

Maximização da vida útil de redes de sensores sem fio utilizando fusão de dados e roteamento *fuzzy*

Rafael Lopes Gomes¹, Thiego Nunes¹, Dionne Monteiro¹, Antônio Gomes Abelém¹

¹Faculdade de Computação – Universidade Federal do Pará (UFPA)
Rua Augusto Corrêa 01, 66075-110, Belém, PA, Brasil

Abstract. *Wireless Sensor Networks (WSN) are resource constraints networks, therefore the usage of protocols of Ad Hoc networks makes WSNs out of optimum performance. Within this context, this paper presents an extension of the Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV) protocol that uses the techniques of data fusion across the network, fuzzy logic and transmission of informations through bursts to increase efficiency of energy consumption of sensors. The proposed extension, AODV - Fuzzy for Wireless Sensor Networks (AODV-FWSN), is evaluated in Network Simulator (NS-2). The simulations show that the proposed extension increases the lifetime of the network, maintaining the delivery efficiency of informations.*

Resumo. *As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são redes que possuem restrições de recursos, sendo assim o uso dos protocolos das redes Ad Hoc faz com que as RSSFs não consigam obter um desempenho ótimo. Dentro desse contexto, este artigo apresenta uma extensão do protocolo Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV) que utiliza as técnicas de fusão de dados ao longo da rede, lógica fuzzy e envio das informações através de rajadas para aumentar a eficiência do consumo de energia dos sensores. A extensão proposta, AODV – Fuzzy for Wireless Sensor Networks (AODV-FWSN), é avaliada no Network Simulator (NS-2). As simulações mostram que a extensão proposta aumenta a vida útil da rede mantendo a eficiência na entrega das informações.*

1. Introdução

Através da evolução das redes de sensores sem fio e do desenvolvimento de tecnologias como microprocessadores, comunicação sem fio, e micro sistemas eletro-eletrônicos [Akyildiz et al. 2002], uma rede pode monitorar e eventualmente controlar um ambiente.

As redes de sensores sem fio (RSSF) são compostas por pequenos dispositivos chamados nós sensores, onde os principais componentes do nó sensor são: bateria, o processador, a memória, o transceptor (responsável pela comunicação sem fio) e a unidade de sensoriamento.

Os nós da rede atuam de forma cooperativa disseminando uma determinada informação entre os outros nós até que os dados coletados alcancem um ponto de saída e possam ser processados pela aplicação cliente, este ponto de saída é denominado nó coordenador.

Há diversas aplicações para as RSSF sendo as principais relacionadas à pecuária, agricultura e ao meio ambiente. Um exemplo de aplicação é o monitoramento do microclima, onde sensores de monitoramento de temperatura e umidade estariam enviando dados da área monitorada para a estação base.

As redes de sensores sem fio diferem das redes tradicionais em muitos aspectos [Akyildiz et al. 2002]: não apresentam infra-estrutura nem ponto de acesso, apresentam diferentes consumos de energia, baixa capacidade de processamento e armazenamento, e isso infere diretamente nas características dos protocolos de roteamento.

Os protocolos de roteamento de redes convencionais e das redes Ad Hoc não se ajustam adequadamente às RSSF [Akkaya and Younis 2005], pois os nós sensores precisam de mecanismos de roteamento de forma que seu desempenho seja maximizado, tanto no processamento quanto na manutenção da energia, com isso quanto menor o consumo de energia maior será o tempo de vida de um nó em uma rede isolada.

As principais limitações das RSSFs são a diminuta quantidade de energia e de baixo processamento, devido a isso o tempo de vida da RSSF deve ser o maior possível para minimizar o custo de manutenção da rede.

Levando em consideração as limitações das RSSFs, o objetivo deste trabalho é customizar o protocolo de roteamento *Ad hoc On-demand Distance Vector* (AODV) [Perkins et al. 2002], afim de melhor adaptá-lo as RSSF e com isso garantir uma transmissão de dados mais eficaz e com menor consumo de energia.

