

Um Algoritmo Distribuído para Eleição de Líderes de Clusters Semânticos em Redes de Sensores sem Fio

Rodrigo T. Hermeto, Douglas S. Kridi, Atslands R. Rocha, Danielo G. Gomes

Universidade Federal do Ceará (UFC)
Grupo de Redes de Computadores, Engenharia de Software e Sistemas (GREat)
Fortaleza – CE – Brasil

{rodrigohermeto,douglaskridi,atslands,dgomes}@great.ufc.br

Abstract: *Semantic Clustering is a recent technique for saving energy in wireless sensor networks. Its mechanism of action consists in dividing the network into groups (clusters) formed by nodes semantically related and at least one leader node, which acts as the bridge between the internal nodes to its cluster and sink node. By accumulating collector role semantic, node leader tends to deplete their energy faster than others. Therefore, it is necessary to use mechanisms for electing leaders semantic to prolong your lifetime. Our hypothesis is that an effective choice of leaders allows an increase in the lifetime of the network. To test it, we start from a previous work of the authors of this article [Rocha et al. 2012] and we propose an algorithm for electing leaders in distributed way based on a fuzzy inference engine. The inputs of the inference engine are the residual energy of nodes and their received signal strength indicator (RSSI). Simulation results confirm our hypothesis, since the algorithm provides (i) an improvement of 17.4% in relation to another proposal of the related literature, and (ii) a gain of 68.8% over the time life of the network's original work.*

Resumo: *Clusterização semântica é uma alternativa recente para economia de energia em redes de sensores sem fio. Seu mecanismo de ação consiste em dividir a rede em agrupamentos (clusters) formados por nós semanticamente relacionados e por pelo menos um nó líder, o qual faz o papel de ponte entre os nós internos ao seu cluster e o nó sorvedouro. Por acumular função de coletor semântico, o nó líder tende a esgotar sua energia mais rapidamente do que os outros. Assim sendo, faz-se necessário o emprego de mecanismos para eleição de líderes de clusters semânticos de modo a prolongar ao máximo seu tempo de vida. Nossa hipótese é a de que uma escolha eficaz dos líderes permite um aumento no tempo de vida da rede. Para testá-la, partimos de um trabalho anterior de autores deste artigo [Rocha et al. 2012] e propomos um algoritmo para eleição de líderes de forma distribuída à base de um motor de inferência nebulosa. As entradas do motor de inferência são a energia residual dos nós e suas intensidades de sinal recebido (RSSI). Os resultados de simulação corroboram nossa hipótese de partida, pois o algoritmo proposto provê (i) uma melhora de 17,4% com relação a uma outra proposta correlata da literatura; e (ii) um ganho de 68,8% sobre o tempo de vida da rede do trabalho original.*

1. Introdução

A fonte de energia é o principal recurso dos nós de uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF), pois dela dependem todos os demais (e.g. microcontrolador, rádio, sensores/atuadores). Apesar dos recentes avanços na pesquisa para produção local de energia (*energy harvesting*),

como transdutores piezoelétricos, células solares, calor e pressão arterial do corpo humano [Seah, Eu e Tan 2009], as clássicas e finitas baterias ainda são o tipo de fonte mais comum dos nós sensores. E quando a bateria de um nó descarrega, os resultantes “buracos” na sua região monitorada podem comprometer sobremaneira a cobertura real da rede, i.e. a fração da área total da qual o nó sorvedouro recebe informações de sensoriamento.

Neste trabalho, estamos interessados em prolongar o tempo de vida de nós sensores alimentados por baterias, de modo a contornar problemas na qualidade de entrega de dados da rede. Para tal, faz-se necessário o uso de técnicas eficientes para economia de energia em RSSF, dentre as quais destacamos a clusterização [Abbasi e Younis 2007]. A ideia geral da clusterização é organizar a rede em grupos (*clusters*), compostos por nós comuns e por um nó líder, ou *cluster-head* (CH), o qual coleta os dados sensorizados pelos nós comuns e os encaminha até o sorvedouro através de uma comunicação multissalto. Como, em geral, os nós internos aos clusters estão mais próximos do seu líder do que do sorvedouro, a rede economiza energia. Nos algoritmos tradicionais de clusterização [Heinzelman et al. 2000], a vizinhança *intracluster* geralmente é relativa à distância geográfica entre os nós e estabelecida com base na intensidade do sinal recebido (*Received Signal Strength Indicator - RSSI*). Essa é a chamada clusterização física, através da qual os nós vizinhos podem realizar monitoramento de áreas semanticamente disjuntas entre si ou prover métricas não correlacionadas. Por exemplo, em aplicações de segurança em aeroportos [Bruckner et al. 2008], os nós capturam métricas audiovisuais e comunicam-se com seus vizinhos para prover à rede uma visão global e compartilhada do ambiente. Entretanto, os nós fixados em lados opostos de uma mesma parede monitoram diferentes áreas do aeroporto, semanticamente disjuntas. O compartilhamento de informações entre esses nós implica em desperdício de recursos. O problema é potencializado em aplicações orientadas a sensoriamento contínuo devido ao grande volume potencial de dados semanticamente disjuntos.

