecnologia adaptativa, supervisão.

I. INTRODUÇÃO

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são um dos primeiros exemplos de computação pervasiva, esse tipo de rede é uma tecnologia emergente que tem sido aplicada em diferentes problemas que envolvem monitoramento, automação e controle. Uma RSSF é um tipo especial de rede *ad hoc*, formada por muitos (dezenas, centenas ou até milhares) sensores distribuídos sobre uma área de interesse, com comunicação sem fio e capaz de coletar e processar informações do ambiente nos quais os sensores estão distribuídos [1, 2, 3].

As RSSF têm sido aplicadas em diferentes áreas, como em sistemas de monitoramento ambiental, militar, na agropecuária, no monitoramento médico, em sistemas de suporte pessoal, mobilidade, segurança, controle logístico, processos industriais, sistemas embarcados, entre outros [1, 4,

5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

Uma RSSF típica possui uma infraestrutura limitada e o monitoramento do ambiente é baseado no esforço colaborativo entre os nós que compõem a rede de sensores. Suas características e propriedades específicas as diferem das redes de computadores tradicionais, principalmente quanto aos recursos disponíveis [12]. As principais limitações das RSSF estão relacionadas com a fonte de energia, processamento, alcance de comunicação, banda de transferência de dados e armazenamento de dados.

O uso racional e otimizado desses recursos é fundamental, especialmente da fonte de energia, pois determina o tempo de vida útil (funcionamento) do sistema. Na rede de sensores, cada nó é autônomo e responsável por utilizar de maneira eficiente seus recursos.

Nesse sentido, o protocolo de roteamento de dados em uma RSSF determina o comportamento (processamento, envio e recebimento de mensagens) dos nós que compõem a rede e conseqüentemente o gasto energético. O desenvolvimento de protocolos de roteamento para RSSF deve ter como objetivo viabilizar sistemas capazes de gerenciar a comunicação entre os sensores de uma rede e propagar os dados para o usuário. [7] afirmam que o protocolo de roteamento deve encontrar meios de gerenciar com eficiência os recursos disponíveis, visando prolongar o tempo de atividade da RSSF, garantindo os aspectos da tolerância a falhas, escalabilidade e segurança.

Em razão da autonomia dos sensores, do dinamismo da topologia nas RSSF e do vasto conjunto de aplicações com diferentes contextos e objetivos, não há um conjunto de protocolos de roteamento e algoritmos computacionais amplamente eficientes para qualquer contexto de aplicação das redes de sensores. Dessa forma, é necessário escolher ou desenvolver protocolos de roteamento eficientes para contextos específicos, com base nos objetivos de roteamento e na demanda da aplicação.

Além das restrições inerentes aos sensores que compõem a rede, existem numerosos desafios de projeto e comunicação em RSSF que têm influência sobre os protocolos de roteamento, pois degradam seu desempenho. Dessa forma, além da natureza da aplicação, alguns aspectos devem ser levados em conta no desenvolvimento de um protocolo de roteamento, sendo eles: distribuição dos nós; meio de comunicação; conectividade; cobertura; tolerância a falhas; escalabilidade; e agregação de dados. [13] discute em seu

I. M. Santos, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, São Paulo, Brasil, ivairton@usp.br

C. E. Cugnasca, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, São Paulo, Brasil, carlos.cugnasca@poli.usp.br

trabalho diferentes estratégias que podem ser adotadas para definir um protocolo de roteamento. Por exemplo, podem-se priorizar rotas que utilizam sensores com maior disponibilidade de energia, ou aquelas rotas com menor tráfego de dados, ou simplesmente definir uma rota que passe pelo menor número de sensores.

Decidir sobre a melhor estratégia a ser adotada depende diretamente do contexto da aplicação no qual a rede de sensores será utilizada. Este trabalho usa como contexto de referência o monitoramento agrícola, que consiste em observar continuamente uma área de plantio, com o objetivo de avaliar as mudanças ocorridas nesse ambiente, especialmente as condições climáticas (temperatura, umidade, etc.).