Esta customização baseia-se nos princípios de fusão de dados ao longo da rede, lógica *fuzzy* e envio das informações através de rajadas. O objetivo com a utilização destas técnicas é fazer com que a rede proporcione um roteamento que maximize a fusão de dados e minimize o consumo de energia dos nós, garantindo uma maior longevidade para a rede. A proposta deste artigo é intitulada AODV – *Fuzzy for Wireless Sensor Networks* (AODV-FWSN).

O artigo esta organizado da seguinte forma: a Seção 2 mostra os trabalhos relacionados, a Seção 3 descreve o protocolo AODV, a seção 4 mostra o protocolo proposto AODV-FWSN, a Seção 5 descreve a avaliação da proposta e, finalmente, a Seção trata das conclusões e trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Esta seção tem por objetivo mostrar trabalhos que propõem melhorias para as RSSF sobre vários aspectos, como: fusão de dados, maior eficiência no consumo de energia e na transmissão de dados multimídia, dentre outros aspectos.

Ding [Ding et al. 2004] desenvolve uma abordagem para manter a energia da rede equivalente e maximizar a vida útil desta. Esta abordagem enfatiza a manutenção de rotas, fazendo com que nós não críticos passem a ser usados como rotas, evitando gargalos na rede.

Kalantari [Kalantari and Shayman 2004] propõe encontrar rotas eficientes energeticamente, para isto ele usa um conjunto de equações diferenciais parciais semelhantes às equações de Maxwell na teoria eletrostática. Estas equações diferenciais parciais dão os caminhos de cada sensor para o nó central (coordenador).

Zhu [Zhu et al. 2009] propôs uma modelo matemático de otimização do tempo de vida para RSSFs, visando não só garantir a comunicação confiável, mas também de equilíbrio de carga da rede, e prolongar a vida útil das redes. Contudo, não leva em consideração a fusão de dados.

Salustiano [Salustiano et al. 2007] desenvolve um sistema para monitorar alguns ambientes remotos capaz de receber, processar e armazenar dados enviados pelos sensores, aplicando algoritmos para fundir dados de sensores.

A. R. Pinto [Pinto et al. 2007] cria um modelo de fusão de dados para RSSF afim de detectar intrusos, para isso o nó coordenador recebe os dados coletados e monitora o ambiente a partir destas informações. Entretanto, este não apresentou resultados sobre eficiência energética e a fusão de dados só acontece no coordenador.

Em nenhum dos trabalhos anteriormente citados encontra-se uma proposta que tenha como objetivo prover roteamento que melhore o consumo de energia e maximize a fusão de dados na rede simultaneamente.

3. Protocolo Ad hoc On-demand Distance Vector

O AODV é um protocolo de roteamento reativo para redes Ad Hoc móveis, ou seja, as tabelas de roteamento são preenchidas durante as operações de descoberta de rota.

O objetivo principal do protocolo é adaptar-se rápida e dinamicamente às variações das condições dos enlaces da rede, descobrindo rotas de forma a se evitar o desperdício de banda e minimizar o uso de memória e processamento nos nós.

A descoberta de rotas é feita através de trocas de mensagens de requisição de rota (*Route Request* - RREQ), resposta a requisição de rota (*Route Reply* - RREP) e aviso de queda de enlace (*Route Error* - RERR).

Quando um nó deseja enviar um pacote a outro nó, mas não há rota conhecida, este envia uma mensagem RREQ via *broadcast* à seus vizinhos, caso estes não possuam uma rota para o destino, prosseguem com a inundação da rede enviando RREQ aos seus demais vizinhos até que se chegue ao destino procurado, obtendo assim a rota para o destino e a rota reversa para o envio do RREP [Perkins et al. 2002].

O RREP é enviado via *unicast* para origem, uma vez que enquanto a requisição foi sendo propagada pela rede, caminhos reversos de todos os nós alcançáveis pela requisição até a origem vão sendo armazenados [Perkins et al. 2002].