A clusterização semântica, por outro lado, não considera métricas físicas (RSSI, distância) para agrupar nós em um mesmo cluster. Ao invés disso, a similaridade dos dados coletados pelos nós é utilizada como critério de classificação e os nós que são semanticamente relacionados são denominados vizinhos semânticos. A clusterização semântica é composta, assim como a clusterização física, por dois níveis de hierarquia. No primeiro nível está o líder ou coletor semântico, o qual se assemelha ao papel de CH na clusterização física e é responsável por receber (processar e enviar para o nó sink) os dados coletados pelos vizinhos semânticos, nós do segundo nível.

Neste trabalho, propomos um algoritmo para eleição de líderes de *clusters* semânticos de forma distribuída à base de um motor de inferência nebulosa. Visto que grande parte do gasto energético concentra-se nos nós líderes, nossa hipótese de partida é a de que uma escolha criteriosa destes líderes permite um aumento no tempo de vida da rede. Para testá-la, partimos de um trabalho prévio de autores deste artigo [Rocha et al. 2012] e agregamos um novo mecanismo de eleição de líderes semânticos.

2. Trabalhos Correlatos

Dentre as diversas propostas para eleição de líderes encontradas na literatura, a seminal é a do algoritmo de clusterização LEACH [Heinzelman et al. 2000]. O LEACH seleciona os líderes através de um modelo probabilístico, mas sem levar em consideração a quantidade de energia residual dos nós. Uma desvantagem deste algoritmo é a possibilidade de escolha de um nó com baixa energia disponível. Além disso, pelo fato da escolha ser aleatória, podem existir situações nas quais nenhum ou todos os nós sejam eleitos.

Siew et al. (2011) propuseram um sistema baseado em lógica nebulosa para a escolha de CHs. As variáveis de entrada do sistema são a energia residual e a RSSI em relação ao sorvedouro. Entretanto, ao considerar distâncias fixas, os nós mais próximos ao sorvedouro serão sempre privilegiados na eleição em detrimento dos candidatos mais distantes, independentemente da energia residual de ambos. Embora a proposta apresentada por esse trabalho realize eleições de líderes de agrupamento, estamos interessados na eleição de líderes semânticos, o que não foi proposto pelos autores.

Com relação à eleição de líderes de *clusters* semânticos, escopo deste artigo, o algoritmo SEMANTK proposto por Rocha et al. (2012) leva em consideração somente a quantidade de vizinhos semânticos existentes nos *clusters* físicos pré-estabelecidos durante a inicialização da rede. Para compreensão desse aspecto, é relevante comentar que no SEMANTK, para que sejam criados agrupamentos semânticos, é necessário que a rede tenha sido previamente agrupada fisicamente (através de algoritmos que usem RSSI ou outro parâmetro de distância física). A fase de clusterização semântica é orientada a eventos e sua inicialização ocorre quando o evento definido pelo projetista da rede é detectado. Por exemplo, em um domínio de detecção de incêndios, se o valor da temperatura extrapolar um certo limiar definido, o processo de organização semântica é inicializado. Sendo assim, após a detecção do evento, a rede que antes possuía somente agrupamentos físicos, formará os agrupamentos semânticos utilizando somente os nós que detectarem esse evento (vizinhos semânticos), mesmo que esses nós estejam em agrupamentos físicos distintos. No SEMANTK, a eleição dos líderes semânticos ocorre entre os CHs que são pré-definidos na etapa inicial do algoritmo. Quanto mais vizinhos semânticos um nó candidato a líder semântico tiver em seu *cluster*, mais chances ele tem de ser escolhido. Entretanto, esta eleição também pode ser falha caso algum nó com baixa energia residual e/ou baixa RSSI supere os demais candidatos no número de vizinhos semânticos.

