

Análise do Impacto Combinado de Algoritmos de Localização e Controle de Densidade na Cobertura-3

André Campos¹, Efren Souza², Eduardo Nakamura²

¹Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal do Amazonas

²Fundação Centro Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica - FUCAPI

andre.campos@acm.org, efren@dcc.ufam.br, nakamura@pq.cnpq.br

Abstract. *Target tracking is an important application of wireless sensor networks (WSN). It is also an application tightly coupled with localization. Since adding a GPS to every sensor in the network is unfeasible, it becomes necessary to use localization algorithms in order for the network to have the target tracking capabilities. In addition, WSNs are often deployed in hostile environments; recharging the sensors' batteries become either impossible or too costly. Therefore, it is desirable to use a density control algorithm to increase the network lifetime. In this article, we measure the impact of different localization techniques on the density control, considering a target tracking application; such application needs at least three nodes to detect a target (3-coverage). Through simulations, we evaluate the performance of three localization systems (ideal, RPE and DPE) and three density control algorithms (GAF, OGDC and A3). Results indicate the DPE-OGDC combination is the most effective on maintaining 3-coverage.*

Resumo. *Rastreamento de alvos é uma importante aplicação de redes de sensores sem fio (RSSF). Por se tratar de uma aplicação fortemente relacionada à localização, a inviabilidade de equipar todos os sensores com GPS torna necessário o uso de algoritmos de localização. Além disto, as RSSFs podem, em muitos casos, ser instaladas em ambiente hostil, onde é inviável recarregar as baterias dos sensores. Sendo assim, algoritmos de controle de densidade são utilizados para prolongar o tempo de vida da rede. Neste trabalho quantificamos o impacto de diferentes técnicas de localização sobre o controle de densidade, considerando uma aplicação de rastreamento que necessita de pelo menos três nós detectando o alvo (cobertura-3). Através de simulações, avaliamos o uso de três mecanismos de localização (ideal, RPE e DPE) e de três algoritmos de controle de densidade (GAF, OGDC e A3). Resultados indicam que a combinação DPE-OGDC é a que melhor mantém a cobertura-3.*

1. Introdução

Uma rede de sensores sem fio (RSSF) consiste em um conjunto de sensores distribuídos sobre determinada área de interesse, capaz de coletar informações do ambiente. Muitas destas informações só se tornam relevantes quando a localização dos eventos com elas relacionados é conhecida [Albrowicz et al. 2001]. Desta forma, a localização correta dos sensores é indispensável para a análise destes eventos. A posição dos nós, na maioria dos casos, não é conhecida de antemão. Apenas alguns nós são capazes de autolocalizar-se

(através de GPS, por exemplo); estes nós são conhecidos como *beacons*. Os algoritmos de localização, com base na posição dos *beacons*, fazem com que os demais nós, conhecidos como nós livres, também sejam capazes de autolocalizar-se.

Os sensores são dispositivos com recursos limitados. Recarregar a bateria de um sensor é, na maioria dos casos, inviável [Tian and Georganas 2002]. O tempo de vida útil da rede está diretamente relacionado à quantidade de energia restante em cada sensor. Naturalmente, é desejável maximizar o tempo de vida da rede. Para tanto, é necessário empregar algoritmos de controle de densidade. De forma simplificada, estes algoritmos consistem em manter o maior número possível de sensores desligados durante o máximo possível de tempo, mas mantendo a funcionalidade da rede.

Os problemas de localização e controle de densidade são fundamentais para aplicações de rastreamento de alvos. Este tipo de aplicação é importantíssima na área de redes de sensores sem fio. Por exemplo, no Projeto SAUIM, temos que rastrear esta espécie de macacos (em extinção). O rastreamento contínuo e de longo prazo permite um estudo mais detalhado da espécie, colaborando para sua preservação. Consideramos que é necessário que 3 sensores detectem a presença de um alvo simultaneamente (cobertura-3) para que o rastreamento seja possível. Sendo assim, há um importante *trade-off* a ser avaliado: tempo de vida versus rastreabilidade.