Um dos desafios na produção agrícola é a aplicação eficiente de pesticidas com baixo custo e sem contaminar o meio ambiente e pessoas [14, 15]. O principal efeito a ser evitado durante a aplicação de pesticidas é a deriva [16]. Deriva é o deslocamento horizontal que sofrem as gotas desde o seu ponto de lançamento até atingirem o solo ou as plantas. Para minimizá-la é preciso configurar corretamente o equipamento de pulverização (escolha dos bicos de pulverização, pressão e mistura dos produtos) e conhecer as condições ambientais no momento da aplicação, especialmente do vento, temperatura e umidade [16, 17, 18]. As RSSF podem ser empregadas como suporte no processo de pulverização agrícola, monitorando as condições ambientais no momento da aplicação do pesticida [19, 20, 21].

Este trabalho apresenta um protocolo de roteamento de dados em RSSF, com base no contexto do problema da pulverização agrícola, utilizando de tecnologia adaptativa para a manutenção das rotas no roteamento de dados. Além disso é proposta uma camada supervisora adaptativa que monitora diferentes aspectos do protocolo de roteamento e atua com o objetivo de melhorar o desempenho do protocolo.

O trabalho está organizado de modo que a Seção II apresenta uma contextualização do monitoramento agrícola e como as RSSF podem ser empregadas, com foco no processo de pulverização agrícola. A Seção III apresenta e discute o protocolo de roteamento de dados, descrevendo como a tecnologia adaptativa é empregada, tanto no protocolo de roteamento quanto na camada de supervisão. Finalmente na Seção IV são apresentadas as considerações finais.

II. DEFINIÇÃO DO CONTEXTO DE UTILIZAÇÃO DA RSSF

A agricultura de precisão consiste em dividir o terreno da área cultivada em parcelas e tratá-lo de modo diferenciado (específico), buscando atender as necessidades de cada área. Dessa forma, espera-se o aumento da produção, menor custo e menor impacto ao meio ambiente [22]. O uso das RSSF na agricultura de precisão possibilita um melhor monitoramento da cultura e das propriedades do ambiente de cultivo [23].

O processo de pulverização agrícola traz alguns desafios dentre os quais se destaca o efeito deriva, especialmente quando a aplicação é realizada por aeronaves.

Os fatores que interferem na formação e intensidade da deriva são o tamanho (diâmetro) e peso das gotas, o vento, a temperatura, a umidade relativa do ar e a altura de lançamento.

O principal aspecto de controle da deriva é o tamanho das gotas, determinado por meio dos ajustes nos bicos pulverizadores instalados no equipamento de pulverização. Outro fator importante no controle da deriva, foco deste trabalho, é a velocidade e direção do vento. Como nenhuma gota consegue se mover contra o vento, o planejamento da aplicação, que leva em conta a direção do vento, é vital para o controle da deriva. Pulverizar com o vento na direção favorável pode garantir a segurança de áreas sensíveis, como culturas vizinhas, pastos, cursos d'água, vilas, cidades, entre outros.

Considerando a capacidade das redes de sensores e os fatores que interferem diretamente no controle da deriva no processo de pulverização agrícola, as RSSF se mostram como uma tecnologia candidata a dar suporte no processo de pulverização. Nesse contexto, considera-se que os nós sensores da rede estarão distribuídos sobre a área a ser pulverizada, monitorando informações como temperatura, umidade e condições do vento (direção e velocidade). O veículo pulverizador (trator, avião, ou até um veículo aéreo não tripulado) atua como nó móvel coletor de informações (sorvedouro).

As informações das condições ambientais coletadas pela RSSF serão utilizadas pelo veículo pulverizador, determinando correções na sua rota. Dessa forma espera-se que ao considerar as variações nas condições ambientais (especialmente do vento) e ajustando a rota do veículo pulverizador durante a aplicação do defensivo agrícola, de modo a atingir adequadamente a área alvo, obtenha-se uma aplicação mais eficiente, com o controle adequado da praga ou doença, sem desperdício de produto e com menor contaminação do ambiente.

