

Otimização por Colônia de Formigas com Informação Heurística Nebulosa Aplicada a Redes de Sensores sem Fio

Marcelo Portela Sousa, Waslon Terllizzie Araújo Lopes e Marcelo Sampaio de Alencar

Resumo— Neste artigo, os autores propõem um novo esquema de agrupamento para redes de sensores sem fio, inspirado no comportamento organizado de colônias de formigas. O objetivo é otimizar a eleição de coordenadores de grupo em redes sujeitas a erros de estimação de distância entre os nós sensores. A informação heurística nebulosa é projetada para lidar com a imprecisão dessas estimativas. O protocolo proposto é avaliado por meio de simulações que comparam seu desempenho com um protocolo de agrupamento clássico. As métricas avaliadas são o tempo de vida da rede e a taxa de perda de pacote. Os resultados demonstram a superioridade de desempenho do protocolo proposto.

Palavras-Chave— Agrupamento; Redes de sensores sem fio; Erros de estimação; Informação heurística nebulosa.

Abstract— In this paper, the authors propose a novel clustering scheme for wireless sensor networks, inspired in the organized behaviour of ant colonies. The main goal is optimize the election of cluster-heads in networks subjected to estimation errors of distance between the sensor nodes. The fuzzy heuristic information is designed to deal with the imprecision of such estimations. The proposed protocol is evaluated by simulations that compare its performance with a classical clustering protocol. The evaluated metrics are the network lifetime and the packet loss rate. The results demonstrate the performance superiority of the proposed protocol.

Keywords— Clustering; Wireless sensor networks; Estimation errors; Fuzzy heuristic information.

I. INTRODUÇÃO

Uma Rede de Sensores sem Fio (RSSF) é composta de elementos de sensoriamento, processamento computacional e de comunicações, que viabilizam ao administrador, funcionalidades como instrumentação, monitoramento e reação a eventos e fenômenos em um ambiente específico. O administrador é tipicamente uma entidade civil, governamental, comercial, militar ou industrial. O ambiente pode conter sistemas físicos, químicos ou biológicos, ou uma estrutura de Tecnologia da Informação (TI). Aplicações típicas incluem coleta de dados, monitoramento, vigilância e telemetria médica [1]. A habilidade de comunicação em RSSFs não apenas permite que sejam transmitidas informações e dados de controle pela rede, mas que os nós sensores cooperem em desempenhar tarefas mais complexas, como amostragem estatística e agregação de dados [2], [3].

Marcelo Portela Sousa, Waslon Terllizzie Araújo Lopes e Marcelo Sampaio de Alencar, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFPB), Instituto de Estudos Avançados em Comunicações (Iecom), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Paraíba, Brasil. E-mails: {marcelo.portela,waslon,malencar}@ieee.org.

Em muitas aplicações, os nós sensores são depositados em áreas remotas, o que não permite facilmente o acesso a esses elementos para manutenção. Nesse cenário, o tempo de vida de um nó sensor depende da quantidade de energia disponível. Aplicações, protocolos, e algoritmos para RSSFs não podem ser escolhidos considerando apenas sua capacidade de sensoriamento, mas definitivamente a quantidade de energia consumida.

Um dos mecanismos utilizados para prolongar o tempo de vida em redes de sensores sem fio é o agrupamento (*clustering*). Em cada grupo, um nó sensor é eleito o coordenador (*cluster-head*), o qual coleta informações sensorizadas dos outros nós dentro do grupo, agrega esses dados e envia os dados processados ao nó destino (*sink node*). Em estratégias de agrupamento, o processo de eleição de um coordenador de grupo é uma questão fundamental e tem impacto significativo no consumo geral de energia da rede. Técnicas baseadas no comportamento organizado de formigas sociais, por meio do uso de Otimização por Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization – ACO*) apresentam um potencial expressivo para o projeto de protocolos de agrupamento em redes de sensores sem fio.

Em algoritmos de ACO, a informação coletada por formigas no processo de busca é armazenada nas trilhas de feromônio, τ . Os arcos também possuem uma informação heurística, η , que representa uma informação disponível *a priori* sobre a definição do problema. Se η representa uma função custo relacionada com medidas de distância, a imprecisão de estimativas podem degradar o desempenho geral do sistema [4].

