

UMA PROPOSTA PARA CONTROLE DE DENSIDADE EM REDES DE SENSORES SEM FIO UTILIZANDO INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL

DIEGO CARVALHO P. MACEDO¹, HARILTON DA S. ARAÚJO², ALDIR S. SOUSA³.

Centro de Ensino Unificado de Teresina - CEUT
Av. dos Expedicionários, 790 – Bairro São João
Caixa Postal 64.046-700 Teresina, PI

E-mails: diegomacedo_cp@hotmail.com, hariltonaraujo@ceut.com.br, aldirsousa@ceut.com.br,

Abstract — *The wireless sensor networks (WSN) consist of small sensors capable of capturing information phenomena of the environment they are inserted and to transmit this information. The sensor nodes are very limited in their processing power and capacity and energy storage. When it has a fairly large number of nodes in an environment, energy consumption is greater. This paper presents a proposal for density control in wireless sensor networks using computational intelligence. The simulations indicate that the proposal is effective with respect to reduction of energy consumption, increase in the number of messages sent and received, increased the residual energy of the network, increasing the lifetime of the network and reducing the cost of receiving the message.*

Keywords — wireless sensor networks, Routing, sink, cluster head, fuzzy inference system

Resumo — As redes de sensores sem fio (RSSF) são compostas por pequenos sensores capazes de captar informações de fenômenos do meio ambiente em que estão inseridos e de transmitir essas informações. Os nós sensores são bastante limitados em seu poder de processamento e a capacidade de energia e de armazenamento. Quando se possui um número bastante elevado de nós em um ambiente, consumo de energia é maior ainda. Este trabalho apresenta uma proposta para controle de densidade em redes de sensores sem fio utilizando inteligência computacional. As simulações indicam que a proposta é eficiente no que diz respeito a redução do consumo de energia, aumento no número de mensagens enviadas e recebidas, aumento na energia residual da rede, aumento na vida útil da rede e a redução do custo de recebimento da mensagem.

Palavras-chave — *Redes de sensores sem fio, Roteamento, ICA, fuzzy.*

1 Introdução

Uma rede de sensores sem fio (RSSF) pode ser definida como um conjunto de nós sensores que têm a função de captar as ações do meio em que estão inseridos e, por meio de comunicação sem fio, podem transmitir informações para outros nós da rede. Estas redes diferem das redes de computadores tradicionais em diversos aspectos. Geralmente, as RSSF têm um grande número de nós sensores distribuídos, possuem restrições de energia e processamento e devem ter mecanismos para autoconfiguração em caso de perda de comunicação e falhas nos nós sensores (SOBRAL et. Al, 2013).

Um dos principais desafios na área de RSSF é a redução do custo de energia nos nós sensores, uma vez que na maioria dos casos, estes nós estão localizados em locais de difícil acesso, o que torna inviável a substituição periódica das baterias que os alimentam.

Dada a característica de baixa alimentação energética dos nós sensores, algoritmos de roteamento devem visar o consumo mínimo de energia. Neste trabalho, propõe-se uma nova abordagem para lidar com roteamento em RSSF. A abordagem aqui proposta destaca-se pela aplicação de um sistema de inferência *fuzzy* ao algoritmo de roteamento *Inter Cluster Routing Algorithm* (ICA) (HABIB, 2004).

Com objetivo de analisar o real ganho de desempenho da abordagem proposta neste trabalho, levaram-se em consideração algumas métricas que indicam o melhor desempenho da rede. As métricas utilizadas neste trabalho foram: número de mensagens enviadas, mensagens recebidas, energia residual, custo de recebimento de mensagens e o tempo de vida da rede.

Uma forma de melhorar o desempenho de uma RSSF pode ser por meio de um algoritmo de roteamento eficiente. Este trabalho consiste em aperfeiçoar o algoritmo de roteamento ICA para lidar com o roteamento visando melhorar o desempenho da RSSF. Neste trabalho, propõe-se a aplicação de um sistema de inferência *fuzzy* no algoritmo de roteamento ICA no intuito de se monitorar um evento em um espaço geográfico, no objetivando otimizar as rotas para maximizar o desempenho da rede. Com a abordagem proposta neste artigo, o sistema *fuzzy* possibilita que a rede se autoconfigure no intuito de atender regiões geográficas em que ainda haja energia suficiente e que esteja próxima a algum fenômeno.