Um dos principais desafios nesse processo de integração entre a rede de sensores e o nó coletor embarcado no veículo pulverizador é a definição e manutenção do roteamento de dados, de modo a garantir que os sensores que compõem a rede possam entregar corretamente os dados registrados por eles ao nó coletor móvel.

O desenvolvimento de protocolos de roteamento para RSSF deve ter como objetivo viabilizar sistemas capazes de gerenciar a comunicação entre os sensores de uma rede e propagar os dados para o sensor coletor. A seção seguinte descreve o protocolo de roteamento proposto e como a tecnologia adaptativa é utilizada.

III. DESCRIÇÃO DO PROTOCOLO DE ROTEAMENTO DE DADOS E DO MODELO ADAPTATIVO

O protocolo de roteamento de dados em uma RSSF é responsável por estruturar logicamente toda comunicação, seja ela entre os sensores, ou entre os sensores e o usuário.

O protocolo de roteamento proposto considera que a rota a ser percorrida pelo veículo pulverizador será definida previamente, antes do início do seu movimento. Essa informação será enviada para a RSSF que irá utilizá-la no processo de determinação do roteamento dos dados. A Fig. 1 ilustra essa representação inicial da rota do nó coletor móvel na RSSF. Os nós sensores são representados pelos círculos, o nó coletor móvel pelo triângulo e sua trajetória pela linha pontilhada. A rota é determinada por meio das coordenadas

dos pontos de partida e chegada do nó móvel, respectivamente os pontos A e B.

O nó coletor móvel (veículo pulverizador) pode atuar junto à rede de sensores por meio de duas perspectivas distintas: a primeira seria uma ação passiva, na qual o nó coletor estaria em um estado constante de recebimento dos dados, recebendo informações enviadas proativamente pela rede de sensores; a segunda é uma ação ativa, na qual o nó coletor móvel executa uma consulta à RSSF e então aguarda o processamento e o retorno da resposta da rede de sensores. Este trabalho adota o segundo contexto, no qual a RSSF aguarda a passagem e consulta do nó coletor móvel para então executar a respectiva consulta e entregar os dados solicitados.

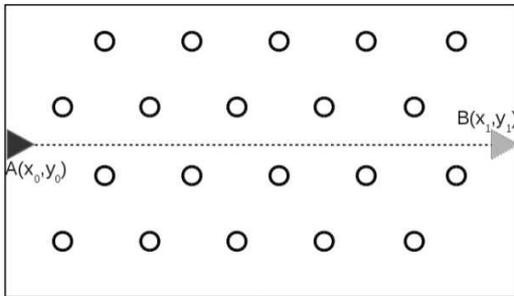


Figura 1. Representação da rota do nó sensor coletor móvel junto à rede de sensores.

Assumindo esses princípios, o protocolo de roteamento possui duas fases distintas, sendo elas a construção inicial da tabela de roteamento dos dados e a manutenção da topologia da rede.

A. Construção da tabela de roteamento

Após a alocação dos sensores na área a ser monitorada, a primeira tarefa a ser executada para o seu funcionamento é a construção da tabela de roteamento, que segue um algoritmo (estático) composto por três passos: representação da rota do nó coletor móvel; seleção dos nós cabeça de *cluster*; e definição da árvore de roteamento inicial.

Representação da rota do nó coletor móvel: a rota do nó coletor será representada por meio da especificação das coordenadas dos pontos de entrada e saída do nó na área a ser percorrida (conforme ilustrado na Fig. 1). Com esses pontos é possível utilizar a equação fundamental da reta ($y_A - y_B = m \cdot (x_A - x_B)$) e geral (determinante via regra de Sarrus), para representação da rota do nó móvel e posteriormente estabelecer a relação de distância entre a rota e a posição dos nós sensores (que têm suas coordenadas conhecidas por meio de GPS).

