

DESRO: um protocolo de roteamento com gerenciamento dinâmico de energia para redes de sensores sem fio

Arthur V. M. Dantas, Carlos de Castro Goulart, Mauro Nacif Rocha e Ricardo dos Santos Ferreira

Departamento de Informática – Universidade Federal de Viçosa (UFV)
Viçosa – MG – Brasil

arthurvmdantas@gmail.com, {[goulart](mailto:goulart@dpi.ufv.br), [nacif](mailto:nacif@dpi.ufv.br), [cacau](mailto:cacau@dpi.ufv.br)}@dpi.ufv.br

Abstract. *This paper presents DESRO (Dynamic Energy Saving Routing), a dynamic routing protocol based on ESDSR (Energy Saving Dynamic Source Routing). This protocol extends the features of ESDSR through the inclusion of an efficient route management system capable of performing a load balancing among the nodes. The aim of promoting the load balancing is to get a better energy distribution on the network to postpone the death of the nodes due to lack of energy. The results show that the route management system was able to delay the death of the nodes and to increase the data packet delivery rate.*

Resumo. *Este artigo apresenta o DESRO (Dynamic Energy Saving Routing), um protocolo de roteamento dinâmico baseado no ESDSR (Energy Saving Dynamic Source Routing). Esse protocolo estende as funcionalidades do ESDSR adicionando um eficiente gerenciamento de rotas capaz de balancear a carga de roteamento entre os nós. O objetivo do balanceamento de carga é melhorar a distribuição de energia pela rede aumentando sua vida útil, evitando a morte dos nós causada por esgotamento da bateria. Os resultados obtidos mostraram que o gerenciamento de rotas foi capaz de atrasar a morte dos nós e aumentar a taxa de entrega de pacotes de dados.*

1. Introdução

Redes de sensores sem fio (RSSFs) são um tipo especial de rede não estruturada constituída de dispositivos de pequena dimensão que são distribuídos sobre uma área a ser monitorada. Estes dispositivos – chamados “nós sensores” – capturam dados do ambiente através de sensores físicos (temperatura, movimento, acústico, etc.) e os enviam, com ou sem processamento prévio, através de comunicação sem fio a um nó especial denominado sorvedouro, que geralmente funciona como um *gateway* para outras redes; desse modo os elementos presentes nas “RSSFs tendem a executar uma função colaborativa” [Loureiro et al. 2003].

As principais características de RSSFs são, dentre outras: tamanho reduzido dos dispositivos, alta restrição de consumo de energia, baixa largura de banda e grande número de dispositivos. Essas características limitam a capacidade de processamento dos nós sensores que, além de enviar dados por eles sensoriados, costumam executar tarefas de roteamento ou agregação de dados, já que nem todos os nós sensores

alcançam diretamente o sorvedouro.

As RSSFs podem ser usadas com sucesso em diversas aplicações: sensoriamento externos (florestas, vulcões, etc.) e internos (fábricas, escritórios, etc.), e também no auxílio a diversas outras áreas de pesquisa como a biologia, onde o estudo de hábitos de animais pode ser executado com o mínimo de intervenções no ambiente. Aplicações militares, de ambientes de combate e de segurança pública têm sido impactadas pelo uso destas redes [Akyildiz 2002].

A arquitetura utilizada em uma RSSF varia de acordo com a aplicação a que a rede se destina, e suas características variam grandemente. Dependendo da necessidade da aplicação o tipo de sensoriamento pode ser reativo – enviando dados quando ocorrem eventos – ou periódico – quando os dados são enviados em intervalos de tempo, ocorrendo ou não eventos; a rede pode ainda ser móvel ou estática. Há uma forte relação entre a aplicação e os protocolos usados nas diversas camadas que compõem a rede e, desse modo, a escolha dos protocolos se dará a partir da aplicação da rede.

Além de atender a camada de aplicação os protocolos de roteamento devem ainda tratar de mudanças na topologia da rede causadas por movimento ou morte dos nós, e procurar otimizar o consumo de energia através da escolha eficiente de rotas, estendendo, desta forma, o tempo de vida útil da rede. Protocolos capazes de auto-configuração e auto-organização, isto é, não necessitam de qualquer infraestrutura ou administração, são ditos *ad hoc*.

O ESDSR (*Energy Saving Dynamic Source Routing*) [Tarique et al. 2005] é um protocolo de roteamento *ad hoc* capaz de escolher rotas cujos nós possuem maior reserva de energia através de estimativas de energia mínima restante nos nós que compõem a rota. Essa estimativa permite que a decisão do caminho a ser utilizado seja feita de maneira mais eficiente, evitando a morte prematura dos nós. Além disso, o ESDSR conta com um mecanismo de avaliação de distância entre nós, podendo com isso economizar energia através da regulagem de potência de transmissão do rádio.

Apesar de sua eficiência no consumo de energia, o ESDSR não possui todas as características desejáveis a um protocolo de roteamento *ad hoc* descritas em [Doshi et al. 2002]; são elas: escolha eficiente de rotas, controle da potência de transmissão, descoberta de novas rotas e monitoramento de rotas. O monitoramento das rotas já descobertas não é realizado pelo ESDSR e para suprir essa deficiência foi criado o DESRO (*Dynamic Energy Saving Routing*).

O DESRO é um protocolo de roteamento plano para redes de sensores sem fio criado a partir do ESDSR, herdando assim diversas características deste, como o controle de potência de rádio. O DESRO estende o ESDSR, ao adicionar um mecanismo de gerenciamento de rotas capaz de balancear a carga de roteamento. Além do mecanismo de gerenciamento de rotas, os mecanismos de descoberta de rotas e manutenção de rotas compõem o DESRO.