Além da limitação dos recursos de energia, o desvanecimento causado por múltiplos percursos de propagação pode degradar, significativamente, o desempenho dos sistemas de comunicações em RSSFs [5]. Nesse contexto, o protocolo de Pedido de Repetição Automática (*Automatic Repeat Request – ARQ*) é uma maneira efetiva para combater o desvanecimento do canal, no qual a Verificação da Redundância Cíclica (*Cyclic Redundancy Check – CRC*) é usada para detectar erros e retransmissões são solicitadas se o pacote for recebido de maneira incorreta. Na prática, o número máximo de retransmissões é limitado para minimizar o atraso fim a fim e o tamanho do *buffer*, e essa variante de ARQ é denominada protocolo ARQ truncado [6].

Neste artigo, os autores propõem um novo protocolo de agrupamento, que utiliza a otimização por colônia de formigas e informação heurística nebulosa para eleger os nós sensores mais preparados a assumirem a função de coordenador

de grupo. Além disso, um esquema de ARQ truncado é utilizado para combater os efeitos do desvanecimento do canal de comunicações. O esquema proposto é avaliado, em comparação com um protocolo de agrupamento clássico. As métricas utilizadas nas simulações são o tempo de vida da rede e a taxa de perda de pacote.

O restante do artigo está organizado da seguinte maneira: a Seção II provê uma breve introdução ao funcionamento do protocolo AntNet, um algoritmo de ACO utilizado em problemas de roteamento em redes de comunicações. A Seção III apresenta a operação do protocolo de agrupamento proposto, assim como a modelagem nebulosa para a informação heurística. A Seção IV descreve os parâmetros de simulação e os resultados da avaliação de desempenho. Por fim, a Seção V conclui o artigo e apresenta as perspectivas de continuação da pesquisa.

II. PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO DO ANTNET

No protocolo AntNet, cada formiga busca por um percurso de custo mínimo entre um par de nós, i e d [7]. Se uma formiga κ está no nó i , ela se desloca para j , de acordo com uma regra de decisão, que é função da memória da formiga, \mathcal{M}^κ , e da tabela de roteamento da formiga, \mathcal{A}_i . Essa tabela é obtida pela composição das trilhas de feromônio, τ_{ijd} , e da informação heurística, η_{ijd} . Após a formiga κ completar seu percurso, ela deposita uma quantidade de feromônio, $\Delta\tau^\kappa$, proporcional à qualidade da rota percorrida anteriormente. Para isso, após alcançar o nó destino, a formiga volta ao nó fonte e incrementa a intensidade da trilha de feromônio, de acordo com a Atribuição 1:

$$\tau_{ijd} \leftarrow \tau_{ijd} + \Delta\tau^\kappa. \quad (1)$$

Para prevenir que uma convergência prematura para soluções não-ótimas ocorra, o feromônio das trilhas utilizadas evapora:

$$\tau_{ijd} \leftarrow \frac{\tau_{ijd}}{(1 + \Delta\tau^\kappa)}, \forall j \in \mathcal{N}_i, \quad (2)$$

em que \mathcal{N} é o conjunto de vizinhos ao nó i . A relação entre \mathcal{A}_i , e a regra de decisão da formiga κ , p_{ijd}^κ , é dada por

$$p_{ijd}^\kappa = \begin{cases} \mathcal{A}_i = \frac{\omega\tau_{ijd} + (1-\omega)\eta_{ijd}}{\omega + (1-\omega)(|\mathcal{N}_i| - 1)}, & \text{se } j \notin \mathcal{M}^\kappa, \\ 0, & \text{se } j \in \mathcal{M}^\kappa, \end{cases} \quad (3)$$

em que $\omega \in [0, 1]$ é um fator de ponderação entre τ_{ijd} e η_{ijd} , e o denominador é um termo de normalização. A memória da formiga, \mathcal{M}^κ , indica o conjunto de nós que já foram visitados e seu uso evita a ocorrência de laços no processo de busca.

III. UM NOVO PROTOCOLO DE AGRUPAMENTO

O protocolo de agrupamento proposto funciona com base no comportamento de formigas que precisam encontrar percursos ótimos a partir de uma determinada fonte até um destino final. O objetivo principal é otimizar a eleição de coordenadores de grupo, em cada rodada. Para isso, a modelagem clássica do AntNet é modificada, pois o sistema proposto transforma a

representação de vértices em representação de arestas e vice-versa. Ou seja, cada nó sensor, s (vértice), na rede que utiliza o protocolo proposto pode ser visto como um percurso (aresta), ijd , no sistema AntNet. Portanto, a eleição do nó sensor mais preparado para coordenador de grupo, pelo grupo, equivale à escolha do percurso de custo mínimo, pela formiga.