Seleção dos nós cabeça de *cluster*: o protocolo de roteamento fará uso de *clusters*, que são aglomerados de sensores que se organizam localmente, elegendo um nó de referência denominado cabeça de *cluster* (CH). Essa estratégia busca reduzir o número de mensagens transitando na rede, aumentando a escalabilidade e hierarquizar a organização dos nós, conseqüentemente reduzindo o consumo de energia. A seleção dos nós CH levará em consideração a carga de energia disponível dos sensores (priorizar aqueles com mais energia) e sua posição em relação à rota do nó coletor móvel. Nessa

etapa pode ser utilizada a equação da distância entre um ponto e a reta ($d = |ax_i + by_i + c| / \sqrt{a^2 + b^2}$), priorizando aqueles mais próximos de onde o nó coletor irá passar. Apesar de um parâmetro inicial, o número dos nós CH deve ser definido dinamicamente durante a execução do algoritmo de manutenção da topologia da rede. Inicialmente é sugerido que esse número fique em 5% do número total de nós da rede. Esse processo será monitorado pela camada supervisora adaptativa.

Definição da árvore de roteamento: a definição da árvore de roteamento inicial pode se basear em diferentes algoritmos. Será aqui considerado o algoritmo *Earliest First Tree* [24], com uma estrutura adicional que contém a lista dos possíveis nós “pais” para cada nó da rede. O algoritmo consiste nas seguintes etapas: cada CH envia uma mensagem do tipo “inicialização” no modo *broadcast*. A árvore de roteamento é construída com base na propagação e no tempo de envio desta mensagem. Cada nó da rede, ao receber a primeira mensagem de inicialização, determina o remetente como seu nó “pai” e reencaminha essa mensagem no modo *broadcast*. Ao receber outras mensagens do tipo “inicialização” oriundas de outros nós, o nó constrói sua lista de possíveis nós “pais”, determinando a prioridade de acordo com a ordem de chegada das mensagens.

A Fig. 2 ilustra a definição da árvore de roteamento com foco em um nó da rede. No primeiro momento (à esquerda) o nó em destaque com a cor negra recebe três mensagens de inicialização em diferentes tempos (t_1, t_2 e t_3). Em um segundo momento (à direita), dado que $t_1 < t_2 < t_3$, o nó passa a ter como seu nó “pai” o nó A, construindo sua lista de possíveis nós “pais” com os nós {B, C} nessa ordem de prioridade.

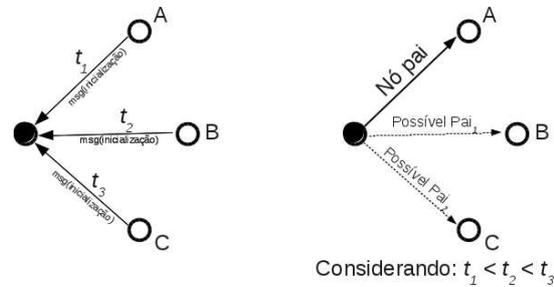


Figura 2. Estratégia de definição da topologia inicial baseada no algoritmo *Earliest First Tree*, no qual o nó pai de um determinado nó é aquele que primeiro envia a mensagem de inicialização, mais a construção de uma lista de possíveis nós “pais”.

A Fig. 3 ilustra um exemplo de uma tabela de roteamento inicial, com a representação da rota do nó coletor móvel, os nós CH (em destaque com cor negra) e as rotas entre os nós sensores e os nós CH.