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 descreve alguns trabalhos relacionados; o desenvolvimento do trabalho e a exposição do protocolo DESRO são descritos na Seção 3; na Seção 4 são apontados os resultados e simulações obtidas; por fim, na Seção 5, são colocadas as considerações finais e discussão de trabalhos futuros.

2. Trabalhos relacionados

Existem diversos protocolos de roteamento para RSSFs descritos na literatura que buscam minimizar o consumo de energia causado pela tarefa de roteamento. Dentre os protocolos de roteamento pode-se destacar o SPIN (*Sensor Protocols for Information via Negotiation*) [Heinzelman et al. 1999] e *Directed Diffusion* [Intanagonwiwat et al. 2000] que usam como técnica de roteamento a consulta de dados; LEACH (*Low-energy adaptive clustering hierarchy*) [Heinzelman et al. 2000] e TEEN (*Threshold sensitive Energy Efficient sensor Network*) [Manjeshwar and Agrawal 2001] dentre os protocolos hierárquicos, e o Multi [Figueiredo et al. 2004], Multi-K [Gonçalves et al. 2008] e Multi-Geo [Silva and Goulart 2009] dentre os protocolos híbridos.

O SPIN utiliza a abordagem de nomeação dos dados sensoriados através de meta-dados. Antes de enviar um pacote de dados, o nó transmite uma mensagem anunciando que ele possui o dado; se algum dos vizinhos desejá-lo envia uma mensagem de requisição e só então o dado é transmitido; assim que o dado chega ao nó que o requisitou, é enviada uma nova mensagem de anúncio, partindo agora do novo nó; esse procedimento se repete até que o dado chegue ao sorvedouro.

O protocolo *Directed Diffusion* trabalha de maneira semelhante ao SPIN, mas neste caso é o sorvedouro quem transmite, em *broadcast*, uma mensagem de interesse à rede. Essa mensagem é na verdade uma lista de meta-dados do tipo atributo-valor contendo as informações que o sorvedouro deseja, por exemplo: (temperatura = 30; área = (0,0, 200, 200)).

O LEACH é um protocolo hierárquico capaz de definir dinamicamente quais serão os líderes de *clusters*; os *clusters* são definidos através da potência de sinal recebida pelo líder. O LEACH trabalha em redes homogêneas - todos os nós são idênticos - e, quando o líder está com pouca energia, é executado um procedimento para determinar qual nó será o novo líder. O líder possui a tarefa de roteamento e agregação de dados e o protocolo não suporta transmissões multi-saltos, o que exige que o sorvedouro esteja dentro do raio de alcance do rádio do líder. Essa característica limita o uso de LEACH, não permitindo o seu uso em sensoriamento de grandes áreas.

O TEEN é um protocolo hierárquico semelhante ao LEACH na formação de *clusters*, com a diferença de que há hierarquia nos *clusters*. Além de ser um protocolo hierárquico o TEEN utiliza a informação sensoriada, assim como os protocolos centrados em dados (*SPIN*, *Directed Diffusion*), para determinar se envia ou não uma mensagem ao sorvedouro. Assim que os *clusters* são formados, os líderes enviam dois valores de limiar aos nós sensores do seu grupo: *hard threshold* e *soft threshold*. Antes de enviar uma mensagem o nó compara o valor sensoriado com o *hard threshold* para decidir se deve ou não enviar a mensagem ao líder; se a decisão foi por enviar o valor é agora comparado com o valor enviado anteriormente. Se a diferença entre os valores for menor que o *soft threshold* a mensagem não será enviada.

O Multi é um protocolo híbrido que mistura comportamento reativo e proativo, dependendo da frequência de eventos. Quando ela é alta o Multi funciona de forma proativa, mantendo uma árvore de espalhamento com as rotas que abrangem toda a rede. Quando a frequência de eventos é baixa, o Multi opera de forma reativa. A mistura dos dois comportamentos se mostrou efetiva na redução do consumo de energia quando comparado com protocolos puramente reativos ou puramente proativos.

O Multi-K é um protocolo derivado do Multi que propôs uma redução na abrangência da árvore de espalhamento da rede para que ela abrangesse apenas os nós que estivessem efetivamente gerando transmissão de dados. Desta forma consegue-se uma redução do consumo de energia na fase de funcionamento proativo, através da redução do número de mensagens de controle para a manutenção da árvore de espalhamento da rede.

O Multi-Geo propôs modificações no funcionamento do Multi-K considerando a rede dividida em áreas geográficas, cada qual com um nó líder. A transmissão entre áreas vizinhas só pode ser feita através do nó líder. Desta forma, conseguiu-se uma redução no consumo de energia tanto na fase proativa com a hierarquização da árvore de espalhamento, quanto na fase reativa com a limitação das mensagens de difusão que passaram a ser confinadas a uma determinada região.

Outro importante protocolo é o DSR (*Dynamic Source Routing*) [Johnson and Maltz 1996]. O DSR é um protocolo *ad hoc* de roteamento para redes sem fio multi-salto que possui dois mecanismos que trabalham conjuntamente para a realização do roteamento dos dados: descoberta de rota e manutenção de rota.

O DSR assume que cada nó possui um identificador universal único. Os nós possuem tabelas de rotas em sua memória e a rota é gravada na mensagem sendo enviada, determinando o caminho exato pelo qual trafegará. Se, quando ocorrer um evento, o nó não possuir uma rota para o destino desejado, é enviada, em *broadcast*, uma mensagem *Route Request* contendo o identificador do nó originador, do destino e da mensagem. Ela é repassada até encontrar o destino que, ao recebê-la, envia então uma mensagem *Route Reply* ao iniciador da descoberta de rotas informando a nova rota. Para evitar consumo extra de energia cada nó verifica, antes de repassar uma *Route Request*, se já recebeu essa requisição anteriormente através do identificador da mensagem e do nó originador.