Inicialmente, formigas artificiais são atribuídas aleatoriamente na região monitorada. Cada grupo recebe uma formiga, κ , que indica o respectivo primeiro coordenador de grupo. Nas próximas eleições, cada nó do grupo processa regras de decisão e gera valores especiais, denotados *chance*.

Para cada nó sensor, a respectiva formiga, κ , se dirige ao destino final e volta ao ninho, incrementando a intensidade de feromônio, τ_s . No domínio da rede de sensores, isso é equivalente a cada nó sensor executar a Atribuição 1. A variável de atualização, $\Delta\tau^\kappa$, deve indicar a qualidade do percurso escolhido pela formiga. Essa é uma medida de desempenho do nó sensor na rodada anterior. No esquema proposto, a variável de atualização é dada por:

$$\Delta\tau^\kappa = \frac{\varepsilon_s \cdot \rho_s}{\zeta_s \cdot \Gamma_s}, \quad (4)$$

em que ε_s é a energia residual do nó sensor, ζ_s é a quantidade de energia consumida pelo nó sensor na última rodada, Γ_s é o número total de transmissões realizadas pelo nó sensor na rodada anterior e $\rho_s = 2$, se os pacotes transmitidos anteriormente foram corretamente recuperados pelo nó destino. Caso contrário, se mesmo com retransmissões os pacotes não foram corretamente recuperados, então $\rho_s = 1$. Esses valores foram obtidos empiricamente.

Após a atualização de feromônio, todos os nós sensores executam a Atribuição 2, que corresponde à evaporação de feromônio. A próxima etapa é o processamento da informação heurística, η_s , dada pela saída um sistema de inferência nebulosa, explicado na próxima seção. Por meio da combinação de τ_s e η_s , o nó sensor calcula o valor da regra de decisão, de acordo com a Fórmula 3. Esse valor indica a probabilidade de um percurso em atrair formigas, e equivalentemente, indica a probabilidade de um nó sensor se tornar um coordenador de grupo.

Os nós atribuem o valor da regra de decisão à variável *chance*. Cada nó anuncia um mensagem para os outros candidatos, com esse valor em anexo e aguarda mensagens anunciadas pelos outros nós. Se seu valor de *chance* é maior que a dos outros nós, o nó sensor anuncia uma mensagem de coordenador de grupo, que significa que o nó sensor se elegeu um coordenador de grupo. Se um nó que não é coordenador de grupo recebe uma mensagem de coordenador de grupo, ele seleciona o coordenador de grupo mais próximo como o seu coordenador e envia uma mensagem para aderir àquele grupo.

A. Informação Heurística Nebulosa

Em algoritmos de ACO, a informação heurística representa uma informação local que não depende da qualidade das iterações anteriores. No Ant System, um algoritmo que otimiza soluções para o problema do caixeiro viajante, $\eta_{ijd} = 1/J_{ij}$,

em que J_{ij} representa a distância entre duas cidades i e j [4]. No algoritmo AntNet, a informação heurística é dada por [7]

$$\eta_{ij} = 1 - \frac{q_{ij}}{\sum_{l \in \mathcal{N}_i} q_{il}}, \quad (5)$$

em que q_{il} representa o comprimento da fila (em *bits* a serem enviados) do enlace que conecta o nó i ao seu vizinho j . O conjunto de vizinhos do nó i é dado por \mathcal{N}_i . No esquema proposto, a informação heurística η_s , representada pela variável *eta*, relaciona duas outras variáveis: *distancia_local* e *dispersao_CHs*.

distancia_local é a soma das distâncias entre o nó candidato e outros nós que estão dentro de um raio de alcance específico de transmissão. Quanto maior a soma, mais energia precisará ser gasta na transmissão dos dados sensorizados ao nó candidato (se for eleito coordenador). Entretanto, para um valor de soma de distâncias pequeno, a energia gasta na fase de agregação de dados do grupo pelo coordenador será menor. Para essa variável, quanto menor o valor, maior a chance do nó candidato se eleger um coordenador de grupo. Essa variável foi proposta no protocolo CHEF [8], mas em sua definição original, se houver poucos nós internos ao raio de alcance específico de transmissão, o valor da soma pode ser pequeno. Isso pode indicar, falsamente, que o consumo de energia dos nós será menor do que para o caso em que os nós (em um número maior) estejam mais próximos do nó candidato. No protocolo proposto, essa soma é normalizada, por meio da divisão do valor de *distancia_local* pelo número de nós sensores internos ao raio de alcance específico de transmissão.