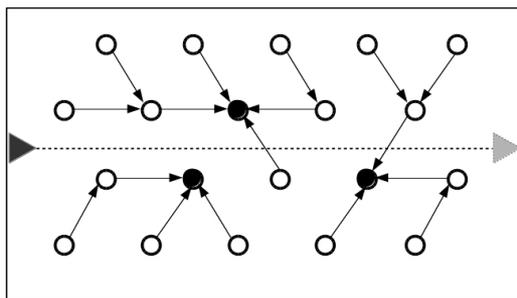


Figura 3. Exemplo de configuração inicial da topologia da rede de sensores após execução do algoritmo de inicialização.

B. Manutenção da topologia da rede

Na etapa de manutenção da topologia da rede será empregada a tecnologia adaptativa como mecanismo de decisão entre quais ações devem ser executadas, de acordo com as ocorrências identificadas pela rede de sensores. Essas ocorrências podem ser, por exemplo, falha, inclusão e baixo nível de energia nos nós sensores, entre outras. Este modelo é baseado no trabalho de [25].

Na manutenção da topologia da RSSF poderão ser adotadas três ações distintas, sendo elas:

Ação A1 – Reconstrução global da topologia. Neste caso o processo segue estritamente o mesmo algoritmo de inicialização da RSSF (conforme apresentado anteriormente).

Ação A2 – Reconstrução da topologia do *cluster*. Nesta ação o processo de ajuste da topologia fica limitado aos nós que compõem um *cluster*.

Ação A3 – Reconstrução local. Somente o nó especificado redefine seu nó “pai”.

Para subsidiar o processo de decisão entre quais ações devem ser executadas, é apresentada uma Tabela de Decisão Adaptativa (TDA) que irá correlacionar diferentes critérios por meio de uma regra.

Inicialmente são sugeridos seis critérios; entretanto é possível que novos critérios sejam adicionados à TDA caso necessário. Todos os critérios empregados na TDA assumem valores dicotômicos “Sim” ou “Não”. Os critérios propostos são:

Critério C1 – Nó CH: identifica se o nó é CH.

Critério C2 – Nó roteador: identifica se o nó é um nó intermediário na árvore de roteamento.

Critério C3 – Falha de um nó: contexto que identifica se algum nó da rede está apresentando falha.

Critério C4 – Inserção de novo nó: contexto que representa que um novo nó foi adicionado na RSSF.

Critério C5 – Exclusão por desligamento: contexto que identifica que um nó foi removido da rede.

Critério C6 – Nó com baixa energia: identifica que um nó está com seu nível de energia em estado crítico (baixa disponibilidade), com desligamento iminente.

Dado o conjunto de possíveis ações {A1, A2, A3} a serem executadas e o conjunto inicial de critérios a serem avaliados {C1, C2, C3, C4, C5, C6}, propõe-se uma configuração inicial de regras que irão compor a TDA.

A Tabela I demonstra um exemplo inicial para a TDA, com possibilidade de ter seu número de regras ampliado por meio

das funções adaptativas. Essa TDA descreve três regras iniciais. Como exemplo, na primeira regra (R1), os critérios C1 e C3 possuem valor “Sim”, enquanto que os demais possuem valor “Não”. A regra determina que nesse contexto (do nó ser um CH (C1) e estar com falha (C3)) deverá ser executada a ação A1 (reconstrução global da topologia).

TABELA I
Exemplo de configuração inicial da TDA.

	R1	R2	R3	...
C1	S	N	N	...
C2	N	S	N	...
C3	S	S	N	...
C4	N	N	S	...
C5	N	N	N	...
C6	N	N	S	...
A1	X			...
A2		X		...
A3			X	...

É importante notar que caso ocorra um contexto que combine diferentes valores para os critérios sem uma regra correspondente, uma ação adaptativa será executada criando uma nova regra que irá compor a TDA.

O Algoritmo I descreve a lógica de manutenção da topologia da RSSF. Ele é executado por todos os nós da rede e implementa a camada de roteamento adaptativa.