4. AODV – Fuzzy for Wireless Sensor Networks

A extensão proposta para o protocolo AODV tem como objetivo prover um roteamento que maximize a fusão dos dados da rede e que prolongue a vida da mesma. Para isso, o protocolo proposto se baseia em três características principais:

- Sistema *Fuzzy*: gera-se um custo *fuzzy* para cada nó, onde este custo é utilizado como métrica para roteamento;
- Princípio de Comutação em Rajadas: cada nó envia periodicamente uma rajada com os dados para o coordenador;
- Fusão dos Dados: os dados oriundos de outros sensores são incorporados à rajada do sensor atual.

Determina-se um custo, o *fuzzy cost* (FC), para cada nó, baseado nos valores de energia e grau de adjacência do nó, sendo que este grau de adjacência é o número de vizinhos diretos que o nó tem.

As informações de energia e grau de adjacência do nó são incorporadas às mensagens REPLY do protocolo AODV [Perkins et al. 2002], sendo assim o nó que requisitou a rota, recebe os FCs dos caminhos até o nó destino. Para isso cada nó que retransmite uma mensagem REPLY soma ao FC contido na mensagem o seu próprio FC.

A partir desse FC será possível escolher rotas em que a chance de fusão dos dados seja maior, visto que serão escolhidos os nós com grande adjacência, e que este nó não seja mais utilizado quando a sua energia se tornar crítica.

Com isso esperasse aumentar a vida da rede como um todo, fazendo com que o número de transmissões dos nós diminua e conseqüentemente a energia dos sensores se prolongue. A seguir será mostrado o sistema *fuzzy* desenvolvido e posteriormente o esquema de fusão de dados proposto.

4.1. Sistema Fuzzy Desenvolvido

A idéia de conjuntos *fuzzy* é uma extensão do conceito tradicional de conjuntos (*crisp*), onde um elemento pertence totalmente ou não a certo conjunto. Os conjuntos *fuzzy*, ao contrário, são definidos a partir de funções de pertinência cujo alcance é limitado a um intervalo entre 0 e 1. Ou seja, um valor entre 0 e 1 expressa o grau de pertinência de um elemento do conjunto *fuzzy* baseado nas inferências utilizadas. Normalmente, o grau de pertinência de um valor “x” em relação a uma função é representado por $\mu(x)$ [Adeli and Sarma 2006] [Zadeh 1965].

A seguir são mostradas as características do sistema *fuzzy* utilizado na proposta deste trabalho: funções de pertinência, o modelo de inferência, conjunto de regras e estratégia de defuzzificação considerados para a implementação da proposta.

4.1.1. Fuzzificação

O processo de fuzzificação tem como entrada os valores de energia e grau de adjacência do nó, sendo assim, são utilizadas duas funções de pertinência, as quais servem de entrada para o sistema *fuzzy*. O sistema *fuzzy* proposto utilizou funções triangulares e funções trapezoidais.

Uma função triangular possui três parâmetros: a, b e m. Sendo “a” o primeiro ponto e “b” o último ponto onde $\mu(x)$ é zero e “m” o ponto onde $\mu(x)$ possui valor 1. O grau de pertinência de uma função triangular é dado por [Adeli and Sarma 2006]:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ (x - a) / (m - a) & \text{se } x \in [a, m] \\ (b - x) / (b - m) & \text{se } x \in [m, b] \\ 0 & \text{se } x \geq b \end{cases}$$

A função trapezoidal tem 4 parâmetros: a, b, m1 e m2. Sendo “a” é o primeiro ponto e “b” o último ponto onde $\mu(x)$ é zero, os parâmetros “m1” e “m2” representam o intervalo de pontos onde $\mu(x)$ possui valor 1, ou seja, se $x \in [m1, m2] \Rightarrow \mu(x) = 1$. O grau de pertinência de uma função trapezoidal é determinado por [Adeli and Sarma 2006]:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ (x - a) / (m - a) & \text{se } x \in [a, m1] \\ 1 & \text{se } x \in [m1, m2] \\ (b - x) / (b - m) & \text{se } x \in [m2, b] \\ 0 & \text{se } x \geq b \end{cases}$$

A função de pertinência utilizada para os valores de energia recebidos é mostrada na Figura 1, possuindo três variáveis linguísticas, sendo definidas a partir de funções trapezoidais: *high*, *average* e *low*.