dispersao_CHs é a soma das distâncias entre o nó candidato e os coordenadores de grupo presentes em um raio de alcance específico de transmissão. A relação de proporcionalidade entre a magnitude da variável e a chance de eleição para coordenador é direta. Quanto maior a dispersão de coordenadores de grupo em torno do nó candidato, maior sua chance em liderar o grupo. Além de promover uma boa distribuição de coordenadores, isso contribui para o equilíbrio de carga de transmissão e processamento na rede.

Como a composição de *eta* é dada por duas variáveis que se baseiam em medições incertas e relativas à medições de distância, a lógica nebulosa é bastante apropriada para representar seu cálculo final. A lógica nebulosa (*fuzzy logic*) é uma ferramenta matemática que utiliza variáveis puramente qualitativas, em vez da representação quantitativa dos valores *crisp* [9]. Além das incertezas de medições, pequenas mudanças relativas ao posicionamento dos nós sensores na rede podem ocorrer e isso pode ser compensado na operação do sistema de inferência nebulosa.

Na lógica nebulosa, as decisões são baseados em regras SE-ENTÃO, que são usadas para determinar o valor das variáveis de saída [10]. O sistema de inferência é composto por variáveis linguísticas e operadores lógicos. As regras nebulosas utilizadas no sistema proposto, para produzir o valor da informação heurística, estão listadas na Tabela I. À medida que os valores das variáveis *distancia_local* e *dispersao_CHs* se tornam pequenos (Próxima) e grandes (Distante), respectivamente, a informação heurística nebulosa assume os maiores valores, e portanto, provê as maiores

TABELA I
REGRAS NEBULOSAS UTILIZADAS NO PROTOCOLO PROPOSTO.

Regra	SE		ENTÃO
	<i>distancia_local</i>	<i>dispersao_CHs</i>	<i>eta</i>
1	Próxima	Distante	Muito Alta (MA)
2	Média	Distante	Médio Alta (MdA)
3	Distante	Distante	Pouco Alta (PA)
4	Próxima	Média	Muito Média (MM)
5	Média	Média	Média (M)
6	Distante	Média	Pouco Média (PM)
7	Próxima	Próxima	Pouco Baixa (PB)
8	Média	Próxima	Médio Baixa (MdB)
9	Distante	Próxima	Muito Baixa (MB)

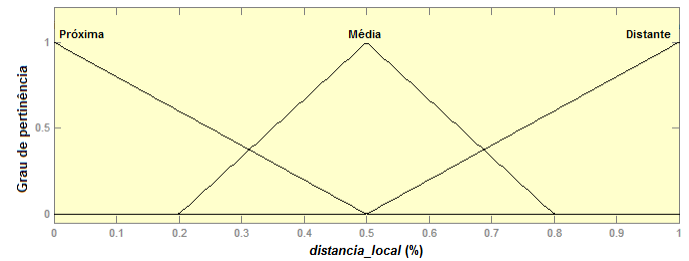


Fig. 1. Funções de pertinência para a variável *distancia_local*.

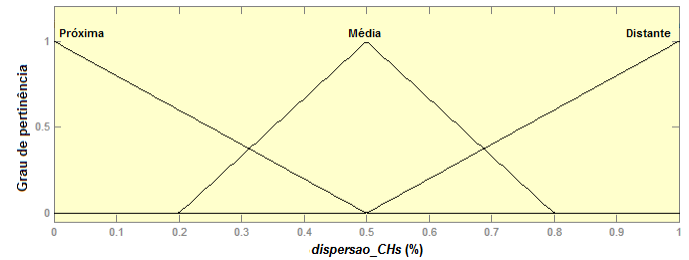


Fig. 2. Funções de pertinência para a variável *dispersao_CHs*.