É importante sabermos qual combinação de algoritmos de localização e controle de densidade é a mais eficiente na manutenção da cobertura-3. Esta é justamente a principal contribuição deste trabalho; avaliamos como uma RSSF mantém a cobertura-3 quando algoritmos de localização e controle de densidade são utilizados simultaneamente. Até onde sabemos, não há, na literatura, um estudo que combine estes três problemas num mesmo cenário.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. Na Seção 1.1, apresentamos a fundamentação teórica dos algoritmos e técnicas relacionados à localização e controle de densidade. A Seção 1.2 traz uma série de trabalhos relacionados. A Seção 2 discute a metodologia dos experimentos e avaliação de seus resultados. Por fim, a Seção 3 traz nossas conclusões e aponta para direções futuras.

1.1. Fundamentação Teórica

1.1.1. Localização

O processo de localização dos nós da rede pode ser dividido em três etapas [Boukerche et al. 2007]: estimativa de distância, computação de posição e algoritmos de localização. A estimativa de distância pode ser feita por *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) ou alguma variação de *Time of Arrival* (ToA) [Boukerche et al. 2007]. A computação da posição pode ser feita por métodos como a trilateração ou a multilateração. Por fim, um algoritmo de localização é empregado para propagar as informações de localização dos *beacons* para os nós livres. Nosso trabalho avalia o *Recursive Position Estimation* (RPE) [Albowicz et al. 2001] e o *Directed Position Estimation* (DPE) [Oliveira et al. 2009b].

O RPE é dividido em quatro estágios, conforme a Figura 1. No primeiro, o nó livre estabelece o seus nós de referência. Após isto, o nó estima a distância para seus pontos de referência utilizando RSSI ou ToA, por exemplo. Em seguida, o nó estima sua própria

posição utilizando multilateração. Por fim, caso o nó possua certa confiança de que sua posição é correta, ele passa a se comportar como um *beacon* e ajuda outros nós livres no processo de localização.

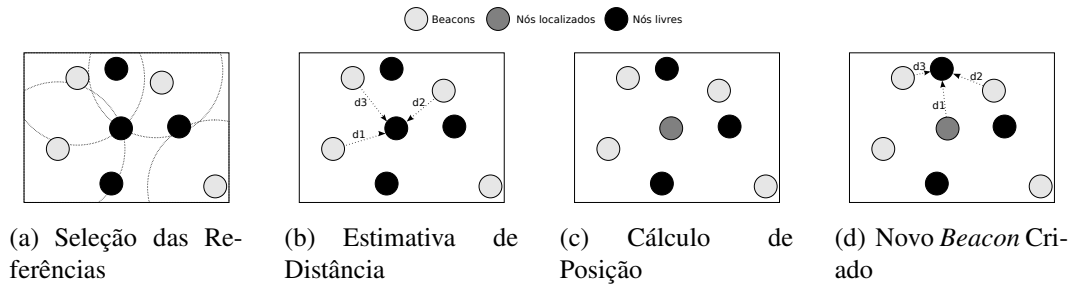


Figura 1. Estágios do RPE.

O RPE faz com que o número de referências na rede cresça rapidamente; isto é sua principal vantagem. Entretanto, há um efeito colateral: os erros de localização também são propagados de maneira rápida [Oliveira et al. 2005]. Experimentos mostram que o RPE necessita que pelo menos 5% dos nós sejam *beacons*; o algoritmo é capaz de localizar 90% dos nós com erro de até 3% da distância entre os nós [Albowicz et al. 2001].