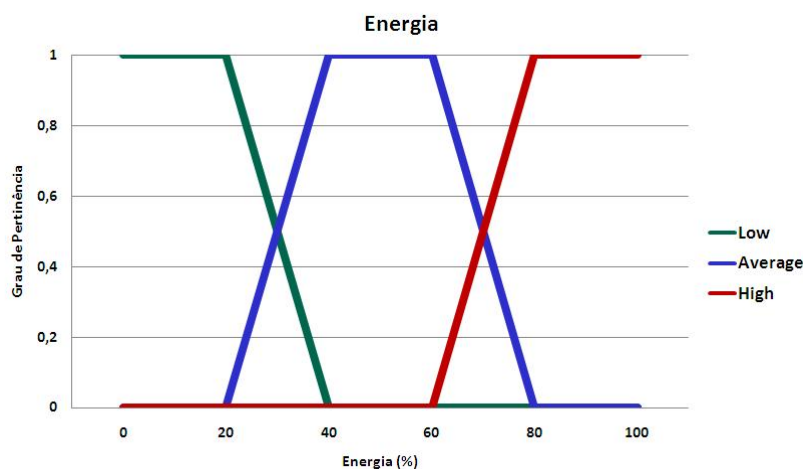


Figura 1. Função de Energia

Os valores energia que servem como entrada para a função são expressos em porcentagem. Esta função foi definida com o intuito de torná-la o mais genérica e abrangente, já que o valor numérico de medida de energia de cada sensor pode variar em função do modelo do sensor.

A função de pertinência utilizada para os valores de grau de adjacência do nó é mostrada na Figura 2, possuindo três variáveis linguísticas, sendo definidas a partir de três funções trapezoidais: *high*, *average* e *low*.

Os valores de grau de adjacência do nó representam o número de nós vizinhos diretos (adjacentes) ao nó em questão. O grau de pertinência máximo para a função “*High*” ocorre no intervalo de 7 a infinito, sendo o valor 10 usado somente para representação na função mostrada na Figura 2, ou seja, o intervalo dos valores é $[+7, +\infty]$.

4.1.2. Sistema de Inferência

O sistema de inferência utiliza a função de pertinência de saída mostrada na Figura 3, onde são expressos os possíveis valores do custo *fuzzy* (*Fuzzy Cost* - FC) e seus referentes graus de pertinência. O sistema de inferência utilizou o seguinte conjunto de regras, mostrado na Tabela 1, onde são expressas as possíveis variáveis linguísticas de saídas de acordo com as variáveis linguísticas de entrada vindas do processo de fuzzificação.



Figura 2. Função de Grau de Adjacência

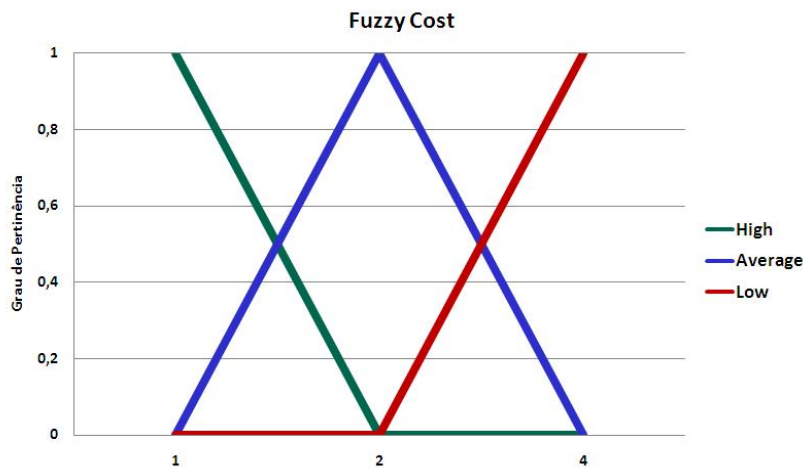


Figura 3. Função de *Fuzzy Cost*

O operador “ou”, utilizado na regra 5 da Tabela 1, representa uma operação de união de dois conjuntos *fuzzy*, que pode ser representada pela função proposta por Zadeh [Zadeh 1965]: $\mu A \cup B = \max [\mu A(x_i), \mu B(x_i)]$.