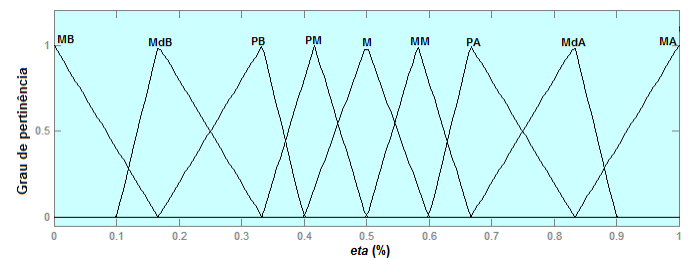


Fig. 3. Funções de pertinência para a variável *eta*.

contribuições para que o nó sensor seja eleito um coordenador de grupo.

As Figuras 1, 2 e 3 representam as funções de pertinência das variáveis *distancia_local*, *dispersao_CHs*, *eta*, respectivamente. A escolha por funções triangulares se justifica pela simplicidade de processamento. O método de *defuzzificação* utilizado é o centróide [10].

IV. PARÂMETROS DE SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Nas simulações, a rede de sensores é composta de 100 nós. Os nós estão localizados aleatoriamente em uma área de 50×50 metros. O nó destino está localizado nas coordenadas $x =$

25 e $y = 150$ metros. Considere que cada nó possui uma energia inicial de 3 mJ. O transceptor consome $\epsilon_{elec} = 50$ nJ/bit para alimentar os circuitos eletrônicos de transmissão e recepção. Para o amplificador de transmissão, há um consumo de $\epsilon_{fs} = 10$ pJ/bit/m², ou $\epsilon_{mp} = 0.0013$ pJ/bit/m⁴, de modo que uma razão sinal-ruído adequada seja alcançada. Um limiar de distância específico, d_0 , é dado por:

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \tag{6}$$

Desse modo, para transmitir uma mensagem de l bits por uma distância d , o nó sensor consome [8]

$$E_{Tx}(l, d) = \begin{cases} l \cdot (\epsilon_{elec} + \epsilon_{fs} \cdot d^2), & \text{se } d \leq d_0 \\ l \cdot (\epsilon_{elec} + \epsilon_{mp} \cdot d^4), & \text{se } d > d_0 \end{cases} \tag{7}$$

e para receber uma mensagem equivalente, o nó sensor consome

$$E_{Rx}(l) = \epsilon_{elec} \cdot l. \tag{8}$$

A rede de sensores considerada está ilustrada na Figura 4. Os cinco coordenadores de grupo estão representados por círculos e agregam as informações sensoriadas por outros nós, nos respectivos grupos. Esse processo de agregação está ilustrado na Figura 5. As figuras mostram que por meio do mecanismo de eleição proposto, os coordenadores de grupo estão bem posicionados, o que contribui para a economia de energia geral.

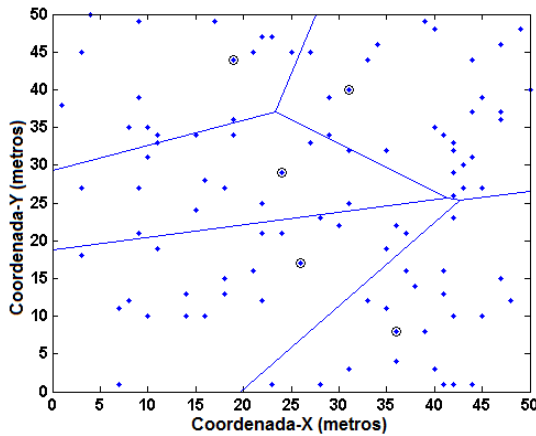


Fig. 4. Cinco coordenadores de grupo (representados em círculos) eleitos pelo protocolo de agrupamento proposto.

A avaliação de desempenho foi obtida pela comparação dos resultados de simulações entre o protocolo proposto e um protocolo clássico de agrupamento, o LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) [11]. Nas simulações, ambos os sistemas utilizam um esquema de ARQ truncado, com um número máximo de retransmissões igual a três e as simulações foram realizadas no Matlab 7.

O protocolo LEACH garante a eleição de todos nós para coordenadores de grupo, em um número específico de rodadas, o que distribui o consumo de energia geral da rede. Entretanto, métricas de desempenho importantes, como energia residual e nível de concentração de nós, não são consideradas no projeto do protocolo [11].