Se durante o uso de uma rota houver uma falha em um nó, (morte ou movimentação para fora do alcance do rádio) o nó que detectou a falha envia uma mensagem de aviso *Route Error* ao originador do pacote de dados. Esse aviso informa ao originador que a rota não está mais disponível e que uma nova rota deve ser usada. É informado também qual *link* está com problema (assim o originador pode descartar todas as rotas, em sua tabela de rotas, que usam o *link* informado). A rota antiga é então descartada da tabela de rotas e, se não houver uma rota alternativa, é acionado o mecanismo de descoberta de rotas.

O ESDSR, base para o DESRO, é uma extensão do DSR. Possui os mesmos mecanismos de descoberta e manutenção de rotas, além de melhorar a escolha da rota a ser usada numa transmissão de dados por possuir a informação de energia mínima estimada dos nós que compõem a rota (o DSR conhece apenas o número de saltos da rota).

A energia mínima estimada de uma rota é conhecida quando uma mensagem *Route Reply* passa pela rota. O nó, ao receber uma *Route Reply*, verifica a energia mínima estimada da rota gravada na mensagem e, se caso a sua energia restante estimada for menor, o valor é então atualizado na *Route Reply*. Desse modo o iniciador da descoberta de rotas recebe não apenas a sequência de nós que a mensagem de dados deve atravessar, mas também a energia mínima estimada do nó com menor reserva de energia na rota, o que possibilita uma melhor decisão no momento do envio de um novo

pacote de dados.

O valor da energia mínima estimada para um determinado nó varia de acordo com o vizinho destino. O ESDSR possui uma tabela de potências onde são armazenadas as potências de transmissão para cada vizinho. Esse valor é atualizado sempre que um pacote de dados é transmitido para o nó vizinho. O pacote de dados possui um campo contendo a potência em que foi transmitido; o nó destino calcula então a nova potência de transmissão a partir da potência transmitida e da potência recebida e a informa através do ACK. Assim, se o nó vizinho estiver perto é usada uma potência de transmissão menor, se estiver longe é usada uma potência de transmissão maior, e essa potência afeta o valor do cálculo de energia mínima estimada para uma rota.

3. O protocolo DESRO

O ESDSR possui uma boa capacidade de adaptação a mudanças na topologia da rede. Se uma rota deixa de ser capaz de realizar a entrega de dados ao sorvedouro o ESDSR rapidamente escolhe outra rota. Contudo, essa alteração na escolha da rota só é feita após a ocorrência de alguma falha.

O ESDSR usa uma rota até exaurir as reservas de energia dos seus nós; com isso a rota deixa de funcionar e só então o ESDSR altera a rota usada. O protocolo DESRO foi criado com o objetivo de suprir a deficiência do ESDSR quanto ao monitoramento de rotas, fazendo com que o nó escolha a rota com maior energia estimada, não aguardando alguma falha – que pode ser causada pelo próprio roteamento ineficiente – para alterar o caminho de transporte da mensagem. Com isso o DESRO melhora a distribuição de energia disponível na rede.

Após a descoberta de uma rota o DESRO inicia um temporizador e/ou um contador de pacotes. Assim que o temporizador zerar ou o contador de pacotes atingir um limite pré-estabelecido, é enviada uma mensagem *Route Management* que percorrerá cada nó da rota até alcançar o destino. Após o envio da mensagem de gerenciamento, o temporizador é reiniciado e o contador zerado.

O nó destino, ao receber uma mensagem de gerenciamento, envia uma *Route Reply* que passará pelo caminho inverso do percorrido pela *Route Management*. O mesmo processo que ocorre em cada nó ao repassar uma *Route Reply* gerada por uma *Route Request* ocorrerá para a *Route Reply* gerada pela *Route Management*. Desse modo o nó originador da *Route Request* receberá uma atualização para a energia mínima estimada da rota, que poderá agora ser menor que a energia de uma rota alternativa em sua cache, e poderá decidir de forma mais eficaz por qual caminho enviar um novo pacote de dados. A Figura 1 ilustra, de forma resumida, o funcionamento do DESRO.

É importante notar que a *Route Management*, assim como os pacotes de controle do ESDSR, é enviada sem qualquer confirmação de recebimento pela camada de rede, e na potência máxima de transmissão.

O envio de uma *Route Management* pode ser disparado por um:

- **temporizador:** assim que uma rota é descoberta é criado um temporizador para ela. Quando o temporizador chega a zero é momento de atualizar a energia estimada da rota; uma mensagem de gerenciamento é enviada e o temporizador é reiniciado;
- **contador de pacotes:** assim que uma rota é descoberta é criado um contador de

pacotes. Cada pacote enviado incrementa o contador que, ao chegar no limite pré-estabelecido, dispara o envio de uma mensagem de gerenciamento e é zerado;

- **temporizador e contador de pacotes:** neste caso quando uma rota é descoberta tanto o contador quanto o temporizador são criados e vai disparar o envio de mensagem de gerenciamento o evento que ocorrer primeiro: contador chegar ao limite ou temporizador zerar.

```

LOOP (evento)
  Se evento = "enviar novo pacote de dados" então
    Se houver rota para o sorvedouro então
      Envia o pacote;
      Se gerenciamento de rotas é feito por contagem de pacotes então
        Soma mais um ao contador;
        Se contador alcançou o limite pré-estabelecido então
          Zera o contador;
          Cria mensagem de gerenciamento (Route Management) e a envia;
        Fim Se
      Fim Se
    Senão
      Envia uma requisição de rota (Route Request);
      Aguarda rota colocando o pacote no buffer por um tempo pré-determinado;
    Fim Se
  Fim Se

  Se evento = "temporizador alcançou o limite pré-estabelecido" então
    Reinicia temporizador;
    Cria mensagem de gerenciamento (Route Management) e a envia;
  Fim Se

  Se evento = "chegada de pacote de dados" então
    Se nó não é o sorvedouro Repassa pacote;
  Fim Se

  Se evento = "chegada de mensagem de requisição de rota" então
    Se nó é o sorvedouro então Envia uma mensagem de resposta de rota (Route Reply);
    Senão
      Repassa mensagem;
    Fim Se
  Fim Se

  Se evento = "chegada de mensagem de resposta de rota" então
    Adiciona/Atualiza(energia mínima estimada) rota na tabela de rotas;
    Cria/Atualiza temporizador e/ou contador de pacotes
    Se houver pacote de dados esperando por rota então Envia pacote de dados;
    Se não é o destino da mensagem então
      Calcula energia mínima estimada;
      Repassa mensagem;
    Fim Se
  Fim Se

  Se evento = "chegada de mensagem de gerenciamento" então
    Se não é o destino então Repassa mensagem;
    Senão Envia uma mensagem de resposta (Route Reply) ao originador;
  Fim Se
FIM LOOP