Da mesma forma o operador “e” representa a interseção entre dois conjuntos *fuzzy*, que pode ser representada pela função proposta por Zadeh [Zadeh 1965]: $\mu A \cap B = \min [\mu A(x_i)]$.

O sistema *fuzzy* proposto utilizou o modelo de inferência de Mamdani [Anderson and Hall 1999], ou seja, para todas as regras as quais o grau de pertinência, para função em questão, for maior que zero, estas irão contribuir para o cálculo de saída correspondente do sistema de inferência.

Os graus de pertinência resultantes das regras vão, por sua vez, limitar os valores dos conjuntos *fuzzy* de saída gerados por estas regras de acordo com a variável em questão, ou seja, os valores resultantes das operações feitas nas regras irão caracterizar a variável linguística resultante.

Tabela 1. Conjunto de Regras

Regra	Energia	Operação	Grau	Fuzzy Cost (FC)
1	High	e	High	High
2	High	e	Average	Average
3	Average	e	High	High
4	Average	e	Average	Average
5	Low	ou	Low	Low

A máquina de inferência tem por objetivo transformar as variáveis linguísticas de entrada em outras variáveis linguísticas correspondentes a função de pertinência de saída, no caso a função FC (Figura 3). Estas variáveis por sua vez serão convertidas em um valor *crisp*, a partir do processo de defuzzificação.

4.1.3. Defuzzificação

No processo de defuzzificação do sistema *fuzzy* proposto utilizou-se como método de defuzzificação a Média Ponderada dos Máximos [Adeli and Sarma 2006], pelo fato deste ser um método de baixo processamento e que atende o escopo da proposta. Este método produz um valor numérico considerando a média ponderada dos valores centrais ativados, sendo estes os pesos dos graus de pertinência de cada variável linguística de saída. A função de defuzzificação pode ser visualizada na equação:

$$[(1 * \mu_H(x)) + (2 * \mu_M(x)) + (4 * \mu_L(x))] / (\mu_H(x) + \mu_M(x) + \mu_L(x))$$

Onde $\mu_H(x)$ é o grau de pertinência referente à variável *High*, $\mu_M(x)$ é o grau de pertinência referente à variável *Medium* e $\mu_L(x)$ é o grau de pertinência referente à variável *Low*. Os valores 1, 2 e 4 são os valores máximos das variáveis *High*, *Medium* e *Low*, respectivamente (Figura 3).

4.2. Princípio de Comutação em Rajadas e Fusão de Dados

A extensão proposta tem como objetivo limitar o número de pacotes enviados pela rede, para isso então implementou-se um esquema de rajadas, ou seja, periodicamente o sensor envia, caso possua dados a serem enviados, uma rajada. Essa rajada é enviada nas seguintes situações:

1. Tempo de ajuste: quando o tempo de ajuste da rajada expira esta é enviada, caso não esteja vazia. Na extensão proposta o tempo de ajuste definido foi de um segundo, ou seja, a cada um segundo a rajada é enviada;
2. Tamanho Máximo: quando a rajada atinge o tamanho máximo estipulado, esta é enviada antes do período definido, e o tempo de ajuste é reiniciado. Na extensão proposta o tamanho máximo utilizado foi de 500 bytes, ou seja, quando o tamanho total da rajada é maior do que 500 bytes esta é enviada.

O esquema descrito foi utilizado, pois como em uma rede de sensores todo o tráfego se direciona ao nó coordenador, as rajadas são sempre endereçadas ao mesmo. Sendo assim os tráfegos podem ser fundidos na rede sem problemas.