A principal contribuição deste artigo é um novo algoritmo distribuído para RSSF que estende o SEMANTK [Rocha et al. 2012] para aumentar a sobrevivência dos líderes semânticos através de uma eleição eficiente. Enquanto no SEMANTK a eleição dos líderes semânticos leva em consideração apenas a quantidade de vizinhos semânticos dentro de um cluster físico, nosso algoritmo executa uma eleição com base no RSSI e energia residual usando um motor de inferência nebulosa. A proposta, descrita na próxima seção, é avaliada através de simulações e comparada com trabalhos relacionados descritos nesta seção.

3. Descrição da Proposta

Apresentamos um método de eleição distribuída de líderes semânticos com base em um motor de inferência nebulosa, tendo como entradas a energia residual do líder de agrupamento físico e sua RSSI em relação ao sorvedouro. Após a execução do processo de detecção de vizinhos semânticos descrito por Rocha et al. (2012), os líderes de agrupamento físico terão conhecimento da existência ou não dos mesmos em seu *cluster*. Em seguida, o processo de eleição de líder semântico é iniciado. Propomos um sistema nebuloso capaz de inferir uma decisão balanceada e não tendenciosa sobre a eleição de líderes semânticos que possuam melhores condições de assumirem esse papel, ou seja, aqueles nós que possuírem maiores níveis de energia e maior RSSI em relação ao sorvedouro.

Ao contrário da teoria clássica de conjuntos, na teoria dos conjuntos nebulosos [Zadeh 1988], a pertinência de um valor em um dado conjunto pode ser parcial ou intermediária. Desta forma, os sistemas de inferência nebulosa são capazes de tratar problemas que exigem informações incertas ou imprecisas. O sistema nebuloso proposto combina as variáveis linguísticas de entrada Energia e RSSI para auxiliar na tomada de decisão relativa à eleição

mais adequada do líder semântico. Como neste trabalho não há mobilidade dos nós sensores, suas distâncias não mudam, o que poderia favorecer a eleição de candidatos mais próximos ao sorvedouro em detrimento do valor da energia residual dos nós. Para contornar essa situação, atribuímos pesos aos valores da entrada linguística Energia, de modo, que a distância elevada (que corresponde a um RSSI baixo) não exclua a possibilidade de eleição de um dado dispositivo.

A variável Energia possui três conjuntos de valores associados a si, Baixa, Média e Alta, enquanto a variável RSSI possui os conjuntos Perto, Médio e Longe. Nas Figuras 1 e 2 são mostradas respectivamente as funções de inclusão para Energia e RSSI.

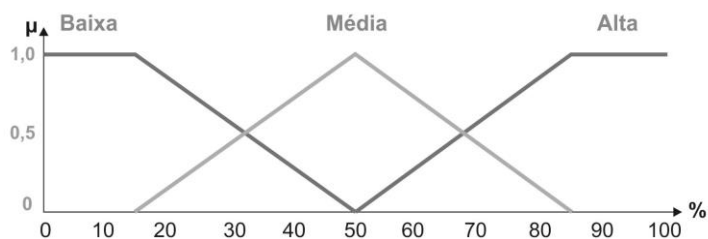


Figura 1. Variável linguística Energia.

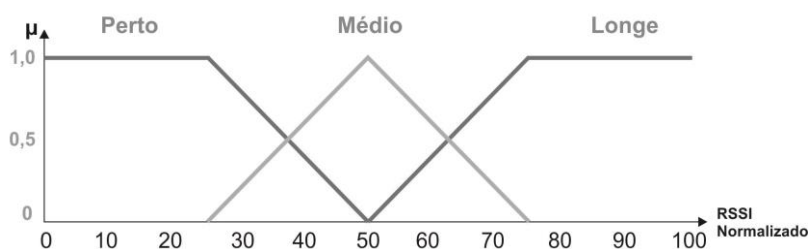


Figura 2. Variável linguística RSSI.

A saída deste sistema nebuloso é representada pela variável linguística Chance, que representa a probabilidade de um candidato ser eleito como líder de *cluster* semântico. Esta variável possui nove conjuntos de valores: Muito Pequena, Pequena, Pouco Pequena, Pouco Média, Média, Muito Média, Pouco Grande, Grande, Muito Grande. Na Figura 3, temos a função de inclusão para a variável Chance.