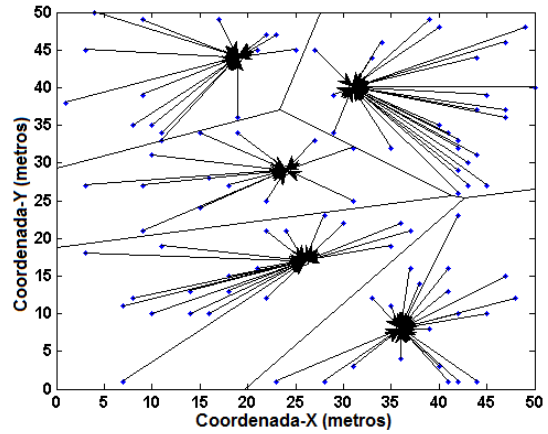


Fig. 5. O processo de agregação, que reduz a quantidade de informação necessária a ser transmitida para o nó destino.

A avaliação referente ao tempo de vida da rede de sensores está ilustrada na Figura 6, em que o número de nós ativos é avaliado em função da quantidade de rodadas. A comparação de desempenho entre os dois sistemas foi obtida utilizando duas condições de propagação diferentes. Conforme o esperado, para a melhor condição de propagação, em que o canal apresenta SNR igual a 25 dB, o tempo de vida da rede é estendido em relação a um canal degradado (SNR igual a 15 dB). Em um canal com SNR igual a 15 dB, o protocolo proposto apresenta 396 rodadas até a inativação completa da rede, enquanto, no protocolo LEACH, a rede utiliza 101 rodadas para a inativação do último nó. Nesse cenário, o protocolo proposto estende o tempo de vida da rede em aproximadamente quatro vezes. Além disso, o esquema proposto supera o LEACH em todos os casos, mesmo quando diferentes SNRs são comparadas.

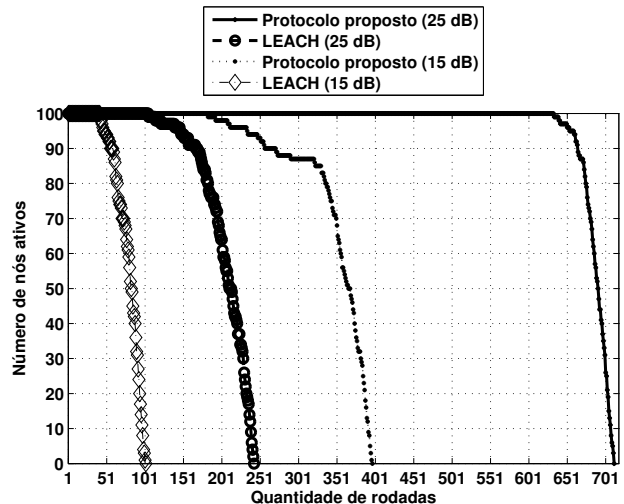


Fig. 6. Avaliação do tempo de vida da rede. O protocolo proposto supera o desempenho de um protocolo clássico de agrupamento.

A Figura 7 apresenta uma comparação entre a avaliação de desempenho relativa ao tempo de vida, em que a informação heurística nebulosa e a informação heurística *crisp* são con-

sideradas. Para o caso *crisp*, a informação heurística foi obtida por meio da média aritmética entre as variáveis *distancia_local* e *dispersao_CHs*. O sistema proposto, que utiliza a informação heurística nebulosa apresenta um desempenho melhor, para todos os cenários de propagação considerados. Esse resultado pode ser explicado pela capacidade dos sistemas de inferência nebulosa em lidar com a incerteza de algumas medidas, especificamente, as estimações de distância realizadas pela intensidade do sinal recebido.

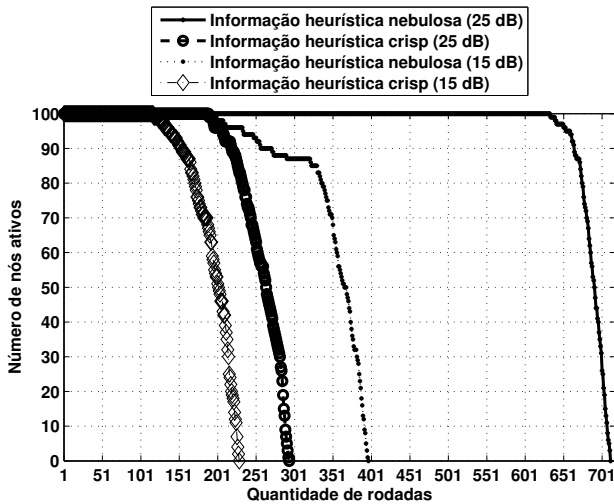


Fig. 7. Comparação entre o desempenho da modelagem pela informação heurística nebulosa e a informação heurística *crisp*.