ALGORITMO I

Algoritmo para manutenção da topologia da rede de sensores

- 01- Nós CH enviam mensagem “início” para a RSSF
- 02- se nó é CH então
- 03- aguarda mensagem de “controle”
- 04- se mensagem é do tipo “alerta” então
- 05- */** verifica decisão por meio da TDA **/*
- 06- se critérios existem em uma regra R_i então
- 07- executa regra R_i
- 08- se não, se critérios existem, mas regra R_i não existe então
- 09- adiciona regra na TDA por meio de função adaptativa
- 10- propaga nova regra para os outros nós CH
- 11- se não, se critério não existe então
- 12- adiciona critério na TDA por meio de função adaptativa
- 13- propaga novo critério para os outros nós CH
- 14- se nó não é CH então
- 15- se evento ocorreu então
- 16- envia mensagem de “alerta” correspondente

Para subsidiar a função adaptativa pode-se aplicar pesos aos critérios. Critérios considerados críticos, que demandam uma reconstrução global da topologia da rede de sensores, recebem pesos maiores, enquanto que critérios menos críticos recebem pesos menores.

Na definição de uma nova regra para a TDA deve-se estabelecer uma relação entre a soma dos pesos dos critérios com resposta “Sim” e a soma dos pesos de todos os critérios estabelecidos. O resultado desta relação irá determinar qual ação será executada, sendo que um valor alto corresponde à ação de reconstrução global da topologia. Um valor baixo corresponde à ação de menor impacto (reconstrução local) e

resultados intermediários correspondem respectivamente às ações intermediárias.

C. Camada supervisora adaptativa

A tecnologia adaptativa pode ser empregada em diferentes níveis de abstrações. Uma possibilidade é especificar uma camada supervisora, que monitore diferentes aspectos do protocolo de roteamento, diagnosticando e atuando em diferentes contextos.

A Fig. 4 ilustra a arquitetura com a camada supervisora adaptativa. No nível mais baixo estão os nós sensores que compõem a RSSF. Acima deles está o protocolo de roteamento e atuando sobre o protocolo de roteamento tem-se a camada supervisora, que inclui diferentes funções, cada uma monitorando e/ou interferindo sobre um aspecto específico do protocolo.



Figura 4. Arquitetura do sistema com o protocolo de roteamento, a camada supervisora adaptativa e suas funções de supervisão.

O número de funções de supervisão é dinâmico, podendo ser especificadas novas funções à medida que seja necessário. Inicialmente pode-se definir um conjunto de funções para: avaliação dos pesos associados aos critérios (redefinindo o valor do peso); verificação da aplicação das ações (identificar se alguma ação está sendo executada excessivamente); verificação de regiões dominantes (por exemplo, se há áreas que apresentam maior gasto de energia); ajuste na seleção dos nós CH; definição da quantidade ideal de nós CH; ajuste na redefinição das coordenadas da rota do nó coletor móvel; e avaliação da eficiência do protocolo de roteamento, sugerindo por exemplo a inclusão de um novo critério a ser considerado na TDA.

Para implementar a camada supervisora adaptativa deve-se selecionar alguns nós da rede de sensores para atuarem como supervisores. Esses nós irão executar as funções de supervisão. Um nó não deve executar necessariamente todas as funções de supervisão definidas, é desejável que as funções estejam distribuídas nos nós disponíveis.

Os nós sensores que estiverem atuando na camada de supervisão terão autonomia de enviar informações de diagnóstico ao usuário do sistema ou mesmo atuar sobre o protocolo de roteamento, com o objetivo de otimizá-lo.

IV. CONCLUSÕES

As RSSF têm apresentado potencial de aplicação em diversas áreas. Um dos seus principais desafios é a economia de energia, sem que isso signifique perda de eficiência na utilização da rede de sensores. Desenvolver protocolos de roteamento eficientes, que promovam a economia de energia, garantam a entrega dos dados, sejam robustos e adequados ao

contexto da aplicação, tem sido um desafio na área de pesquisa em RSSF.