2 A Metodologia Proposta

Redes de Sensores sem Fio (RSSF) é uma funcionalidade que promete monitorar, instrumentar, e, possivelmente, controlar o meio físico. Estas redes são constituídas de um número elevado de dispositivos sem fios (nós sensores ou simplesmente senso-

res). Esses são distribuídos densamente por toda uma região de interesse (ALFREDO, 2006).

A RSSF pode ser formada por centenas ou até milhares de sensores posicionados dentro do fenômeno a ser observado ou próximo a ele, os quais são, de fato, dispositivos compostos de transceptor, fonte de energia, unidade de sensoriamento, processador e memória. Como as redes de sensores sem fio são capazes de se auto organizar, torna-se dispensável um planejamento minucioso de posicionamento dos sensores.

Cada um dos sensores é alimentado por uma fonte de energia escassa, ou seja, tem curta duração. Portanto, o consumo de energia influencia a durabilidade da RSSF. Sabendo disso, faz-se mister a aplicação de algoritmos de roteamento eficientes, que minimizem a transmissão de informações desnecessárias e/ou redundantes. Este trabalho propõe uma nova abordagem no intuito de minimizar o envio e recepção de informações ao aplicar mecanismos de inteligência computacional para aperfeiçoar um algoritmo de roteamento clássico da literatura.

Nas próximas seções destacam-se o algoritmo de roteamento utilizado neste trabalho e o sistema de inferência *fuzzy* aplicado para seu aperfeiçoamento.

2.1 Algoritmo de Roteamento ICA

O *Inter Cluster Routing Algorithm (ICA)* é um algoritmo de roteamento em RSSF baseado no algoritmo de roteamento LEACH (HABIB, 2004). No ICA, quando há o início do funcionamento da rede, a estação base envia mensagem (*broadcast*) para os nós da rede informando sua posição geográfica do ambiente. Após isso, os nodos sabem a posição geográfica do *sink*, suas devidas posições e a distância e a rota até o *sink*. O ICA possibilita ao nó se tornar líder (*cluster head*) de uma determinada região. Depois disso, os nós próximos se conectam a *cluster head* e os nós que possuem informações a serem enviadas para o *sink* mandará para o *cluster head*, para depois esse repassá-las para a estação base. Depois de um nó se eleger líder, esse manda um *broadcast* par os nós próximos avisando-os de que ele se tornou um *cluster head*. Assim, estes nós terão a posição geográfica deste nó líder e terão uma rota mais curta até ele. Com isso, os nós sabem a localização do nodo líder mais próximo, com o qual devem se comunicar. Portanto, no ICA, os nós sensores não enviam as mensagens diretamente para o *sink*, e sim para outro *cluster head* mais próximo e que esteja na direção da estação base.

O algoritmo ICA possibilita uma degradação suave da energia da rede como um todo e não necessariamente nodo por nodo.

2.2 Utilização do *Fuzzy*

O sistema de interferência *fuzzy* foi utilizado no ICA de forma a selecionar os nós líderes que

possuam a distância mais próxima a um local que se esta acontecendo algum tipo de fenômeno no ambiente e que possua energia suficiente, portanto o sistema exerce a função de identificar aqueles nós que podem se tornarem líderes, por exemplo, quando se acontece um evento em algum local, a rede se auto configura de forma com que os nós determinem suas distâncias ao evento mais próximo, após isso entra o funcionamento do *fuzzy* que com o dado da distância e a energia do nó, elegera os nós permitidos na rede, na próxima seção será apresentado à característica do sistema *fuzzy*.

2.3 Sistema de Interferência *Fuzzy*

Um sistema de interferência *fuzzy* foi aplicado e tem fundamental importância para o bom desempenho desta proposta. O sistema de inferência *fuzzy* aplicado neste trabalho é baseado em regras linguísticas do tipo **se** <condição> **então** <ação>. O sistema de inferência *fuzzy* aplicado neste trabalho é composto por uma interface de *fuzzyficação*, uma base de regras o procedimento de inferência e a interface de *defuzzificação*, conforme a Fig. 1 (SOUSA e ASADA, 2011).