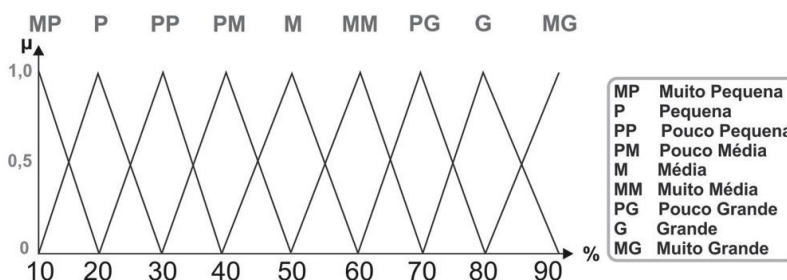


Figura 3. Variável linguística Chance.

O universo de discurso de todas as variáveis linguísticas nebulosas foi definido como sendo o intervalo fechado percentil [0, 100], caracterizado pela normalização dos valores reais obtidos para Energia e RSSI. Quanto às formas geométricas dos conjuntos, que compõem a função de inclusão de cada variável, foi utilizada uma modelagem similar a proposta por Barolli et al. (2011). Os intervalos de valores de cada função foram definidos de forma empírica.

O comportamento do motor de inferência nebulosa foi modelado por uma base de regras linguísticas obtidas experimentalmente até se chegar a um arranjo adequado. Esta base conta com nove regras que são compostas por dois antecedentes e um consequente, respectivamente, *Energia*, *RSSI* e *Chance*. O arranjo modelado por nós busca obter a combinação entre todos os antecedentes produzindo um consequente distinto (Tabela 1).

Após todos os líderes físicos conhecerem as suas chances de se tornarem líderes semânticos, é iniciado um processo de troca de mensagens entre eles com o objetivo de se determinar qual CH possui a maior chance de se tornar um líder semântico. Cada CH verifica a partir do seu ponto de vista, qual dos seus vizinhos possui uma chance maior do que a sua. Caso determine essa situação, o líder físico em questão envia uma mensagem de voto informando que, para ele, o vizinho é que tem a maior chance. Caso contrário, ele votará em si mesmo. Ao receber o voto, será incrementado um contador de votos recebidos. Aquele líder físico que possuir a maior chance receberá o maior número de votos, e logo, será eleito líder semântico. É importante ressaltar, que no caso de existirem dois candidatos com a mesma chance, será eleito aquele que possuir a maior energia residual

Tabela 1. Base de regras utilizada.

<i>Regra</i>	<i>Energia</i>	<i>Distancia</i>	<i>Chance</i>
1	Baixa	Perto	Pouco Pequena
2	Baixa	Média	Pequena
3	Baixa	Longe	Muito Pequena
4	Média	Perto	Muito Média
5	Média	Média	Média
6	Média	Longe	Pouco Média
7	Alta	Perto	Muito Grande
8	Alta	Média	Grande
9	Alta	Longe	Pouco Grande

4. Material e métodos

4.1. Material

Todos os códigos foram implementados na linguagem C e foram executados como processos do sistema operacional Contiki [Dunkels et al. 2004]. Utilizamos o simulador Cooja [Österlind 2006], o qual vem embarcado no Contiki. O Cooja permite simulações de redes de sensores sem fio utilizando o padrão IEEE 802.15.4, cuja taxa máxima de transmissão é igual a 250 kbps e a potência máxima de saída não passa de 1 mW. Além disso, o Cooja possui suporte para diversas plataformas, dentre as quais o MicaZ.

4.2. Modelo de energia

Utilizamos o modelo de energia proposto por Jurdak et al. (2008) definido para os sensores MicaZ:

$$E_t = P_{enviado} \cdot P_{tamanho} \cdot TB \cdot I_t \cdot V, \quad (1)$$

$$E_r = P_{recebido} \cdot P_{tamanho} \cdot TB \cdot I_r \cdot V, \quad (2)$$

em que E_t e E_r representam, respectivamente, os custos energéticos em milijoules (mJ) para transmissões e recepções de pacotes; $P_{enviado}$ e $P_{recebido}$ representam a quantidade de pacotes enviados e recebidos, $P_{tamanho}$ é o tamanho de cada pacote em *bytes*, TB equivale ao tempo necessário para o rádio CC4420 (utilizado no MicaZ) enviar 1 *byte* (32 μ s). I_r e I_t representam os valores de corrente elétrica no rádio do nó em modo recepção e transmissão (19,7mA e 17,4 mA, respectivamente). Por último, V , que também é uma constante, representa a tensão elétrica fornecida ao MicaZ (3 V). Todos esses valores têm por referência o *datasheet* do MicaZ.

