

Trabalho Final da Disciplina de Redes de Computadores

Paulo Henrique Azevêdo Filho

13 de dezembro de 2011

Abstract

This is the final project for the course of Computer Networks, on the Department of Electrical Engineering at the University of Brasilia. It comprises a thorough review of the article [3], with an explanation of the work done by the original authors, as well as a more in-depth analysis of different aspects approached on the original work, such as the real advantages it brings, how limited to certain scenarios it can be, the hypotheses they assume and how they may not hold true, possible mistakes or how really original the proposal is.

Resumo

Este é o trabalho final da disciplina de Redes de Computadores, no departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília. Ele envolve uma análise crítica minuciosa do artigo [3], com uma explicação do trabalho realizado pelos autores originais, bem como uma análise mais aprofundada de diferentes aspectos abordados no trabalho original, como as vantagens reais que ele traz, quão limitada a um conjunto limitado de cenários ele pode ser, as hipóteses assumidas e como elas podem não ser verdade, possíveis erros sistemáticos ou quão original a proposta realmente é.

Sumário

1 Introdução

2 Nós Monitores/Monitorados 2

3 Roteamento Ótimo e Agregação de Pacotes 4

4 Avaliação de Desempenho 5

5 Melhorias 5

6 Conclusão 6

1 Introdução

O trabalho em [3], denominado *Distributed Monitoring and Aggregation in Wireless Sensor Networks*, aborda, no contexto de redes de sensores, alguns temas diferentes, para então focar na redução global do consumo de energia pela rede. São estes temas:

- O problema dos nós monitorados e monitores¹, a proporção entre nós dos dois tipos e quais nós devem assumir qual papel;
- A elaboração de topologias ótimas dados os conjuntos de nós monitores e monitorados determinados:
 - Demonstração de que a geração da topologia ótima é um problema NP-Difícil;

¹No texto estes nós são chamados de *pollees* e *pollers*, e aqui serão denominados, respectivamente, como monitorados e monitores.

- Demonstração de que a topologia de pior caso, quando comparada à topologia ótima e usando as técnicas propostas pelo artigo, consome no máximo 25% a mais de energia;
- Agregação de pacotes com os resultados do sensoriamento dos diferentes nós com direção ao nó *sink*².

Para mostrar que sua abordagem traz ganhos reais, os autores optaram por três abordagens: análise numérica, demonstração matemática e uso de simulações, e embora para parte dos resultados haja tanto evidência por base matemática como por simulação, há partes para as quais apenas um tipo de resultado é usado, e nem sempre os motivos para isso são explicitados³. Além disso, com o intuito de mostrar que o trabalho é realmente inédito, os autores optaram por uma abordagem pouco convencional: ao invés de inserir a revisão bibliográfica no início do texto, para dar base aos procedimentos adotados em seguida, eles colocaram essa seção como a última antes da conclusão, dizendo o que cada uma das referências mais relevantes de fato possui de novo, e ressaltando como o que eles fizeram é diferente.

O presente texto está organizado da seguinte maneira: Na seção 2 é apresentado o problema da seleção dos nós monitores e monitorados e feita uma explicação de como os autores trataram do problema, bem como uma análise das premissas assumidas. Em seguida, na seção 3, é exibido o problema do levantamento de rotas ótimas para agregação, e a abordagem dos

²O nó *sink* é o dispositivo que irá receber os dados de todos os sensores para tratá-los da maneira adequada (acionar atuadores, fazer cálculos no caso de sensores para uso científico, etc).

³Na verdade, apenas o motivo para a omissão da demonstração de que o problema de geração de rotas de agregação ótimas é de fato NP-Difícil é dado, e é o limite de tamanho do texto. Nos demais casos, apenas os resultados numéricos ou simulados foram apresentados, sem maiores explicações.

autores é apresentada, bem como um detalhamento de aspectos importantes que os mesmos não mencionaram. Na seção 4, a metodologia para avaliação de desempenho é abordada, e os resultados obtidos pelo autor são sumarizados. Em seguida, a seção 5 propõe algumas melhorias na metodologia, e são apresentados alguns testes significativos realizados, para complementar os apresentados pelos autores. Por fim, na seção 6 serão feitas as considerações finais.