```

Figura 1: Pseudo-código do DESRO

4. Simulações e resultados

A fim de comparar os protocolos ESDSR e DESRO foram feitas simulações usando o Castalia [Castalia 2009], um simulador de eventos discretos específico para RSSFs, construído sobre o framework Omnet++ (OMNET++, 2009) – um framework de simulação de redes genérico – desenvolvido em C++ e que possui licença Academic Public License (APL, 2009) (mesma do Omnet++).

Foram realizadas 40 simulações, 20 com distribuição em grade dos nós e 20 com distribuição não uniforme, simulando uma aplicação de sensoriamento ambiental de uma área de 160x360 metros, onde 49 nós coletam dados do ambiente a cada 10 minutos e os enviam ao sorvedouro. A área é sensoriada por um mês e os nós possuem 20 Joules de energia inicial na distribuição em grade e 10 Joules na distribuição não uniforme. A Figura 2 ilustra as distribuições em grade e aleatória uniforme.

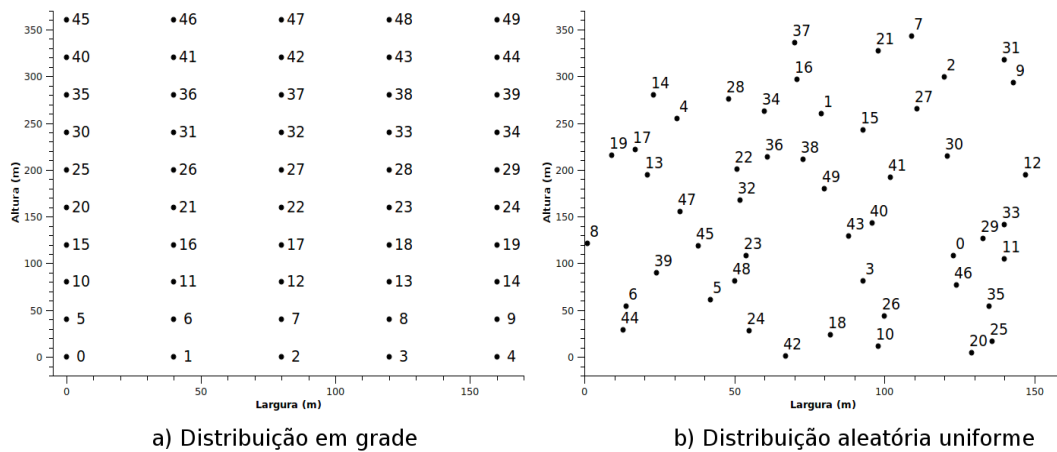


Figura 2: Topologias de rede: em grade (a) e aleatória uniforme (b)

Foi utilizada uma escala de tempo de 30:1 e, deste modo, cada dia durou 2880 segundos, fazendo com que cada simulação durasse 86400 segundos (para 30 dias). No início da simulação os nós acordam aleatoriamente entre 5 e 20 segundos e passam a transmitir, a cada 20 segundos, uma mensagem ao sorvedouro contendo 20 bytes de dados, referente ao sensoriamento do ambiente. Os 5 segundos iniciais da simulação são reservados ao T-MAC [Dam and Langendoen 2003] – protocolo de camada MAC usado nas simulações – para que possa realizar a sincronização dos nós. O T-MAC foi configurado com quadro de tempo de 610 milisegundos e controle RTS/CTS/ACK para transmissões *unicast*.

O gerenciamento de rotas do DESRO foi configurado com temporizador de 14.400 segundos e contador de pacotes para 144 transmissões. Desse modo, a rota sendo utilizada num dado momento terá sua energia mínima estimada atualizada assim que completar o equivalente a 1 dia de transmissão, enquanto que as rotas não utilizadas terão suas energias mínimas atualizadas a cada 5 dias. Os valores do temporizador e contador foram escolhidos a fim de que o gerenciamento de rotas consumisse abaixo de 1% da energia consumida com a transmissão de dados.

Como módulo de rádio foi utilizado o CC2420 usando modulação ideal, a fim de que não ocorressem falhas na transmissão causadas pela modulação do rádio; o modelo de propagação utilizado foi o *two ray path loss*, sem *fading*.

O modelo de consumo de energia utilizado considera apenas a energia usada nas transmissões (dados e controle), não considerando a energia gasta pelo controle da MAC (RTS/CTS/ACK). Esse modelo é similar ao utilizado no estudo original do ESDSR [Tarique et al. 2005]. A diferença entre os modelos reside no fato de que no estudo do ESDSR foi considerada a energia gasta com pacotes de controle da camada MAC.

4.1. Análise comparativa do ESDSR e DESRO em cenário com distribuição em grade

Nas simulações com distribuição em grade os nós foram distribuídos em forma de *grid*, distando 40 metros entre si. O nó 49, no canto superior direito (Figura 2(a)), atuou como sorvedouro.