O DPE é uma derivação do RPE. A diferença é que o DPE necessita apenas de 4 *beacons*, dispostos em uma estrutura de cruz. O uso dessa estrutura garante que a recursão tenha apenas uma origem, conforme a Figura 2(a); isto implica que a direção de propagação da recursão seja conhecida (do centro da recursão para as extremidades da área sensoriada). A estrutura de cruz garante que a direção de propagação da recursão seja

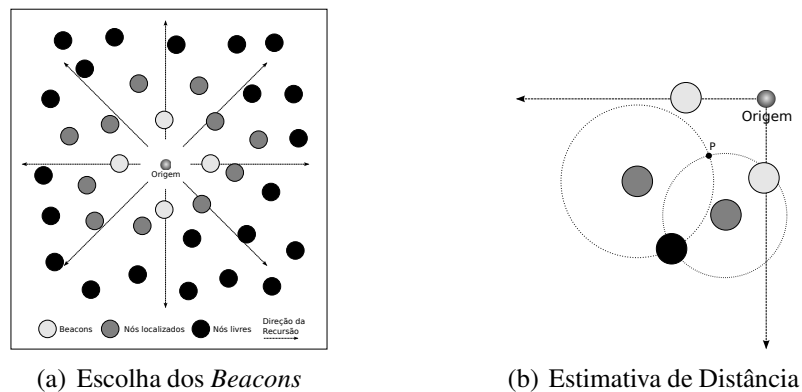


Figura 2. Funcionamento do DPE.

do centro da cruz para as bordas da área de sensoriamento. Isto faz com que apenas dois sensores de referência sejam necessários para que um terceiro sensor calcule sua posição; basta que o sensor escolha o ponto de interseção dos dois discos de sensoriamento mais distante da origem da recursão, conforme mostrado na Figura 2(b).

1.1.2. Controle de Densidade

Controle de densidade consiste em manter a maior quantidade possível de sensores desligados de modo a maximizar o tempo de vida da rede, mas mantendo sua fun-

cionalidade. Este trabalho avalia três algoritmos, que representam classes diferentes de soluções para o controle de densidade: *Geography-informed Energy Conservation for Ad Hoc Routing* (GAF) [Xu et al. 2001] (baseado em *grid*), o *A Tree Algorithm* (A3) [Wightman and Labrador 2008] (independente de localização) e o *Optimal Geographical Density Control* (OGDC) [Zhang and Hou 2005] (baseado em otimização).

O GAF consiste em montar uma grade virtual sobre a área de sensoriamento. Uma vez que um nó livre passa a conhecer sua posição, ele é capaz de determinar em qual célula da grade ele se encontra. Nós que pertencem à mesma célula são considerados equivalentes. O tamanho de cada célula é dimensionado de modo que todos os nós de duas células adjacentes consigam se comunicar. Em outras palavras, o alcance do rádio dos sensores é maior do que a grandeza R da Figura 3. Xu, Heidemann e Estrin [Xu et al. 2001] mostram que o GAF consegue diminuir entre 40% e 60% o consumo de energia da rede em comparação à uma rede sem controle de densidade; além disso, mostram que o tempo de vida da rede aumenta de acordo com a densidade dos nós.

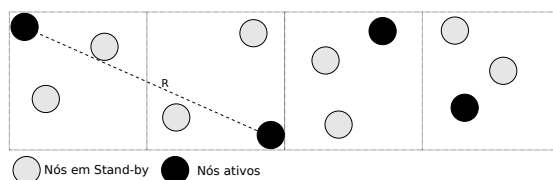


Figura 3. Definição da Célula do GAF.

O A3 é uma solução aproximada do problema de *Minimal Connected Dominating Set* (CDS), que é NP-Difícil. Este algoritmo não necessita saber as posições de todos os nós da rede, ele utiliza apenas as distâncias estimadas por RSSI como base da criação da árvore CDS subótima. Ao iniciar o algoritmo, um sensor escolhe o seu vizinho mais distante para fazer parte da topologia; os demais são desativados. Em seguida, este vizinho seleciona o seu vizinho mais distante, como mostrado na Figura 4. Isto se repete até que todos os nós estejam ligados ou desativados. Wightman e Labrador [Wightman and Labrador 2008] mostram que o A3 precisa de apenas 6% de nós ativos quando há uma alta densidade de nós da rede. Este número sobe para 41% em densidades baixas. Além disso, o número de mensagens enviadas por nó é linear.