Este trabalho apresentou um protocolo de roteamento de dados em RSSF com foco no problema de pulverização em agricultura de precisão. O protocolo de roteamento possui duas fases distintas, a de construção da topologia de rede inicial e a fase de manutenção. A tecnologia adaptativa foi utilizada na fase de manutenção de modo a proporcionar decisões adequadas entre quais ações devem ser executadas pelo protocolo de roteamento para manutenção da topologia da rede de sensores. Foi apresentada a modelagem, a TDA e o algoritmo que implementam a camada adaptativa.

Foi proposto também uma camada supervisora adaptativa que tem a função de monitorar o comportamento do protocolo de roteamento. A camada supervisora adaptativa é composta por diferentes funções de supervisão, cada uma com um foco em específico. Essas funções podem emitir alertas para o usuário ou mesmo atuar sobre o protocolo de roteamento com o objetivo de otimizar seu funcionamento.

Nos trabalhos futuros, a eficiência e robustez do protocolo de roteamento de dados devem ser exploradas, verificadas e mensuradas em um ambiente de simulação computacional. A camada supervisora adaptativa deve ter seus detalhes técnicos para seu funcionamento definidos, bem como suas funções de supervisão. Além de ser verificada sua aplicação e eficiência por meio de simulação computacional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso – FAPEMAT – pelo apoio a este trabalho via projeto de pesquisa e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.

REFERÊNCIAS

- [1] I. F. AKYILDIZ, W. SU, Y. SANKARASUBRAMANIAM, E. CAYIRCI. Wireless sensor networks: a survey, *Computer networks*. 38, p.393-422, 2002.
- [2] M. TUBAISHAT, S. MADRIA. Sensor networks: an overview. *IEEE Potentials*. 22 (2), 2003.
- [3] P. GAJBHIYE, A. MAHAJAN. A survey of architecture and node deployment in Wireless Sensor Network. In: *Applications of Digital Information and Web Technologies*, ICADIWT, p.426-430, 2008.
- [4] D. ESTRIN, L. GIROD, G. POTTIE, M. SRIVASTAVA. Instrumenting the world with wireless sensor networks. In: *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Salt Lake City, USA, 2001.
- [5] G. J. POTTIE, W. J. KAISER. Wireless integrated network sensors. *Communications of the ACM* 43, p.51-58, 2000.
- [6] D. ESTRIN, R. GOVINDAN, J. HEIDEMANN, S. KUMAR. Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks. In: *Proceedings of the Fifth Annual International Conference on Mobile Computing and Networks (MobiCom'99)*, Seattle, Washington, USA, ACM Press, 1999.
- [7] J. YICK, B. MUKHERJEE, D. GHOSAL. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, v. 52, n. 12, p. 2292-2330, 2008.
- [8] K. SOHRABY, D. MINOLI, T. ZNATI. *Wireless Sensor Networks – Technology, Protocols, and Applications*. Wiley, 2007.
- [9] F. ZHAO, L. GUIBAS, *Wireless Sensor Networks – An information processing approach*. Elsevier, 2004.
- [10] P. SIKKA, *Wireless ad hoc sensor and actuator networks on the farm*. Nashville-USA: ACM. 2006. p. 492-499.