O total de mensagens geradas pela rede para as 20 simulações foi de 4.233.363 para o DESRO e 4.223.242 para o ESDSR. A explicação para essa diferença de 10.121 mensagens a mais, criadas quando o DESRO estava em uso, é que alguns nós esgotaram suas baterias durante as simulações com o ESDSR e, portanto, pararam de gerar pacotes de dados.

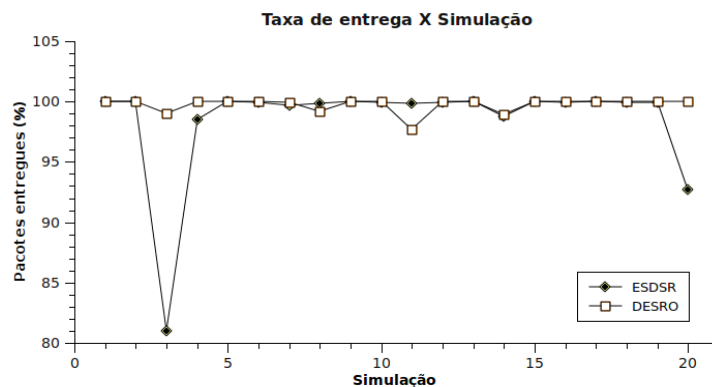


Figura 3: Taxa de entrega por simulação.

O DESRO, não apenas gerou mais pacotes de dados como também os entregou mais ao sorvedouro. Foram 4.222.325 (99,74%) mensagens recebidas quando usando DESRO e 4.160.242 (98,51%) quando usando o ESDSR; uma diferença de 62.083 mensagens, não computando mensagens repetidas. A Figura 3 exibe os resultados por simulação.

A maior taxa de entrega por parte do DESRO é justificada pelo melhor roteamento dos dados devido ao gerenciamento de rotas. O ESDSR, em alguns momentos, usou uma rota até que um dos nós esgotasse completamente sua bateria, para só então alterar sua escolha. Esse esgotamento de bateria dos nós prejudicou o roteamento e, conseqüentemente, a taxa de entrega (picos baixos no gráfico), apesar da boa resposta do ESDSR a mudanças na topologia da rede.

Por outro lado o gerenciamento de rotas consome tempo e banda, aumentando o tempo de resposta da rede, isto é, o tempo desde a criação de um pacote até sua chegada ao sorvedouro. Os tempos médios foram de 3,645 segundos para o DESRO e 2,95 segundos para o ESDSR. Desse modo o DESRO obteve tempo de resposta cerca de 23,6% maior.

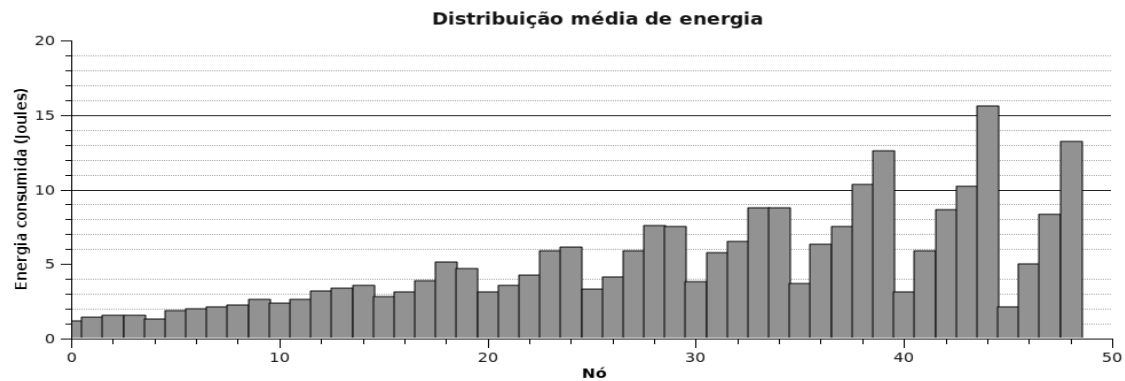


Figura 4: Distribuição média de energia no ESDSR

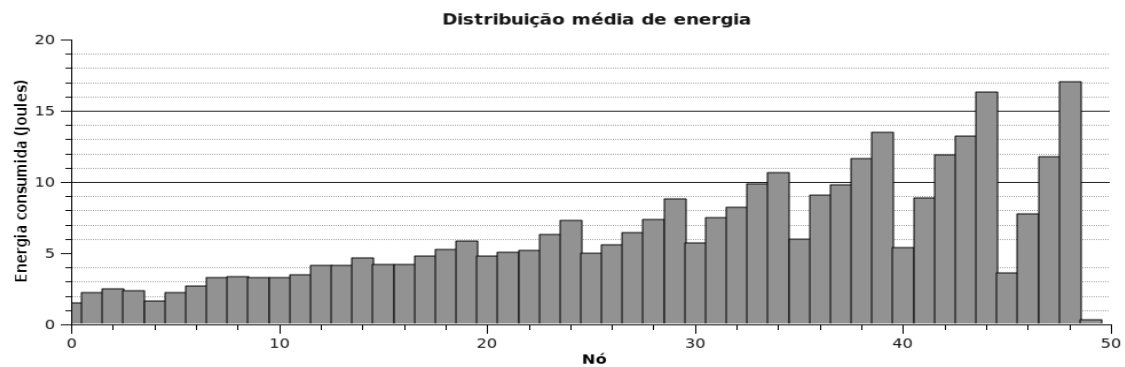


Figura 5: Distribuição média de energia no DESRO

O objetivo principal da inclusão de gerenciamento de rotas ao ESDSR é melhorar a distribuição de energia disponível na rede, impedindo que alguns nós fiquem sobrecarregados com o roteamento de pacotes e acabem esgotando completamente suas baterias. Analisando a distribuição média de energia na rede tem-se a impressão de que o ESDSR produz uma distribuição tão boa quanto o DESRO. O que acontece de fato é que a média aritmética camufla a grande variação na distribuição de energia verificada durante simulações do ESDSR.