2 Nós Monitores/Monitorados

No âmbito desse trabalho, estão considerados sensores de ambiente, que podem ter sido dispersados de maneira sistemática ou aleatória, sendo apenas a última considerada para fins de generalidade. Além disso, assume-se que as posições dos nós são variáveis⁴, ou seja, a topologia pode mudar ao longo do tempo, e o método empregado tem que se adaptar a isso.

Nas redes de sensores, cada nó envia, periodicamente, os dados obtidos sobre o ambiente que os cerca, em direção ao *sink*. Há nós que possuem apenas essa responsabilidade (monitorados), enquanto outros ainda acumulam com a de verificar se determinados nós ainda estão ativos e encaminhar esses dados até o *sink* (monitores). Os nós monitorados podem se valer de duas abordagens: a reativa, segundo a qual apenas enviam dados quando solicitados pelos monitores, e a proativa, pela qual irão enviar os dados sem solicitação, a cada período de tempo t . Por não gerar tráfego de solicitação de dados, a abordagem proativa foi a escolhida nesse trabalho. É possível ver que os nós monitores têm maior trabalho de processamento, e conseqüentemente consumo de energia. Para

⁴Na realidade, a topologia pode ser alterada sem que os nós se movimentem fisicamente. Como se trata de comunicação sem fio, o acréscimo de uma fonte de interferências pode inibir um ou mais enlaces de comunicação, efetivamente modificando a topologia da rede.

auxiliar a redução do consumo global de energia na rede, os autores apontam a criação de um parâmetro para a rede, denominado k_1 , que é o menor número de enlaces de distância entre dois monitores quaisquer. Assim, a densidade de monitores na rede pode ser controlada, com um k_1 menor para maior confiabilidade, ou com ele maior para menor consumo energético.

Os nós monitores possuem um timer que dispara a cada período de tempo $T_d \geq t$. Se durante um período de T_d unidades de tempo nenhuma mensagem proveniente de um determinado nó for recebida, ele é dado como inativo pelo monitor⁵. O texto cita que nesse caso, a constatação de inatividade de um nó pode ser modelada como uma cadeia de Markov de tempo contínuo, e que há uma forte correlação entre o número de enlaces entre um nó monitorado e seu monitor e a probabilidade de falsos alarmes, que ocorrem quando um nó erroneamente é dado como inativo, quando na realidade seus pacotes apenas foram perdidos. Para isso, é definido o parâmetro k_2 , que é o número máximo de enlaces de distância entre um nó monitorado e seu monitor.

Embora intuitivamente apenas valores inteiros positivos possam ser aceitos para k_1 e k_2 , os autores admitem valores fracionários, da seguinte maneira (exemplo para k_1 , que serve de maneira análoga para k_2): os nós possuem $k'_1 = \lceil k_1 \rceil$ com probabilidade $k_1 - \lfloor k_1 \rfloor$, e $k'_1 = \lfloor k_1 \rfloor$ com probabilidade $\lceil k_1 \rceil - k_1$, que naturalmente é sua complementar.

Para a montagem do grafo com os parâmetros k_1 e k_2 os autores apresentam duas abordagens, uma determinística seguida de uma híbrida. A primeira envolve que todos os nós transmitam um pacote com seu identificador único num raio de k_1 enlaces. Então, cada um dos nós irá avaliar os pacotes recebidos e ve-

rificar se seu identificador é menor que os demais. Caso sim, ele se auto-elege como monitor, transmitindo um pacote que informa isso, num raio de k_2 enlaces. Se um nó em um dado momento receber um pacote informando que outro nó assumiu o papel de monitor, ele automaticamente assumirá o papel de monitorado, e irá fazer *broadcast* disso num raio de k_1 enlaces. Note que um nó monitorado poderá receber notificação de dois ou mais monitores. Há um parâmetro $\omega \geq 1$ que é o número máximo de monitores associados a um nó. Assim, se um nó notar a falha de seu monitor, ele poderá trocar para o próximo, caso esteja disponível. Contudo, os autores não evidenciam em momento algum como um nó monitorado pode descobrir se seu respectivo monitor falhou, uma vez que não há feedbacks do monitor aos monitorados, nem ao menos ACKs, e a abordagem para envio de dados dos sensores é proativa.