- [11] I. M. SANTOS, M. A. DOTA, C. E. CUGNASCA. Visão Geral da Aplicabilidade de Redes de Sensores Sem Fio no Monitoramento Agrícola no estado de Mato Grosso. Anais do *Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão* – ConBAP 2010. Ribeirão Preto/SP, Setembro de 2010.
- [12] T. CAMP, J. BOLENG, V. DAVIES. A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research. *Wireless Communications and Mobile Computing (WCMC)*, v. 2, p. 483-502, 2002.
- [13] BOUKERCHE, A. *Algorithms and protocols for wireless sensor networks*. Ed. Wiley, 2008.
- [14] How dangerous is pesticide drift? *Scientific American*. At <<http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=pesticide-drift>>, 17 de setembro de 2012.
- [15] PIGNATI, W. A., MACHADO, J. M. H., CABRAL, J. F. Acidente rural ampliado: o caso das ‘chuvas’ de agrotóxicos sobre a cidade de Lucas do Rio Verde-MT. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 12, p. 105-114, 2007.
- [16] CHAIM, A. *Manual de Tecnologia de Aplicação de Agrotóxico*. Embrapa, 2009.
- [17] CUNHA, J. P. A. R., TEIXEIRA, M. M., COURY, J. R., FERREIRA, L. R. Avaliação de estratégias para redução da deriva de agrotóxicos em pulverizações hidráulicas. *Planta Daninha*. 21: p. 325–332, 2003.
- [18] HEWITT, A. J. Spray drift: impact of requirements to protect the environment. *Crop Protection*. 19: p. 623–627, 2000.
- [19] KWONG, K. H., SASLOGLOU, K., GOH, H. G., WU, T. T., STEPHEN, B., GILROY, M., TACHTATZIS, C., GLOVER, I. A., MICHIE, C., ANDONOVIC, I. Adaptation of wireless sensor network for farming industries. *6th INSS*. p. 1–4. Pittsburgh, 2009.
- [20] QIAO, X., ZHANG, X., WANG, C., REN, D., HE, X. Application of the wireless sensor networks in agriculture. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 21: p. 232–234, 2005.
- [21] SANTOS, I. M., CUGNASCA, C. E. Pesticide drift control with wireless sensor network. In: *11th International Conference on Precision Agriculture*, Indianapolis. 2012.
- [22] J. P. MOLIN, Tendências da agricultura de precisão no Brasil. In: *Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 2004*. Anais do Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão - ConBAP 2004. Piracicaba, p. 1-10, 2004.
- [23] I. M. SANTOS, M. A. DOTA, C. E. CUGNASCA. Modelagem de Autômato Adaptativo para a definição dinâmica do intervalo de amostragem em Rede de Sensores Sem Fio. In: *V Workshop de Tecnologia Adaptativa*, 2011, São Paulo. 2011.
- [24] SOHRABI, K., GAO, J., AILAWADHI, V., POTTIE, G. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE Personal Communications*, 7(5):16–27, 2000.
- [25] GONDA, L., CUGNASCA, C. E., NETO, J. J. Uso de tabelas de decisão adaptativas em redes de sensores sem fio. In: *Workshop de Tecnologia Adaptativa*, 4, São Paulo-SP, 2010.

Sistemas Digitais da EPUSP. Tem experiência na área de Supervisão e Controle de Processos e Instrumentação, aplicadas a processos agrícolas e Agricultura de Precisão, atuando principalmente nos seguintes temas: instrumentação inteligente, sistemas embarcados em máquinas agrícolas, monitoração e controle de ambientes protegidos, redes de controle baseados nos padrões CAN, ISO11783 e LonWorks, Redes de Sensores Sem Fio e computação pervasiva. É editor da Revista Brasileira de Agroinformática (RBIAgro).



Ivairton Monteiro Santos é graduado em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Mato Grosso (2002) e mestre em Ciência da Computação pela Universidade Federal Fluminense (2005). Atualmente é aluno de doutorado da Escola Politécnica da USP, sob a orientação do Prof. Dr. Carlos Eduardo Cugnasca. É membro do Laboratório de Automação Agrícola da Escola Politécnica da USP e professor da Universidade Federal de Mato Grosso, no Campus Universitário do Araguaia. Tem experiência na área de Ciência da Computação e seus interesses em pesquisa concentram-se em Redes de Sensores Sem Fio e otimização combinatória.



Carlos Eduardo Cugnasca é graduado em Engenharia de Eletricidade (1980), mestre em Engenharia Elétrica (1988) e doutor em Engenharia Elétrica (1993). É livre-docente (2002) pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Atualmente, é professor associado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e pesquisador do LAA - Laboratório de Automação Agrícola do PCS - Departamento de Engenharia de Computação e