4.3. Experimentos e Cenários

Utilizamos os mesmos cenários e valores de Rocha et al. (2012) (vide Figura 4), nos quais foram simuladas aplicações de monitoramento de integridade estrutural (*Structural Health Monitoring*, SHM) [Brownjohn 2007] em estrutura com e sem danos (vide Tabela 2). A rede foi disposta representando um edifício de cinco andares. Os agrupamentos físicos são todos determinísticos, ou seja, no início da execução da rede todos os nós sabem se são líderes de agrupamentos físicos ou não. Aqueles que não são, têm conhecimento de quem são os seus respectivos líderes. Além disso, os líderes de agrupamentos físicos têm conhecimento de seus vizinhos líderes adjacentes. Todos os sensores possuem tempos pré-determinados de transmissão que variam entre 500 e 1300 ms. Cada *round* possui duração de 15 minutos.

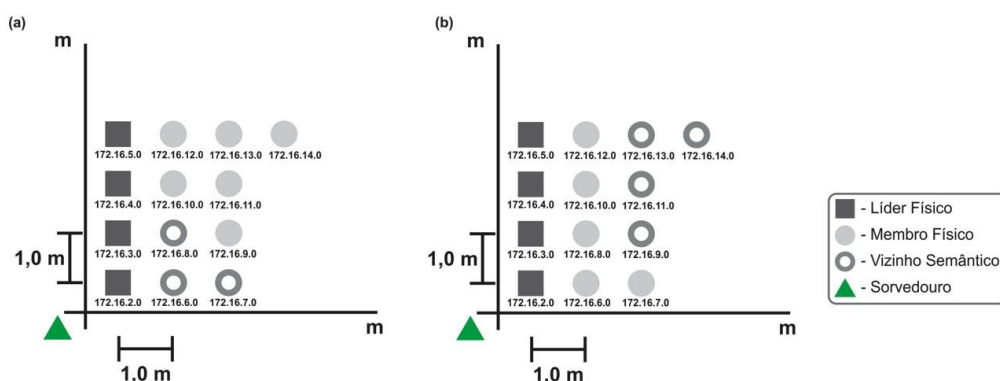


Figura 4. Cenários utilizados nos experimentos.

Tabela 2 – Frequências Modais adotadas

Frequências	Modo I (Hz)	Modo II (Hz)	Modo III (Hz)	Modo IV (Hz)	Modo V (Hz)
Saudável	2.54	7.52	12.01	15.53	17.77
Dano_2	2.34	7.52	11.62	14.45	17.48
Dano_4	2.44	6.93	11.91	15.14	16.99

Durante os dez segundos iniciais de cada *round*, os membros dos agrupamentos físicos enviam mensagens contendo os modos da frequência saudável, representando uma estrutura sem danos. Após esse período, no cenário da Figura 4(a), todos os nós alteram suas frequências para Dano_2, que significa a ocorrência de dano no segundo andar. No cenário da Figura 4(b) as frequências são alteradas para Dano_4, que representa dano no quarto andar. Os pesos distribuídos aos nós (na inicialização da rede) permitem identificar quais são os nós próximos ao dano, caracterizando-os como vizinhos semânticos. Em nosso caso, esses nós são aqueles identificados pelos 172.16.6.0, 172.16.7.0 e 172.16.8.0 no cenário 4(a) e pelos IPs 172.16.9.0, 172.16.11.0, 172.16.13.0 e 172.16.14.0 no cenário 4(b). Essa alteração nas frequências modais gera um evento que dispara o processo de clusterização semântica. Ao término desse processo, todos os CHs terão conhecimento se seu aglomerado físico contém

ou não vizinhos semânticos [Rocha et al. 2012] e é, nesse momento, que ocorre a eleição de líderes semânticos.

Neste trabalho, queremos adiar o máximo possível o tempo em que o primeiro líder tem sua energia completamente esgotada, ou seja, o índice *First Node Death* [Dietrich and Dressler 2009]. Comparamos nossa proposta com o algoritmo de eleição utilizada no SEMANTK [Rocha et al. 2012], cujo critério de eleição é a quantidade de vizinhos semânticos existentes em cada agrupamento físico, e com o trabalho de Siew et al. (2011), o qual também utiliza como critério de eleição a energia residual do nó e o RSSI em relação ao sorvedouro. A próxima seção traz os resultados destas comparações.