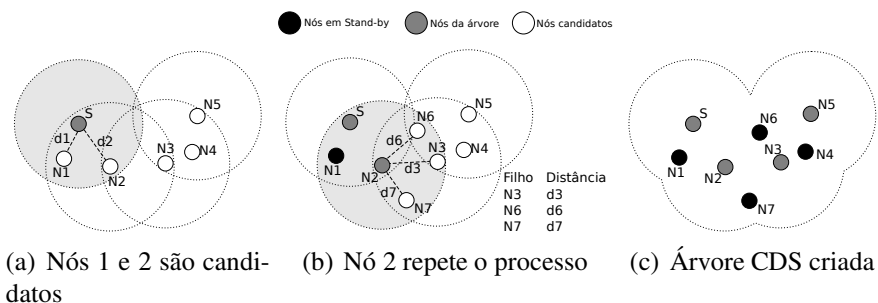


Figura 4. Funcionamento do A3.

A ideia por trás do OGDC é de que minimizar a área coberta por mais de um sensor implica na utilização ótima de energia. Assim como o GAF, o OGDC assume que todos os nós conhecem a sua posição de antemão. O algoritmo baseia-se na comprovação

matemática de que a mínima interseção dos perímetros de sensoriamento de 3 nós é obtida quando as localizações destes 3 sensores formam um triângulo equilátero de lado $\sqrt{3}r$, onde r é o raio de sensoriamento, conforme mostrado na Figura 5. Isto implica que a rede deve ser densa o suficiente para que haja um sensor suficientemente perto de qualquer ponto. Zhang e Hou [Zhang and Hou 2005] mostram que o OGDC consegue utilizar menos da metade dos nós utilizados por uma variação do GAF, mantendo a mesma cobertura da área de sensoriamento.

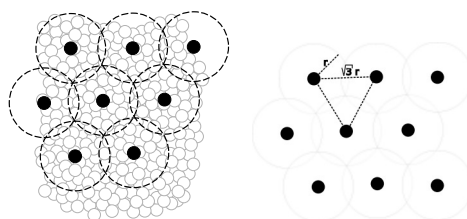


Figura 5. Funcionamento do OGDC.

1.2. Trabalhos Relacionados

O problema de localização já foi amplamente estudado na área de RSSF. Niculescu e Nath [Niculescu and Nath 2001] propõem o *Ad Hoc Positioning System* (APS). No APS, os nós livres utilizam o número de *hops* até os *beacons* para estimar suas distâncias até eles; esta técnica é chamada de DV-Hop. O algoritmo tem a vantagem de demandar um número baixo de *beacons* e densidade de sensores baixa. Entretanto, sua aplicação na prática é questionável, já que apresenta altos erros de localização e alto custo de comunicação e consumo de energia [Oliveira et al. 2009a]. Oliveira [Oliveira et al. 2009a] propõe um algoritmo chamado DV-Loc. Este algoritmo, assim como o APS, utiliza DV-Hop para estimar as distâncias entre nós livres e *beacons*. A diferença é que o escopo dos inundamentos do DV-Hop é limitado à células de um diagrama de Voronoi. Com isso, o algoritmo apresenta melhor escalabilidade do que o APS e localização mais precisa.

Para solucionar o problema de controle de densidade, Ye et al. propõem o *Probing Environment and Adaptive Sleeping* (PEAS) [Ye et al. 2003]. Este algoritmo consiste em acordar cada nó de tempos em tempos de modo a determinar se seu vizinho necessita ser substituído, sua limitação é a premissa de que “a densidade dos nós pode ser muitas vezes, ou até ordens de magnitude, maior do que o mínimo requerido para funcionamento normal” [Ye et al. 2003]. Cerpa e Estrin [Cerpa and Estrin 2004] propõem o *Adaptive Self-Configuring Sensor Networks Topologies* (ASCENT), onde cada nó decide se vai participar ou não da rede de acordo com o seu nível de conectividade com a rede. Shang et al. introduzem o *Non-Overlapping Density Control* (NODC) [Shang and Shi 2004], que é uma versão modificada do OGDC (discutido na Seção 1.1.2).