Os autores estabeleceram uma cota superior para o número de mensagens trocadas na rede caso esse algoritmo determinístico seja adotado. Assumindo, para fins de simplicidade, que $k = k_1 = k_2$, e que d é a densidade de nós na rede, então o número de mensagens é limitado por $O(k^2nd)$, o que pode ser bem alto dependendo do número de nós. Assim, para reduzir o número de mensagens trocadas no momento do *setup*, os autores propuseram uma estratégia híbrida, desse modelo determinístico com uma parte probabilística.

Além dos parâmetros k_1 e k_2 , seja ρ a probabilidade de um nó ser eleito inicialmente como monitor. No início da fase de *setup*, cada nó com probabilidade ρ se denomina monitor, de maneira não confirmada, e anuncia isso num raio de k_1 enlaces. Caso receba algum pacote similar, proveniente de um nó na mesma situação mas com identificador menor, ele passa então a se intitular como monitorado, e envia nova notificação, para que nenhum nó tenha erroneamente a informação de que aquele nó será realmente um monitor. Ao final desse procedi-

⁵A inatividade pode ser por falha do nó, falta de energia, ou mesmo por problemas na topologia, conforme apresentado anteriormente.

mento, pode haver nós que não se intitularam monitores e nem receberam pacotes de nós que o fizeram. Esses nós não rotulados irão então executar o algoritmo determinístico. Os autores dizem que a fração de nós não rotulados é pequena, mas não falam qual é seu tamanho ou como chegaram a esse resultado.

Vale ressaltar que os autores encontraram valores ótimos para ρ em função do número de nós na rede, de forma que o número de mensagens de *setup* fosse mínimo, mas o fizeram apenas de maneira numérica, sem explicitar o procedimento para tal ou fazer nenhuma análise matemática mais genérica.

Uma vez que os papéis dos nós estão bem definidos e a topologia montada, o próximo passo é definir as rotas de agregação, para reduzir o consumo de energia por meio da redução do número de pacotes transmitidos. Essa será a questão abordada na próxima seção.

3 Roteamento Ótimo e Agregação de Pacotes

Para estabelecer maneiras simples de avaliar os resultados, em primeiro lugar, os autores definiram formalmente o problema da agregação, da seguinte maneira: “Em um grafo de uma grede, dadas as relações entre nós monitores e monitorados e uma taxa constante de agregação, cada nó necessita enviar um relatório para seu monitor periodicamente. Para cada monitor, encontrar os caminhos de agregação ótimos a partir de todos os seus monitorados, de forma que o consumo de energia total seja minimizado”.

A taxa de agregação s é o número de pacotes que serão agregados por envio, e quanto maior, melhores serão os resultados em termos de economia. Os autores citam que o problema de encontrar rotas que maximizem s é um problema NP-Difícil, mas omitem a prova por falta de espaço. Contudo, mostram um algoritmo guloso

que no pior caso gera rotas 25% mais custosas que a solução ótima, não mais que isso.

A ideia é bem simples, e consiste em mostrar que, dado que um grafo de menores caminhos de várias fontes até um destino é sempre uma árvore (o que é trivial), o melhor caso é que essa árvore seja “equilibrada”, ou seja, cada nó tenha aproximadamente o mesmo número de filhos. Assim, se o número de pacotes que podem ser agregados por envio, s , é constante, ele irá estar sempre cheio (se for proporcional à profundidade da árvore). Por outro lado, se a árvore não for “equilibrada”, ou seja, alguns nós tiverem poucos ou nenhum filho, enquanto outros tiverem uma grande quantidade de filhos, tais nós serão sobrecarregados mesmo que agreguem, enquanto os demais desperdiçarão espaços livres em seus pacotes enviados.