5. Resultados

Nas Figuras 5, 6 e 7 são mostrados os gráficos comparativos entre nossa proposta, o SEMANTK [Rocha et al. 2012] e o trabalho de Siew et al. (2011).

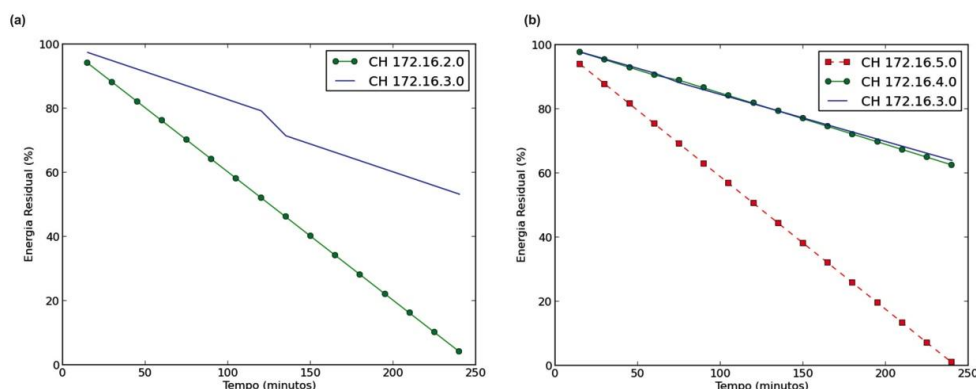


Figura 5. Eleição do SEMANTK.

Em nosso cenário, nenhum nó foi adicionado e não consideramos a morte de membros físicos, isso faz com que o líder físico 172.16.2.0 sempre seja eleito líder semântico no cenário da Figura 4(a) e o 172.16.5.0 no da Figura 4(b). Como a função de líder, semântico ou físico, é uma tarefa onerosa em termos energéticos, esses nós tenderão a morrer mais rapidamente do que os outros líderes. Em nossos experimentos, considerando a energia inicial dos nós em 5 J, tanto o 172.16.2.0 quanto o 172.16.5.0 duraram aproximadamente 240 minutos. Conforme ilustrado nas figuras 5(a) e 5(b), podemos observar que uma estratégia de rotatividade de líderes aumentará o tempo em que o primeiro líder tem sua energia completamente esgotada.

Tabela 3 – Quantidade de vezes que os nós foram eleitos no cenário 8(a)

<i>Endereços IP</i>	<i>SEMANTK</i>	<i>Siewet al.(2011)</i>	<i>Proposta</i>
172.16.2.0	16	11	11
172.16.3.0	0	12	12

Tabela 4 - Quantidade de vezes que os nós foram eleitos no cenário 8(b)

<i>Endereços IP</i>	<i>SEMANTK</i>	<i>Siewet al.(2011)</i>	<i>Proposta</i>
172.16.3.0	0	11	11
172.16.4.0	0	7	9
172.16.5.0	16	5	7

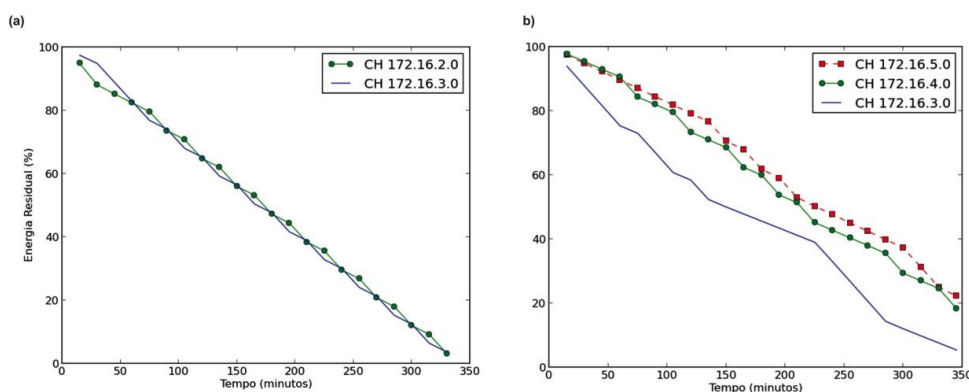


Figura 6. Eleição de Siew et al. (2011).