Mohapatra e Gui [Gui and Mohapatra 2004] analisam o impacto de diferentes algoritmos de controle de densidade no rastreamento de alvos; o foco de seu estudo é manter a área de cobertura original, maximizando o tempo de vida da rede. Já Souza et al. [Souza et al. 2009] analisam a acurácia tanto do Filtro de Partículas quanto do Filtro de Kalman na presença de erros de localização introduzidos pelo RPE e pelo DPE. Oliveira et al. investiga o efeito dos erros de localização em algoritmos geográficos, como o roteamento e o controle de densidade [Oliveira et al. 2005].

2. Avaliação

2.1. Adaptações nos Algoritmos de Controle de Densidade

Zhang e Hou [Zhang and Hou 2005] sugerem que o OGDC necessita de ajustes para a cobertura-3, além de indicarem este problema como uma direção futura de seus estudos. Os ajustes sugeridos fizeram com que o algoritmo se comportasse como esperado.

O GAF utiliza uma grade virtual com células retangulares de lado $w = R/\sqrt{5}$, onde R é o raio de comunicação. Para garantir a cobertura-3, podemos redefinir o lado para $w' = R_s/\sqrt{5}$, onde R_s é o raio de **sensoriamento**. Intuitivamente podemos argumentar que isto leva, na verdade, à cobertura-5 na célula (i, j) , já que um evento ali seria captado pelos sensores nas células (i, j) , $(i - 1, j)$, $(i + 1, j)$, $(i, j - 1)$, $(i, j + 1)$. No entanto, nossos experimentos mostram que $w = R_s/\sqrt{5}$ nos dá cobertura-4; a diferença se dá por causa das células nas bordas. Através da variação de w , observamos o seguinte: quando $w = 0.884R_s$, o número médio de sensores que cobrem cada ponto da rede é 3. Nossos experimentos indicam que o referido valor de w levou, de fato, à um aumento da cobertura média em comparação à $w = R_s/\sqrt{5}$.

O A3 desliga tantos nós que inviabiliza a trilateração de um alvo. Entretanto, utilizamos suas ideias fundamentais e elaboramos uma variação do algoritmo. Ao invés de tentarmos encontrar a árvore cuja topologia consiste dos vizinhos com maior distância entre si, montamos uma árvore onde os nós da topologia são aqueles mais próximos da borda do disco de sensoriamento dos nós que iniciam o algoritmo.

2.2. Metodologia

Os experimentos foram feitos no simulador Sinalgo [Distributed Computing Group 2010]. Nós são distribuídos pela área de interesse de forma aleatória uniforme; após isto, um algoritmo de localização e um de controle de densidade são executados em sequencia. Os nós que estão localizados e ligados após a execução destes algoritmos são capazes de identificar a presença do alvo, desde que esteja à uma distância de no máximo R_s .

O tempo no Sinalgo é discretizado e baseia-se em *rounds*. A duração de uma instância da simulação vai até 100.000 *rounds*. A simulação também pode ser terminada caso a cobertura-3 de determinado ponto da área de sensoriamento seja inferior à 60% por um tempo superior à duração de um *round* de controle de densidade.

A imprecisão da estimativa entre dois sensores A e B é simulada através de um ruído gaussiano com média $0,1d$ e variância $0,01d$, onde d é a distância cartesiana entre A e B . O modelo de energia utilizado é semelhante àquele utilizado por Xu e Estrin [Xu et al. 2001]: se a quantidade de energia utilizada para manter um nó ativo por um *round* é de $1,0J$, então o nó necessita de $1,6J$ para transmitir uma mensagem e de $0,0025J$ para permanecer em *stand-by*. Os nós recebem energia o suficiente para permanecerem ativos por 25.000 *rounds* sem enviar ou receber mensagens. O modelo de mobilidade utilizado para simular o movimento do alvo é o Correlated Random Walk (CRW) [Gillis 1955]; isto gera o tráfego na rede. Os parâmetros deste modelo de mobilidade foram configurado para que ele simule o movimento de um animal com velocidade média de aproximadamente $3,9m/s$.