Os autores fazem a demonstração por indução, provando que a relação de consumo de energia entre o pior e o melhor caso é de $\frac{5}{4}$ para uma árvore de profundidade 2, e depois partindo do pressuposto de que se isso vale para uma árvore de profundidade k , terá de valer para uma de profundidade $k + 1$. O ponto principal para que se possa fazer essa manipulação é que os nós mais próximos da raiz não interferem no consumo das folhas, mesmo que o oposto não seja verdadeiro. Assim, eles substituem esses nós por um único nó “virtual”, cujo consumo já é conhecido no melhor e no pior caso, e trabalham na proporção de consumo das novas folhas, adicionadas para criar mais um nível na árvore, com relação a seus pais, e de forma simples mostram que tal relação é de $\frac{5}{4}$, o que leva ao fato de que a relação também se mantém para o grafo inteiro, em uma demonstração simples e elegante.

Dado que no pior caso de roteamento o desperdício de energia é de 25%, mas que a energia poupada para gerar as rotas pode valer a pena, os autores passam a exibir simulações em cenários específicos, para mostrar que seu algoritmo de *setup* diminui o número de mensagens

na rede, enquanto reduz a quantidade de falsos alarmes.

4 Avaliação de Desempenho

Os autores realizam dois conjuntos de simulações independentes. No primeiro, comparam o número de mensagens trocadas em função de ρ esperado (obtido numericamente conforme descrito na seção 2) e simulado, e também descobrem os mínimos para diferentes números de nós na rede. Os resultados são bem próximos aos obtidos numericamente, mas os autores não exibem uma maneira analítica de se encontrar ρ que minimize o número de mensagens trocadas na rede, apenas métodos experimentais.

O segundo conjunto de simulações compara o número de mensagens trocadas e de falsos alarmes entre um algoritmo puramente probabilístico, no qual cada nó se atribui o papel de monitor com probabilidade ρ de maneira imutável, e o algoritmo híbrido proposto na seção 2. Eles mostram que enquanto o modelo híbrido obedece às restrições impostas por k_1 e k_2 , o que reduz a quantidade de falsos alarmes e o *overhead* gerado pelo excesso de monitores na rede, ou ainda a falta de confiabilidade dado um número baixo demais de monitores, e que mesmo que um *setup* gere mais mensagens do que o método puramente aleatório, isso é mais que compensado quando a agregação de pacotes é empregada. Em geral, a redução do número de mensagens trocadas na rede variou entre 60% e 80%, e o número de falsos alarmes caiu de 20% a 30%, o que são resultados muito positivos, considerando um algoritmo que é relativamente simples e tem uma fase de *setup* eficiente.

Enquanto os resultados apresentados são de fato promissores, eles não são tão detalhados no que tange à redução do volume de dados trafegados ou do consumo de energia em si. Isso é importante, pois trabalhos como [2] mostram

que o consumo de energia é proporcional ao volume em bytes transmitido ou recebido. Assim, ao contrário do que os autores fazem acreditar, uma redução de 60% a 80% no número de mensagens, embora seja economize energia, não o fará em tamanha proporção. Por isso, algumas propostas de melhorias para a metodologia foram feitas, bem como algumas simulações tentando quantificar esses ganhos que foram omitidos, e isso será apresentado na próxima seção.

5 Melhorias

Enquanto o trabalho aqui estudado é bem elaborado e em geral todas as afirmações são bem embasadas, há alguns tópicos importantes aos quais não foi dada a devida atenção. O primeiro exemplo é a questão da qualidade de serviço. Para alguns serviços de redes de sensores, especialmente monitoramento ambiental em tempo real, o aumento do *delay* ou do *jitter* causado pela agregação de pacotes pode ser prejudicial, e isso não foi mencionado adequadamente no texto.