Os valores médios do desvio padrão e variância para o consumo de energia, calculados para os nós com maior consumo nas simulações - eles são responsáveis pelo roteamento de grande quantidade de pacotes e estão mais próximos do sorvedouro, formando, portanto, a área onde o gerenciamento de rotas precisa otimizar de forma mais efetiva a escolha do caminho por onde o pacote de dados deverá ser transmitido – confirmam a eficiência do gerenciamento de rotas no balanceamento da tarefa de roteamento e sua efetividade numa melhor distribuição de energia. Para o ESDSR o desvio padrão e a variância são respectivamente 5,56 e 31,87 enquanto que para o DESRO os valores são respectivamente 3,71 e 14,04. Desse modo, o desvio padrão do DESRO foi 49,90% menor que o desvio padrão do ESDSR.

Devido à falta de gerenciamento de rotas o ESDSR foi incapaz de impedir a morte de nós durante as simulações. No total de 20 simulações houve 13 mortes devido ao esgotamento de bateria. Por outro lado o DESRO foi plenamente capaz de impedir a morte dos nós da rede, não havendo morte por esgotamento de bateria em nenhuma das

simulações. O maior consumo verificado ao fim das simulações em um nó usando o DESRO foi de 18,94 Joules, consumindo assim 94,7% da energia disponível.

Para a distribuição em grade todo o tráfego de dados deve passar necessariamente ou pelo nó 44 ou pelo nó 48 para chegar ao sorvedouro (Figura 2(a)). Observando o consumo de energia destes nós pode-se confirmar que o mecanismo de gerenciamento de rotas se mostrou eficaz no balanceamento de carga de roteamento e de consumo de energia. O DESRO conseguiu que o consumo de energia dos nós 44 e 48 se mantivessem semelhantes, estendendo a vida útil da rede, além de aumentar a taxa de entrega de pacotes. As Figuras 6 e 7 ilustram o consumo dos nós 44 e 48 em cada simulação.

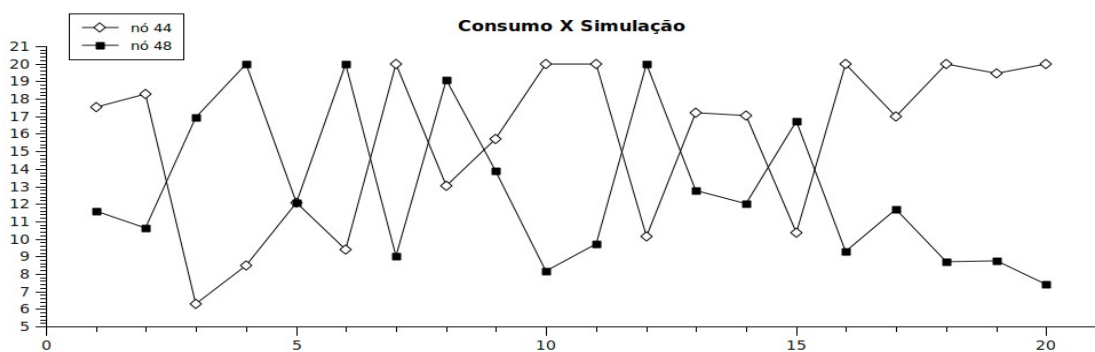


Figura 6: Consumo dos nós 44 e 48 no ESDSR.

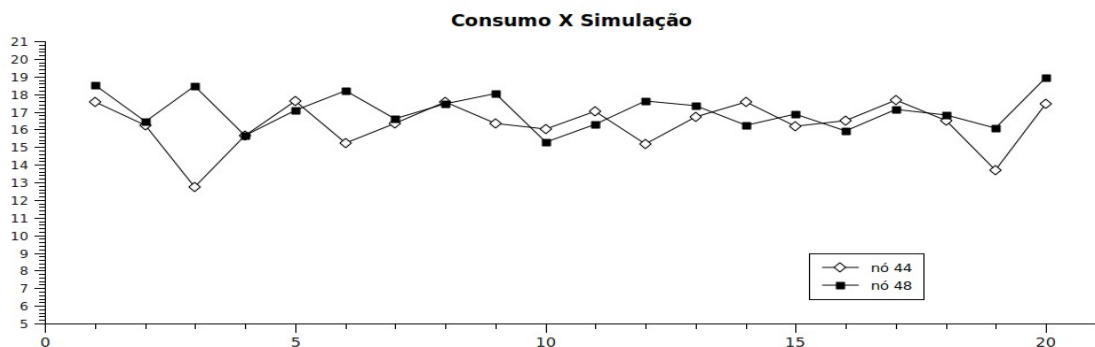


Figura 7: Consumo dos nós 44 e 48 no DESRO.

O consumo médio de energia com pacotes de controle foi de 12,34 Joules para o ESDSR e 9,59 Joules para o DESRO, mostrando que o DESRO consumiu 28,68% menos energia com controle. Isso pode ser explicado pelo fato de que quando um nó em uma rota em uso morre o ESDSR e DESRO geram pacotes de controle a fim de que a nova topologia seja conhecida pelos outros nós. As rotas que continham o nó morto são descartadas e novas rotas são descobertas através de mensagens *broadcast* usando algoritmo de inundação, consumindo assim muita energia. Como o DESRO evitou a morte de nós o tráfego de pacotes de controle foi menor, mesmo computando os pacotes de controle usados no gerenciamento das rotas.