A área da rede é fixada em $70 \times 70m^2$. Cada experimento consiste em utilizar 256, 512 ou 1024 nós com todas as combinações possíveis dos algoritmos de localização

(localização exata, RPE e DPE) e de controle de densidade (OGDC, GAF e A3). Para medir a cobertura-3, nós criamos uma grade virtual com 100 pontos dentro da área de sensoriamento. Cada ponto desta grade deve estar dentro do raio de sensoriamento de pelo menos 3 sensores. Após cada *round* da simulação, a porcentagem da área com cobertura-3 é registrada. Como prova de conceito, as tabelas de roteamento são montadas periodicamente com o AODV [Perkins et al. 2003]. O raio de comunicação é fixo em $15m$ e o raio de sensoriamento é fixo em $7,5m$. O número de instâncias de cada experimento é 32. Desta forma, temos um total de 864 simulações.

2.3. Resultados

Tanto o OGDC quanto o A3 utilizam o conceito de *rounds* (diferente de um *round* da simulação). No contexto dos algoritmos de controle de densidade, um *round* significa o período de tempo entre duas execuções do algoritmo de controle de densidade. Por isso, podemos observar uma queda periódica na cobertura-3 para estes dois algoritmos. Em outras palavras, todos os nós são desativados para a reconfiguração da rede e nenhum deles pode detectar o alvo. Já no GAF, um nó manda mensagens periódicas para determinar se sua célula possui um sensor ligado. Caso não haja, o nó assume o papel de sensor daquela célula. O resultado disto é que a cobertura-3 do GAF não apresenta descontinuidades tão perceptíveis quanto aquelas do OGDC e do A3 (Figura 6).

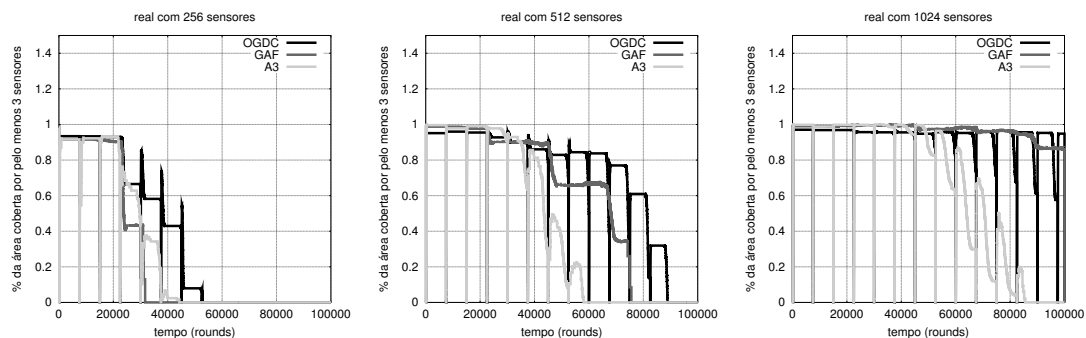


Figura 6. Determinando o Algoritmo de Controle de Densidade para Cobertura-3.

A Figura 6 mostra ainda como a cobertura-3 se comporta no tempo com os diferentes algoritmos de controle de densidade com localização exata; o mesmo comportamento é observado quando os algoritmos de localização (RPE e DPE) são introduzidos. O A3 não apresenta performance satisfatória em comparação aos demais algoritmos de controle de densidade avaliados. Sua única vantagem é que a cobertura-3 não é influenciada pela escolha do algoritmo de localização, como ocorre com o GAF e com o OGDC. O OGDC é claramente superior com $n = 256$ e $n = 512$; não fica claro o que é mais apropriado para $n = 1024$. Neste caso, a Figura 7 poderia levar a acreditar que o GAF é melhor que o OGDC. Esta aparente melhora acontece porque a simulação acaba antes de podermos observar uma degradação maior na cobertura-3 do GAF e o GAF não apresenta as descontinuidades do OGDC. Entretanto, se o tempo máximo de simulação fosse estendido para 200.000 *rounds*, por exemplo, observaríamos a superioridade do OGDC, como acontece com $n = 512$ e $n = 256$.