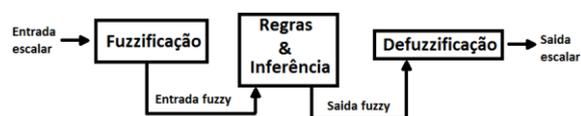


Fig. 1 Estrutura Básica de um Controlador *Fuzzy*

- *Interface de fuzzyficação*: é o processo de mapear valores escalares para graus de pertinência aos termos linguísticos dos conjuntos *fuzzy*.
- *Procedimento de inferência*: consiste em mapear valores de entrada para saídas *fuzzy* de acordo com as regras *fuzzy*. Portanto diversas regras *fuzzy* são combinadas para produzir a saída do sistema de inferência.
- *Interface de defuzzificação*: consiste em converter as saídas *fuzzy* em valores escalares.

2.3.1 Funções de pertinência e conjunto de regras *fuzzy*

O sistema *fuzzy* desenvolvido neste artigo baseia-se em duas variáveis de entrada e uma de saída. As variáveis *fuzzy* de entrada são *distância do nó* e *energia contida no nó*. A variável de saída, aqui chamada de *chance de se tornar líder*, consiste em saber se o nó tem chance ou não para se tornar líder no ICA.

Os conjuntos *fuzzy* atribuídos à variável *distância do nó* foram: Longe (L), Distância Média (DM) e Perto (P). O universo de discurso destes conjuntos está no intervalo discreto entre 0 a 5. Para a *energia contida no nó*, foram atribuídos seguintes conjuntos: Muito Baixa (MB), Baixa (B), Média (M), Alta (A) e Muito Alta (MA). O universo de discurso destes conjuntos está no intervalo contínuo entre 0 e 5. A *chance de se tornar líder* é composta pelos seguintes

conjuntos *fuzzy*: Pouca Chance (PC), Chance Média (CM) e Muita Chance (MC). O universo de discurso destes conjuntos está no intervalo contínuo entre 0 e 30.

Todas as variáveis de entrada foram modeladas como função de pertinência trapezoidal. A Eq. (1) define a função trapezoidal para os parâmetros a, b, c, d .

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{if } a < x \leq b \\ 1, & \text{if } b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & \text{if } c < x \leq d \\ 0, & \text{if } x > d \end{cases} \quad (1)$$

A seguir, listam-se os parâmetros TRAPE[a b c d] para cada um dos conjuntos *fuzzy* utilizados neste trabalho:

- L: TRAPE[3 4 5 5]
- DM: TRAPE[1 2 3 4]
- P: TRAPE[0 0 1 2]
- MB: TRAPE[0 0 0.5 2]
- B: TRAPE[0.5 1 1.5 2]
- M: TRAPE[1.5 2 2.5 3]
- A: TRAPE[2.5 3 3.5 4]
- MA: TRAPE[3.5 4 5 5]

Na Tabela 1, resumem-se as regras linguísticas do *fuzzy* utilizada neste artigo. Os resultados serão PC (Pouca Chance), CM (Chance Média) e MC (Muita Chance):

Tabela 1: Regras linguísticas

		Energia				
		MB	B	M	A	MA
Distância	L	PC	PC	PC	PC	PC
	DM	PC	PC	CM	CM	MC
	P	PC	PC	CM	MC	MC

3 Testes computacionais

Com objetivo de avaliar o desempenho da abordagem proposta neste trabalho simulações foram realizadas através do simulador Sinalgo (SINALGO, 2013). Este simulador foi escolhido por ser largamente utilizado na literatura e de fácil configuração.

O pacote java jFuzzyLogic (jFUZZYLOGIC, 2013) foi utilizado para aplicar o sistema de inferência *fuzzy*.

3.1 Ambiente dos testes

As simulações foram realizadas em um Computador *HP Pavilion dv4 – 2040br*, com sistema operacional Windows 7, processador *Intel Core i3*

CPU M 330 @ 2,13GHz, 2128MHz. Memória RAM de 4 GB DDR3 e memória cache L2 256 KB.