Por outro lado o consumo de energia do DESRO com pacotes de dados foi cerca de 30% maior (71,52 Joules). Este maior consumo é causado por dois fatores: o DESRO

gerou 10.121 pacotes de dados a mais do que o ESDSR; o total de mensagens de dados repetidas recebidas pelo sorvedouro foi de 453.667 para o DESRO e 229.755 para o ESDSR, uma diferença de 223.912 mensagens. O maior tráfego causado pelo gerenciamento de rotas fez com que a MAC tivesse mais trabalho durante as transmissões, resultando um maior número de retransmissões.

4.2. Análise comparativa do ESDSR e DESRO em cenário com distribuição aleatória uniforme

Nas simulações com distribuição aleatória uniforme a posição dos nós foi definida de forma aleatória pelo simulador e o sorvedouro (nó 49) foi colocado no centro da área (Figura 2(b)).

Assim como na distribuição em grade, o DESRO, na distribuição aleatória uniforme, gerou mais pacotes de dados que o ESDSR, 4.232.961 contra 4.213.059 (diferença de 19.902 pacotes), além de entregá-los mais ao sorvedouro, 99,50% contra 99,19%, entregando 33.075 mensagens a mais que o ESDSR.

Os tempos médios de resposta foram de 2,56 segundos para o DESRO e 2,13 segundos para o ESDSR; o DESRO obteve tempo de resposta cerca de 20,2% maior.

A distribuição média de energia encontrada para o DESRO e ESDSR são semelhantes, com uma ligeira vantagem para o DESRO. Os valores médios de desvio padrão são de 2,45 Joules para o ESDSR e 2,37 Joules para o DESRO. As Figuras 8 e 9 ilustram a distribuição média de energia para o ESDSR e DESRO respectivamente.

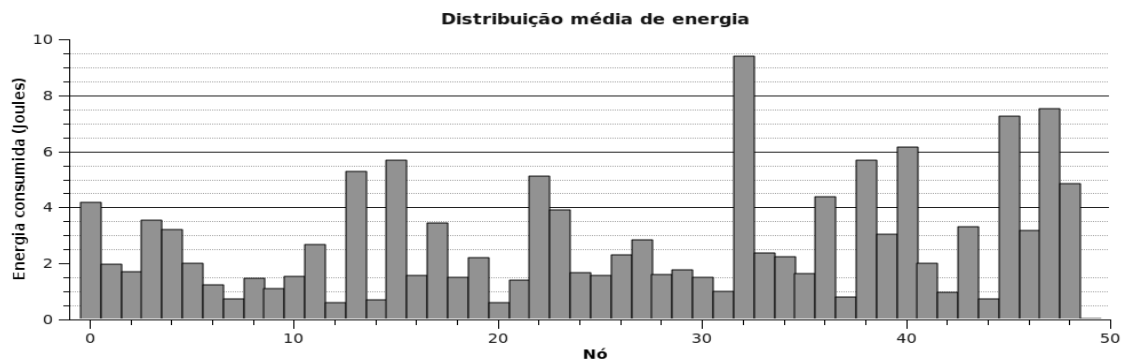


Figura 8: Distribuição média de energia no ESDSR.

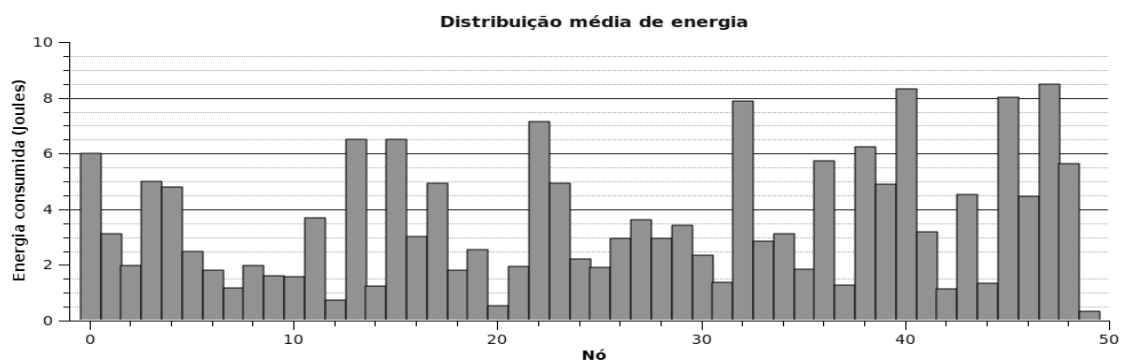


Figura 9: Distribuição média de energia no DESRO.

Mesmo com o gerenciamento de rotas do DESRO houve, no total de 20 simulações, 2 mortes de nós. Porém este valor é inferior ao valor encontrado para o ESDSR que teve 25 mortes de nós na rede no mesmo número de simulações.

O gerenciamento de rotas foi capaz de diminuir o total de mortes causadas por esgotamento da bateria dos nós, porém aumentou o consumo total de energia da rede. A energia média gasta com controle no ESDSR foi de 1,12 Joules enquanto que o DESRO gastou em média 7,02 Joules com pacotes de controle. O aumento se deu também para a energia gasta com pacotes de dados; o ESDSR gastou 134,9 Joules com dados enquanto que o DESRO gastou 165,13 Joules, um aumento de cerca de 22,41%.

5. Conclusões e perspectivas futuras

Neste artigo foi apresentado o protocolo DESRO, que consiste de alterações do protocolo ESDSR para a inclusão de funções de gerenciamento de energia na definição do roteamento. A inclusão de gerenciamento de rotas ao ESDSR teve por objetivo postergar a morte de nós através de um balanceamento de carga de roteamento e produzir uma melhor distribuição de energia na rede. Pode-se inferir, através das simulações realizadas, que o objetivo foi alcançado.

Os resultados das simulações mostram que o DESRO obteve taxas de entrega melhores que as taxas obtidas com o ESDSR. O DESRO evitou completamente a morte de nós na distribuição em grade, não havendo nenhum nó inativo por falta de energia ao final das 20 simulações, tendo apenas 2 nós mortos nas simulações com distribuição aleatória uniforme. O ESDSR por sua vez teve 13 nós mortos na distribuição em grade e 25 na distribuição aleatória uniforme.