A taxa de perda de pacote (TPP) da rede é dada por

$$TPP = \frac{\text{Número de pacotes perdidos}}{\text{Número de pacotes gerados}} \quad (9)$$

e está avaliada na Tabela II, como uma função de dois cenários diferentes de propagação. Conforme o esperado a taxa de perda de pacote decresce à medida que a qualidade do canal se torna maior (conforme o aumento da SNR). Para as duas condições de propagação consideradas, o protocolo proposto apresenta um melhor desempenho.

TABELA II

COMPARAÇÃO DA TAXA DE PERDA DE PACOTE ENTRE O LEACH E O PROTOCOLO PROPOSTO.

SNR do canal	Taxa de perda de pacote	
	LEACH	Protocolo proposto
15 dB	0,5798	0,3824
25 dB	0,0813	0,0268

V. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Este artigo propôs um novo protocolo de agrupamento para redes de sensores sem fio, inspirado no comportamento organizado e distribuído de colônias de formigas para otimizar o processo de eleição de coordenadores de grupo. A informação heurística é modelada por meio de um sistema de inferência nebulosa para lidar com as incertezas de medições de distância

entre os nós sensores. Além disso, um esquema de ARQ truncado foi utilizado para combater os efeitos provocados pelo desvanecimento presente nos canais de comunicações da rede de sensores sem fio avaliada. O protocolo proposto teve seu desempenho comparado, por meio de simulações, com o protocolo LEACH. As métricas de avaliação utilizadas foram o tempo de vida da rede e a taxa de perda de pacote.

A otimização do processo de eleição de coordenadores de grupo apresentou um impacto direto no tempo de vida da rede, já que os nós mais preparados são escolhidos para agregar a informação de seu grupo e enviar ao nó destino. Além disso, a atualização do feromônio no processo de eleição, considera informações relativas à qualidade da última transmissão, de modo a tentar eleger nós com maior chance de transmitir corretamente as informações agregadas.

Como continuação da pesquisa, os autores pretendem combinar o projeto do protocolo proposto com a otimização de métodos de agregação de dados, realizada pelo coordenador de grupo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio prestado pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFPB – Picuí), ao Instituto de Estudos Avançados em Comunicações (Iecom), à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- [1] K. Sohraby, D. Minoli, and T. Znati. *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*. John Wiley & Sons, 2007.
- [2] D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, and S. Kumar. Next century challenges: scalable coordination in sensor networks. In *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking (MobiCom '99)*, pages 263–270, New York, NY, USA, 1999.
- [3] Marcelo P. Sousa, Marcelo S. Alencar, Ajey Kumar, and Waslon T. A. Lopes. Low-energy adaptive cooperative diversity applied to wireless sensor networks. *XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações – SBRT 2009*, Blumenau, SC, 2009.
- [4] M. Dorigo and G. Di Caro. Ant colony optimization: a new meta-heuristic. In *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation, CEC 99*, 1999.
- [5] B. Liu, B. Otis, S. Challa, P. Axon, C. Chou, and S. Jha. On the fading and shadowing effects for wireless sensor networks. In *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS'06)*, pages 51–60, Oct. 2006.
- [6] M. P. Sousa, R. F. Lopes, W. T. A. Lopes, and M. S. Alencar. Low-energy selective cooperative diversity with ARQ for wireless image sensor networks. In *IEEE 72nd Vehicular Technology Conference Fall (VTC - Fall)*, pages 1–5, sept. 2010.
- [7] G. Caro and M. Dorigo. AntNet: distributed stigmergetic control for communications networks. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 9:317–365, December 1998.
- [8] J. Kim, S. Park, Y. Han, and T. Chung. CHEF: Cluster Head Election mechanism using Fuzzy logic in Wireless Sensor Networks. In *10th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT'08)*, pages 654–659, 2008.
- [9] Lotfi A. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3):338–353, 1965.
- [10] Lotfi A. Zadeh. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning – I. *Information Sciences*, 8(3):199–249, 1975.
- [11] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2:10 pp., Jan. 2000.