3.2 Características da rede

As simulações foram realizadas em redes simuladas compostas de 100 nós sensores e um *sink node*, dispostos de forma aleatória em um ambiente de duas dimensões sendo de 1000x1000. O tempo em *rounds* determinado para cada simulação foi de 8.000 *rounds* e as posições geográficas dos nós foram salvas para que todas as simulações fossem realizadas com a mesma configuração, dando segurança às comparações realizadas. Foi configurado para que cada nó sensor possua uma bateria com capacidade inicial de 5 J (joule).

Nas simulações realizadas foi utilizado o modelo de dissipação de energia proposto por Heinzelman et al. (2003), por ser o amplamente aceito e utilizado na literatura. O modelo de Heinzelman et al. (2003) pode ser sintetizado conforme segue.

Energia gasta na transmissão:

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} * k + E_{amp} * k * d^2$$

Energia gasta na recepção:

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} * k$$

Especificações:

k = número de bits da mensagem

d = distância

E_{Tx} = Energia gasta na transmissão de mensagem

E_{Rx} = Energia gasta na recepção da mensagem

E_{amp} = Energia do amplificador de transmissão

Neste trabalho, $E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit}$ e $E_{amp} = 100 \text{ pJ/bit/m}^2$. Nas simulações realizadas, o tamanho das mensagens que trafegam na rede foi configurado para 500 *bytes*, que é igual a 4000 bits.

Na unidade de processamento, a energia dissipada nas execuções dos protocolos de roteamento e no processamento.

No modelo de comunicação, a energia gasta no processamento equivale à energia dissipada na transmissão de um bit a 100 metros dividido por 3.000, conforme a Eq. (2).

$$E_{Trans} = E_{Cir} * 1 + E_{Amp} * 1 * 100^2 \quad (2)$$

Logo:

$$(E_{Cir} + 10000 * E_{Amp})/3000 \quad (3)$$

onde

E_{Trans} = Energia de transmissão.

E_{elec} = E_{Cir} = Energia gasta nos circuitos do rádio.

E_{Amp} = Energia do amplificador de transmissão.

Neste trabalho, foram realizadas 10 simulações para cada cenário a fim de obter dados, para fazermos a comparação destas informações.

3.3 Resultados

Os resultados exibem a comparação de dois cenários: no primeiro foi utilizado o algoritmo de roteamento ICA clássico. No segundo cenário, foi utilizado o algoritmo de roteamento ICA com a utilização do sistema de inferência *fuzzy* no intuito de obter o controle de densidade dos nós na rede.

As métricas utilizadas como forma de comparação dos dois cenários foram: a quantidade de mensagens enviadas, a quantidade de mensagens recebidas, a energia restante da rede, o custo de recebimento de mensagens e o tempo de vida da rede. Abaixo, definem-se as métricas utilizadas.

- A quantidade de mensagens enviadas se refere a quantas mensagens a rede dos sensores tentaram mandar para estação base;
- A quantidade de mensagens recebida se refere à quantidade de mensagens que o *sink* conseguiu receber dos nós.
- A métrica da energia restante da rede se refere ao somatório das energias restantes em cada nó da rede no fim de cada simulação.
- A métrica do custo do recebimento de mensagens leva em consideração a quantidade de mensagens recebidas pela energia residual total da rede, obtendo assim, o valor do custo do recebimento da mensagem.
- A métrica do tempo de vida da rede se refere até quando a estação base conseguiu receber mensagens. Assim que a estação base deixar de receber mensagens a rede será considerado como morta.

A Fig. 2 mostra os resultados das simulações tendo como métrica a quantidade de mensagem enviada ao *sink*.

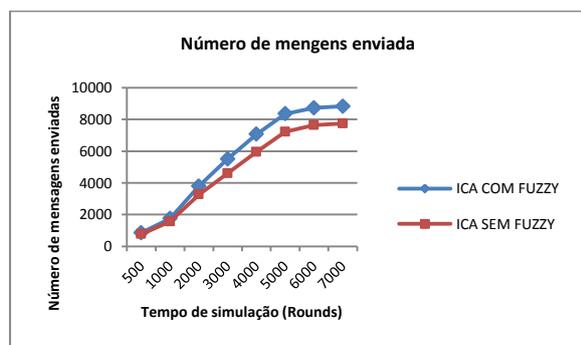


Fig. 2 Quantidade de mensagens enviadas x rounds (tempo)

O cenário do ICA com a utilização do *fuzzy* obteve os resultados significativamente melhores do que o cenário do ICA clássico. O ICA com *fuzzy* começa a se destacar no número de envios de mensagens pelos nós sensores ao *sink* a partir de 1.000 rounds (Fig. 2).