Outro ponto importante omitido é que o aumento do tamanho dos pacotes, também devido à agregação, os deixa mais expostos num meio não confiável, que é o meio sem fios. Logo, era de se esperar um aumento na perda de pacotes, mas nos modelos adotados pelos autores, a probabilidade de perda ou corrompimento de um pacote é constante para cada envio, não refletindo esse comportamento esperado na vida real.

Ainda sobre a agregação de pacotes, os autores não explicitaram detalhes da implementação da agregação de pacotes em seu modelo, não fazendo um modelo matemático para o tamanho dos pacotes ou especificando o formato dos cabeçalhos de agregação que seriam adicionados. Assim, não é possível aferir a redução no volume de dados trafegados na rede, ou o aumento da eficiência da comunicação. Usando

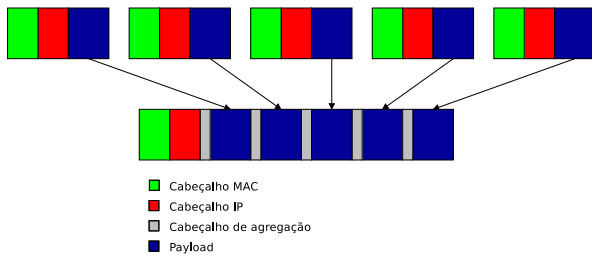


Figura 1: Formato de pacotes agregados, conforme [1].

um modelo adaptado de [1] e o mesmo simulador CQVoIP, foram feitas simulações em cenários semelhantes aos apontados pelos autores. Os detalhes omitidos mas necessários, tais como tamanhos e formatos de cabeçalhos, foram feitos usando a pilha UDP/IP/802.11b/g (modo misto). Além disso, os cabeçalhos de agregação usados possuíam 7 bytes, sendo 4 para endereço de origem, 2 para tempo de viagem e 1 para *offset* até o próximo pacote agregado. O formato dos pacotes pode ser visto na figura 1.

Os resultados obtidos nessas simulações foram consistentes com os apontados pelos autores, com uma redução de aproximadamente 66% no número de pacotes trafegados, dentro da margem de 60% a 80% apontada pelos autores. Contudo, a redução no volume de cabeçalhos foi de 55%, enquanto o *payload* se manteve constante porque não foi de fato modificado. Seguindo esse modelo, a economia de energia pelos nós foi de 29%, que embora expressiva, é muito aquém do que os autores deixam subentendido no texto.

6 Conclusão

Embora o texto analisado seja muito rico em exemplos e bem embasado, sua metodologia deixou de avaliar aspectos que podem fazer muita diferença num sistema a ser implemen-

tado na realidade. Os resultados foram promissores, e de fato a proposta de um modelo híbrido para *setup* de uma rede de sensores com nós monitores e monitorados da maneira como foi feita parece ser algo inédito. Contudo, pela falta de alguns pontos apontados na seção 5 e pela omissão de algumas demonstrações, o artigo ainda poderia ser melhorado. Com a inserção da demonstração de que o problema do roteamento ótimo para agregação é NP-Difícil, um modelo analítico para minimizar o número de mensagens de *setup* em função de ρ e maior atenção aos pontos apontados na seção 5, esse texto pode ter um arcabouço completo para a implementação de sistemas reais.

References

- [1] P. H. Azevêdo Filho, M. F. Caetano, and J. L. Bordim. A packet aggregation mechanism for real time applications over wireless networks. In *13th Workshop on Advances in Parallel and Distributed Computational Models (APDCM)*, 2011.
- [2] Juan-Carlos Cano and Pietro Manzoni. A performance comparison of energy consumption for mobile ad hoc network routing protocols. *Modeling, Analysis, and Simulation of Computer Systems, International Symposium on*, 0:57, 2000.
- [3] C. Liu and G. Cao. Distributed monitoring and aggregation in wireless sensor networks. In *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*, pages 1–9. IEEE, 2010.