Uma vez que foi estabelecido que o OGDC é, dentre os algoritmos avaliados, aquele mais apropriado para a manutenção da cobertura-3, é necessário determinar com

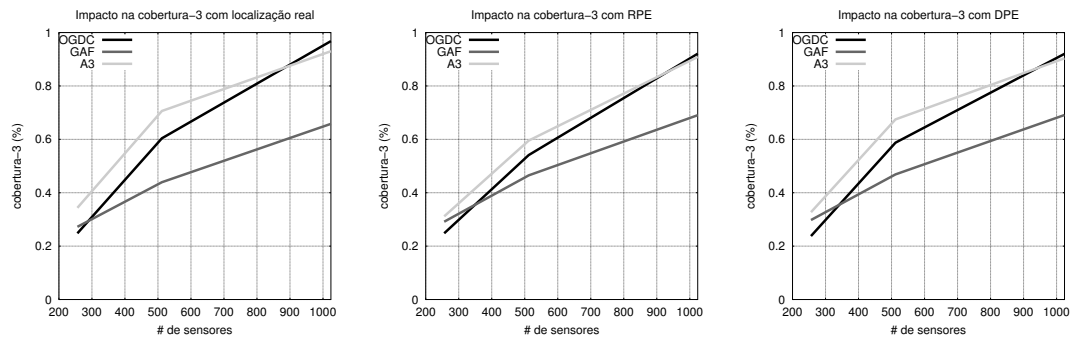


Figura 7. Análise Combinada de Localização e Controle de Densidade na Cobertura-3

que algoritmo de localização o OGDC funciona melhor. A Figura 8 traz uma comparação do OGDC com os dois algoritmos de localização e a localização exata (*baseline*). Podemos observar, na Figura 8, que o OGDC mantém a cobertura-3 por mais tempo quando utilizado com localização exata, DPE e RPE, respectivamente. Na prática, o DPE é a melhor solução, já que a localização real é inviável.

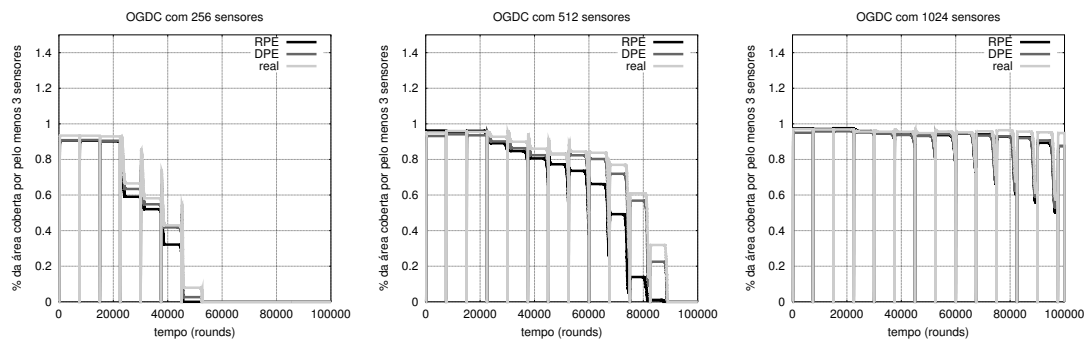


Figura 8. Determinando o Algoritmo de Localização para Cobertura-3.

3. Considerações Finais

Neste artigo, avaliamos como combinações de mecanismos de localização e algoritmos de controle de densidade afetam a cobertura-3 de uma RSSF. Para esta análise, utilizamos a localização real, RPE e DPE para os mecanismos de localização, já que o RPE é a solução pioneira e o DPE é mais preciso e barato. Os algoritmos de controle de densidade utilizados foram o OGDC, GAF e A3.