A Fig. 3 mostra os resultados das simulações tendo como métrica a quantidade de mensagem recebida no *sink*.

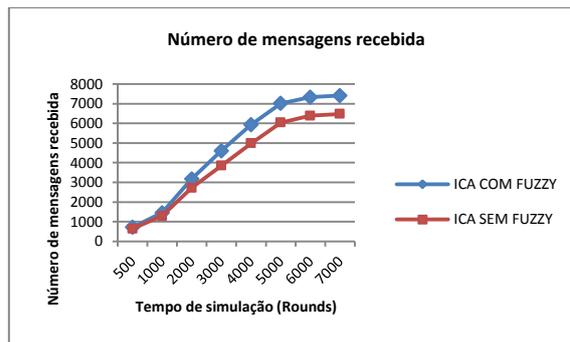


Fig. 3 Quantidade de mensagens recebidas x rounds (tempo)

O cenário do ICA com a utilização do *fuzzy* teve melhor desempenho também para a métrica quantidade de mensagens recebidas por *rounds*. O ICA com *fuzzy* começa a se destacar no número de envios de mensagens pelos nós sensores ao *sink* a partir dos 1000 rounds (Fig. 3).

A Fig. 4 mostra os resultados das simulações tendo como métrica a energia residual da rede. Como se pode observar na referida figura, o ICA com *fuzzy* obteve um melhor consumo de energia na rede, fazendo com que a rede não desperdiçasse energia e obtendo assim uma maior economia de energia.

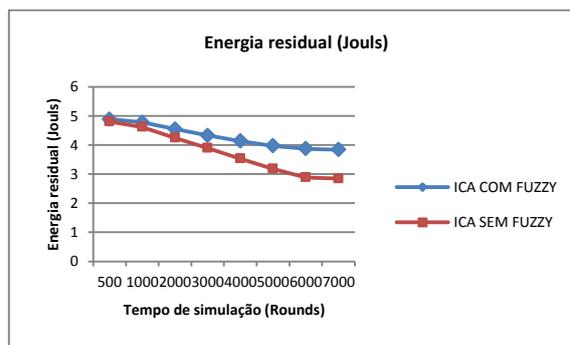


Fig. 4 Energia residual da rede x rounds (tempo)

A Fig. 5 mostra os resultados das simulações tendo como métrica de comparação o custo de recebimento de mensagens da rede, que é a razão da quantidade de mensagens recebida pela energia residual total da rede.

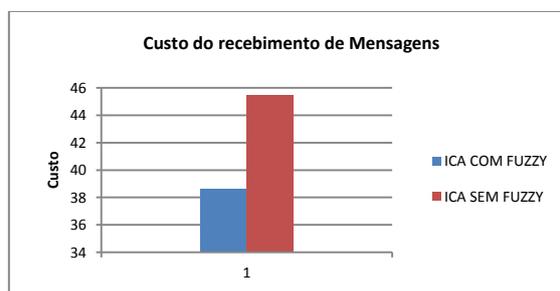


Fig. 5 Custo do recebimento de mensagens

O ICA clássico possui um valor bastante elevado no custo de recebimento de mensagens, sendo, portanto o ICA com *fuzzy* muito mais viável do que o ICA clássico (Fig. 5).

A Fig. 6 mostra os resultados das simulações tendo como referência o tempo de vida útil da rede, que é o tempo necessário para que a rede pare de funcionar.