Analisando a Figura 6, observa-se que a energia residual dos líderes decai em um ritmo mais equilibrado do que visto no SEMANTK. Nos experimentos ilustrados nas Figuras 6(a) e 6(b), o primeiro CH levou aproximadamente 350 minutos para morrer, considerando a mesma energia inicial de 5 J do experimento anterior. Notamos que no experimento 6(a), onde os dois dispositivos avaliados se encontravam próximos à base (cenário 4a), a rotatividade de líderes semânticos foi maior do que no experimento 6(b). Isso se deve ao fato de que, nesse último, a distância entre os candidatos é maior (cenário 4b), fazendo com que, embora haja rotatividade, os nós mais distantes sejam eleitos com uma frequência menor. Como se pode observar na Tabela 4, o candidato 172.16.3.0 foi eleito mais vezes devido a sua proximidade em relação ao sorvedouro. Como as distâncias são fixas, aqueles dispositivos mais próximos ao sorvedouro acabam sendo eleitos mais frequentemente, mesmo quando sua energia residual está baixa, tornando assim, a inferência nebulosa menos eficiente levando a eleições não ótimas. Por volta de 300 minutos, que corresponde ao *round* 20, o líder físico 172.16.0.3 foi eleito mesmo estando com sua energia residual em torno de 12%. O líder físico 172.16.5.0, nesse mesmo momento, estava com energia residual por volta de 40%.

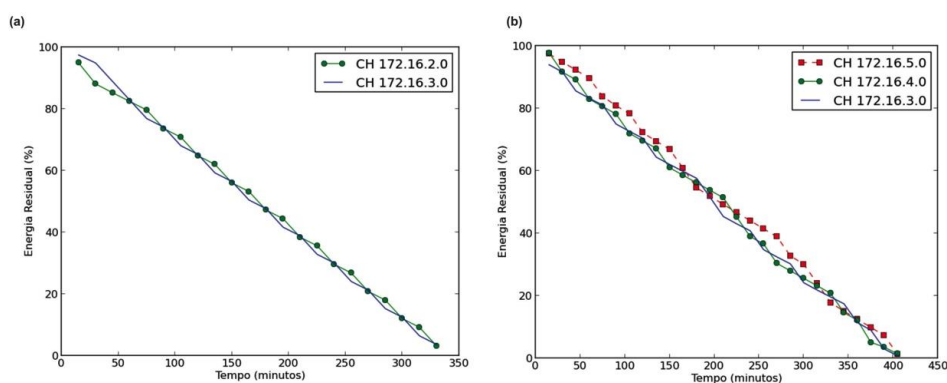


Figura 7. Eleição proposta.

6. Discussão dos resultados

Com a estratégia de eleição proposta nesse trabalho, conseguimos obter uma melhor rotatividade de líderes semânticos, tanto no cenário das Figura 4(a) como no da Figura 4(b). Os níveis de energia dos líderes físicos tendem a cair de maneira equilibrada devido à associação de peso à variável Energia, possibilitando que os dispositivos mais distantes possam chances equivalentes às dos dispositivos mais próximos ao sorvedouro. É importante ressaltar que, independentemente das distâncias dos candidatos, a rotatividade de líderes semânticos eleitos é garantida pela nossa proposta. Isso mostra que a ponderação das

variáveis de entrada (energia residual e RSSI) possibilitou um comportamento equilibrado independente das distâncias e localizações dos dispositivos nos cenários observados, o que não foi alcançado pelo trabalho correlato, que obteve resultados semelhantes aos nossos no cenário 4(a) (Tabela 3), mas não foi capaz de repeti-lo no cenário 4(b). Isso porque no cenário 4(a) a distância entre os candidatos e o sorvedouro é pequena, de modo que os seus valores não influenciam decisivamente na eleição (na inferência nebulosa o valor do RSSI dos dois dispositivos possui a mesma pertinência ao conjunto Perto). Portanto, a variável Energia é decisiva no processo de eleição.

Todos os líderes semânticos, conseqüentemente a rede, mantiveram-se funcionando durante aproximadamente 350 minutos no cenário 4(a) e 405 minutos no cenário 4(b), utilizando a mesma energia inicial de 5J dos experimentos anteriores. Isso representa um ganho de 45% de sobrevivência em relação à eleição utilizada no SEMANTK no cenário 4(a). No cenário 4(b), tivemos um ganho de 68.8% em relação ao SEMANTK e 17.4 % quando comparado a [Siew et al. 2011], o qual utilizou lógica nebulosa sem ponderação das variáveis de entrada.