O OGDC teve o melhor desempenho; sua superioridade em termos de cobertura-3 chegou a ser de 37% em redes de baixa densidade ($n = 256$). O GAF, por sua vez, é interessante por não apresentar as mesmas discontinuidades que o OGDC e o A3. Desta forma, o algoritmo pode rastrear um alvo por mais tempo do que o OGDC antes que os nós comecem a ficar sem energia. O A3, por sua vez, apesar de não sofrer influência dos algoritmos de localização, é bastante inferior aos demais na manutenção da cobertura-3.

Os trabalhos futuros avaliarão se uma alta cobertura-3 implica também em uma melhor qualidade de rastreamento (menor erro médio), ou se outras combinações de algoritmos podem levar à um rastreamento mais preciso, apesar da cobertura-3 reduzida.

4. Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), sob o processo 55.4087/2006-5 (SAUIM).

Referências

- Albowicz, J., Chen, A., and Zhang, L. (2001). Recursive position estimation in sensor networks. In *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Network Protocols*, pages 35–41, Riverside, USA.
- Boukerche, A., Oliveira, H. A., Nakamura, E. F., , and Loureiro, A. A. (2007). Localization systems for wireless sensor networks. *IEEE Wireless Communications*, pages 6–12.
- Cerpa, A. and Estrin, D. (2004). Ascent: Adaptive self-configuring sensor networks topologies. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, pages 272–285.
- Distributed Computing Group (2010). Sinalgo. <http://disco.ethz.ch/projects/sinalgo>.
- Gillis, J. (1955). Correlated random walk. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, pages 639–651.
- Gui, C. and Mohapatra, P. (2004). Power conservation and quality of surveillance in target tracking sensor networks. In *Proceedings of the 10th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 129–143, New York, NY, USA.
- Niculescu, D. and Nath, B. (2001). Ad hoc positioning system (aps). In *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference*, pages 2926–2931, San Antonio, TX, USA.
- Oliveira, H. A., Nakamura, E. F., Loureiro, A. A., and Boukerche, A. (2005). Error analysis of localization systems in sensor networks. In *Proceedings of the 13th ACM International Symposium on Geographic Information Systems*, pages 71–78, Bremen, Germany.
- Oliveira, H. A., Nakamura, E. F., Loureiro, A. A., and Boukerche, A. (2009a). Dv-loc: a scalable localization protocol using voronoi diagrams for wireless sensor networks. *IEEE Wireless Communications*, pages 50–55.
- Oliveira, H. A. B. F., Boukerche, A., Nakamura, E. F., and Loureiro, A. A. F. (2009b). An efficient directed localization recursion protocol for wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Computers*, pages 677–691.
- Perkins, C., Belding-Royer, E., and Das, S. (2003). Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing.
- Shang, Y. and Shi, H. (2004). A new density control algorithm for wireless sensor networks. In *Annual IEEE Conference on Local Computer Networks*, pages 577–578, Los Alamitos, CA, USA.
- Souza, E. L., Nakamura, E. F., and de Oliveira, H. A. (2009). On the performance of target tracking algorithms using actual localization systems for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 12th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pages 418–423, New York, NY, USA.

- Tian, D. and Georganas, N. D. (2002). A coverage-preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks. In *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, pages 32–41, New York, NY, USA.
- Wightman, P. M. and Labrador, M. A. (2008). A3: A topology construction algorithm for wireless sensor networks. In *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference*, pages 1–6, New Orleans, USA.
- Xu, Y., Heidermann, J., and Estrin, D. (2001). Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 70–84, Rome, Italy.
- Ye, F., Zhong, G., Cheng, J., Lu, S., and Zhang, L. (2003). Peas: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks. *International Conference on Distributed Computing Systems*, page 28.
- Zhang, H. and Hou, J. C. (2005). Maintaining Sensing Coverage and Connectivity in Large Sensor Networks. *Wireless Ad Hoc & Sensor Networks*, pages 89–123.