O gerenciamento de rotas consome mais energia mas, por outro lado, economiza ao evitar o envio de novos pacotes de descoberta de rotas. Em algumas simulações a economia de energia alcançada por não enviar pacotes de descoberta de rotas compensou o consumo com pacotes de gerenciamento, em até 100%.

O DESRO consumiu mais energia que o ESDSR com a transmissão de pacotes de dados e esse aumento no consumo é explicado por dois motivos principais: o DESRO gerou mais mensagens de dados, tanto na distribuição em grade quanto na distribuição aleatória uniforme; a escala de tempo usada na simulação fez com que o tempo gasto com o gerenciamento de rotas fosse desproporcional ao período de envio de mensagens de dados, havendo assim mais retransmissões de pacotes. É de se esperar que em uma aplicação real de monitoramento, usando os mesmo parâmetros do presente estudo, com exceção da escala de tempo, o DESRO consuma, com pacotes de dados, a mesma quantidade de energia que o ESDSR.

Apesar dos bons resultados apresentados o DESRO pode se tornar ainda mais eficiente. Alterações no gerenciamento de rotas podem gerar um melhor balanceamento de carga consumindo os mesmos recursos utilizados pelo gerenciamento atual. O DESRO utiliza uma estimativa de carga simples, atualizando o contador de uso da rota apenas para os pacotes de dados gerados pelo próprio nó. Uma abordagem mais precisa, contando também os pacotes roteados que utilizaram a rota, pode realizar uma melhor distribuição de energia por possuir uma melhor estimativa de carga.

A atualização de energia estimada na tabela de rotas interfere apenas na escolha

de rotas para pacotes de dados gerados pelo próprio nó, ou seja, não interfere no roteamento de outros pacotes de dados. É possível que uma alteração na decisão de roteamento, agora usando informações da sua própria tabela de energia de rotas, leve a uma economia e melhor distribuição de energia, por permitir que a rota especificada no cabeçalho do pacote de dados seja alterada por um nó cuja tabela de energia estimada seja mais atual do que a tabela do nó gerador do pacote.

A distribuição de energia alcançada pelo gerenciamento de rotas varia com a posição do sorvedouro. Se houver apenas um caminho para o sorvedouro o gerenciamento de rotas poderá ter uma influência ruim sobre a rede porque não conseguirá balancear a carga de roteamento, além de aumentar o consumo de energia com pacotes de controle. Por outro lado, se houver vários caminhos ou ainda vários sorvedouros, o gerenciamento de rotas poderá trazer um grande benefício ao distribuir a carga por várias rotas. Assim, o impacto do uso de mais de um sorvedouro numa rede de sensores usando o DESRO como protocolo de roteamento deve ser estudado.

References

- Akyildiz, I. F. et al. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, Elsevier, v. 38, n. 4, p. 393–422, March 2002.
- APL. Academic Public License. 2009. [Online; acessado 31-Outubro-2009]. Disponível em: <<http://www.omnetpp.org/home/license>>.
- Castalia. National ICT Australia – Castalia. 2009. [Online; acessado 31-Outubro-2009]. Disponível em: <<http://castalia.npc.nicta.com.au/>>.
- Dam, T. van; Langendoen, K. An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. [S.l.]: ACM, 2003. p. 171–180.
- Doshi, S.; Bhandare, S.; Brown, T. X. An on-demand minimum energy routing protocol for a wireless ad hoc network. In: *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*. [S.l.]: IEEE, 2002. v. 6, n. 3, p. 50–66.
- Figueiredo, C. M. S.; Loureiro, A. A. F.; Nakamura, E. F. Protocolo adaptativo híbrido para disseminação de dados em redes de sensores sem fio auto-organizáveis. In: *22º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*. [S.l.: s.n.], 2004.
- Gonçalves, R. T. ; Goulart, C. C. ; Loureiro, A. A. F. ; Figueiredo, C. M. S. . Multi-K: Um Protocolo de Roteamento para Redes de Sensores sem Fio Usando Árvores de Espalhamento Parciais. In: *XXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, 2008, Rio de Janeiro. XXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos. v. 1. p. 1-14.
- Heinzelman, W. R.; Chandrakasan, A.; Balakrishnan, H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: *Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*. [S.l.]: IEEE, 2000. p. 908–918.
- Johnson, D. B.; Maltz, D. A. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In: IMIELINSKI, T.; KORTH, H. F. (Ed.). *Mobile Computing*. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1996, (The International Series in Engineering and Computer Science, v.

353). p. 153–181.

Loureiro, A. A. F., Nogueira, J. M. S., Ruiz, L. B., Mini, R. A. D. F., Nakamura, E. F., and Figueiredo, C. M. S. (2003). *Redes de sensores sem fio. 21º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, Natal, RN, Brasil.

Manjeshwar, A.; Agrawal, D. P. Teen: A protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*. [S.l.]: IEEE, 2001. p. 1567–1576.

Omnet++. OMNeT++ Community Site. 2009. [Online; acessado 31-Outubro-2009]. Disponível em: <<http://www.omnetpp.org/>>.

Silva, A. P. ; Goulart, C. C. . Multi-Geo: um protocolo de roteamento hierárquico para redes de sensores sem fio. In: *XXXV Conferência Latinoamericana de Informática, 2009, Pelotas-RS. XXXV Latin American Informatics Conference. Pelotas-RS : UFPel / UCPel, 2009. v. CD. p. 1-10.*

Tarique, M.; Tepe, K. E.; Naserian, M. Energy saving dynamic source routing for ad hoc wireless networks. In: *Proceedings of 3rd International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks*. [S.l.]: IEEE, 2005. p. 305–310.