Apesar da proposta apresentada conseguir realizar eleições mais balanceadas, garantindo uma melhor escolha de líderes semânticos, quando o evento de interesse é detectado por uma grande quantidade de agrupamentos vizinhos e contínuos, acontecerá uma intensa troca de mensagens entre todos os candidatos a líder semântico até que haja um consenso, pois somente um líder será eleito. Uma sugestão de melhoria seria decidir o momento adequado para se particionar os agrupamentos semânticos.

7. Conclusões

Nesse trabalho, propomos um algoritmo de eleição de líderes semânticos que leva em consideração o nível de energia residual e o RSSI em relação ao sorvedouro. Utilizamos um motor de inferência nebulosa com entradas ponderadas que, além de ser capaz de tratar informações incertas ou imprecisas, também possibilita escolhas priorizando o nível energético dos nós. Comparamos nossa proposta com dois algoritmos de eleição da literatura recente. Resultados de simulação indicam que o algoritmo proposto provê ganhos no tempo de vida da ordem de (i) 17,4% com relação ao trabalho de Siew et al. (2011) e (ii) 68,8% sobre o SEMANTK [Rocha et al. 2012].

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à Funcap pelo apoio financeiro através dos projetos CNPq nº 481417/2011-7, CNPq nº 480872/2012-0 e Funcap Nº PJP-0072-000100100/12. Rodrigo Teles agradece à CAPES pela bolsa de mestrado.

Referências

Abbasi, A. A. and Younis, M. (2007). A survey on clustering algorithms for wireless sensor networks. *Computer Communications*, v. 30, n. 14-15, p. 2826–2841. doi:10.1016/j.comcom.2007.05.024

Anastasi, G., Conti, M., Di, M. and Passarella, A. (2009). Ad Hoc Networks Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, v. 7, n. 3, p. 537–568. doi:10.1016/j.adhoc.2008.06.003

Barolli, L., Ando, H., Xhafa, F., et al. (2011). Evaluation of an Intelligent Fuzzy-Based Cluster Head Selection System for WSNs Using Different Parameters. *2011 IEEE Workshops of International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, p. 388–395.

Brownjohn, J. M. W. (2007). Structural health monitoring of civil infrastructure. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, v. 365, n. 1851, p. 589–622.

Bruckner, D., Zucker, G., Simo, J., Herzner, W. and Mahlkecht, S. (2008). Semantic neighborhood sensor network for smart surveillance applications. In *Proceedings of the 3rd International Conference from Scientific Computing to Computational Engineering*, 2008.

Dietrich, I. and Dressler, F. (2009). On the lifetime of wireless sensor networks. *ACM Transactions on Sensor Networks*, v. 5, n. 1, p. 1–39.

Dunkels, a., Gronvall, B. and Voigt, T. (2004). Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors. *29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks*, p. 455–462.

Heinzelman, W.R.; Chandrakasan, A.; Balakrishnan, H. (2000). Energy-efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks. *Hawaii International Conference on System Sciences*. doi: 10.1109/HICSS.2000.926982

Jurdak, R., Ruzzelli, A. G. and O'Hare, G. M. P. (2008). Adaptive Radio Modes in Sensor Networks: How Deep to Sleep? *2008 5th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, p. 386–394.

Rocha, A. R., Pirmez, L., Delicato, F. C., Lemos, E., Santos, I., Gomes, D.G., Souza, J.N.(mar 2012). WSNs clustering based on semantic neighborhood relationships. *Computer Networks*, v. 56, n. 5, p. 1627–1645, ISSN 1389-1286, 10.1016/j.comnet.2012.01.014.

Seah, W.K.G.; Zhi Ang Eu; Hwee-Pink Tan (2009). Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (WSN-HEAP) - Survey and challenges, *Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology*, 2009. vol., no., pp.1-5, 17-20 May 2009 doi: 10.1109/WIRELESSVITAE.2009.5172411

Siew, Z. W., Kiring, a., Yew, H. T., Neelakantan, P. and Teo, K. T. K. (2011). Energy efficient clustering algorithm in wireless sensor networks using fuzzy logic control. *Humanities, Science and Engineering (CHUSER)*, 2011 IEEE Colloquium on , vol., no., pp.392-397, 5-6 Dec. 2011doi: 10.1109/CHUSER.2011.6163758

Österlind, F. (2006). A Sensor Network Simulator for the Contiki OS.

Zadeh, L.A. Fuzzy Logic (1988), *Computer*, vol. 21, no. 4, pp. 83-93, April 1988, doi:10.1109/2.53