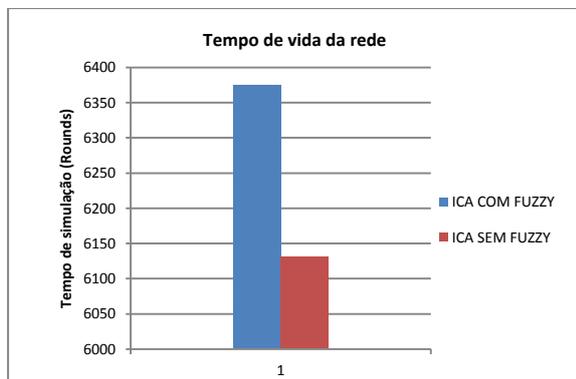


Fig. 6 Tempo de vida da rede

Em relação ao tempo de vida da rede, o ICA com *fuzzy* se destaca do ICA clássico de forma acintosa. Ao final de 8.000 rounds, o algoritmo ICA com *fuzzy* foi 305% melhor (Fig. 6).

4 Conclusão

Neste trabalho propõe-se uma nova metodologia para lidar com roteamento em redes de sensores sem fio. A abordagem proposta neste trabalho consiste na aplicação de um sistema de inferência *fuzzy* para seleção dos nós líderes do algoritmo ICA clássico. Pôde-se verificar uma melhoria significativa no algoritmo ICA em diversas simulações realizadas.

O ganho de desempenho global da rede deve-se ao sistema *fuzzy*. Este sistema possibilitou que a rede se autoconfigurasse no intuito de melhorar o controle de densidade de nós em uma RSSF. Através da nova abordagem proposta neste trabalho, uma RSSF pode se autoconfigurar uma vez ocorrendo um evento futuro em outra região geográfica se a rede ainda possuir energia. O algoritmo ICA clássico não é capaz disso, já que os líderes são eleitos aleatoriamente. Portanto, nem sempre em locais apropriados. Isso incorre em maior gasto de energia.

Foram realizadas análises comparativas considerando o algoritmo ICA com o sistema de inferência *fuzzy* e o algoritmo ICA clássico. Levaram-se em consideração as seguintes métricas: número de mensagens enviadas, mensagens recebidas, energia residual, custo de recebimento de mensagens e o tempo de vida da rede. Em todos os testes realizados pode-se perceber um ganho significativo em desempenho da rede para todas as métricas analisadas.

Referências Bibliográficas

- ALFREDO, Antonio. **Redes de Sensores Sem Fio**. Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2006.
- DALTON, Giulian. **Roteamento em Redes de Sensores**. Instituto de Matemática e Estatística. Universidade de São Paulo. 2004
- FONTENELE, Kérillon. **Uma proposta de modelo de dissipação de energia em redes sensores sem fio**. 2010. Teresina
- HABIB, E., Câmara, D., and Loureiro, A. A. (2004). Ica: **Um novo algoritmo de roteamento para redes de sensores**. In Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, Gramado, RS.
- POTTIE, G. J. and KAISER, W. J. (2000). **Wireless integrated network sensors**. *Communications of the ACM*, 43(5):51-58.
- RIBEIRO, Wellington Gomes, ARROYO, José Elias Claudio, SANTOS, André Gustavo, ROCHA, Mauro Nacif. **Aplicação da Meta-Heurística ILS para o problema de Cobertura Conectividade e Roteamento em RSSF 2D Plana homogênea**. In: ENCONTRO DE COMPUTAÇÃO E INFORMÁTICA DO TOCANTINS, 13., 2011, Palmas. *Anais...* Palmas: CEULP/ULBRA, 2011. p. 109-118.
- SOUSA, A. S. e ASADA, E. N. **Combined heuristic with fuzzy system to transmission system expansion planning**. *Electric Power Systems Research*, Volume 81 (1) Elsevier, 2011.
- SINALGO, **Simulator for Network Algorithms**. Disponível em: <http://www.disco.ethz.ch/projects/sinalgo/>. Acesso em 16/05/2013.
- jFUZZYLOGIC. **Open Source Fuzzy Logic library and FCL language implementation**. Disponível em: <http://jfuzzylogic.sourceforge.net/html/index.html>. Acesso em 16/05/2013.
- SOBRAL, J., SOUSA, A. S., ARAUJO, H., BALUZ, R., FILHO, R., LEMOS, M., e RABELO, R. **A Fuzzy Inference System for Increasing of Survivability and Efficiency in Wireless Sensor Networks**. In *ICN 2013, The Twelfth International Conference on Networks* (pp. 34-41).