A definição de um tamanho máximo para as rajadas tem como objetivo evitar que as rajadas fiquem com tamanho excessivo, o que resultaria em uma maior probabilidade de perda destas rajadas. Sendo este um problema crítico, pois quando a rajada é perdida, perde-se os dados de vários pacotes que foram incorporados às rajadas.

5. Análise dos Resultados

Esta seção tem por objetivo apresentar o comportamento do protocolo proposto AODV-FWSN, comparado com o do protocolo AODV original. A comparação se dá a partir de simulações efetuadas no *Network Simulator (NS-2)*. Na análise dos dados das simulações foi utilizado um intervalo de confiança de 99%.

O cenário utilizado para a avaliação dos protocolos foi o da rede de sensores para medição climática proposta para o campus básico da Universidade Federal do Pará (UFPA), mostrado na Figura 4. O nó 0 representa o coordenador, ou seja, todo o tráfego da rede flui para este nó.



Figura 4. Cenário Utilizado

As simulações tem por objetivo mostrar o impacto dos protocolos de roteamento no consumo de energia dos nós sensores e na perda das informações transmitidas. Os parâmetros utilizados nas simulações são mostrados na Tabela 2. Os parâmetros utilizados foram baseados nos encontrados na literatura, como nas referências [Zhu et al. 2009] e [Kalantari and Shayman 2004].

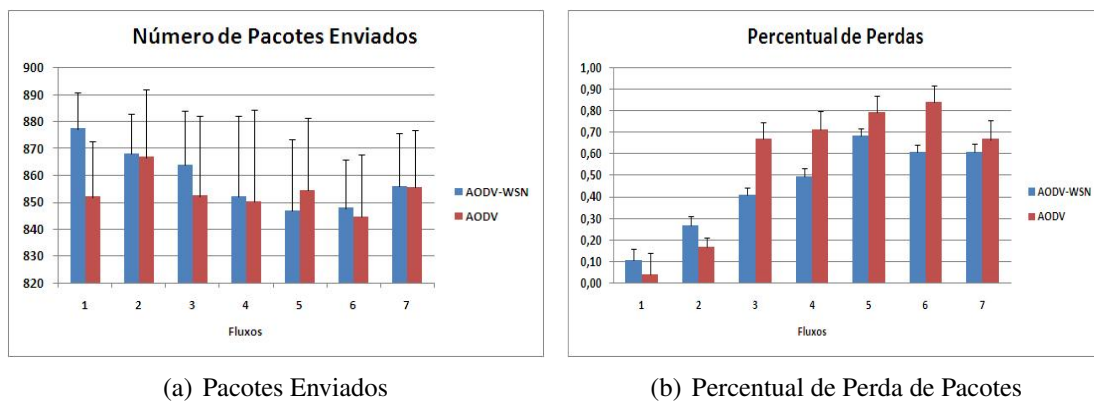
Tabela 2. Parâmetros de Simulação

Parâmetros	Valores
Energia para Transmissão	0,3 <i>Watts</i>
Energia para Recepção	0,2 <i>Watts</i>
Energia Inicial dos Nós	20 <i>Watts</i>
Energia no Modo <i>Sleep</i>	0,000000144 <i>Watts</i>
Energia no Modo <i>Idle</i>	0,00072 <i>Watts</i>
Protocolo MAC	802.15.4

Foram gerados sete tráfegos Poisson nos sensores 1, 4, 7, 9, 14, 18 e 21 em direção ao sensor coordenador (nó 0), sendo que estes iniciaram nos tempos de 31 a 37 segundos na ordem mostrada, onde cada fluxo teve a duração de 460 segundos.

A posição dos fluxos teve como objetivo distribuir os tráfegos gerados para uma maior ocupação da rede, assim exaltando as decisões de roteamento, e o impacto destas sobre a rede.

As simulações tiveram a duração de 500 segundos, e foram efetuadas 20 simulações para cada protocolo. Os fluxos Poisson utilizados possuíam pacotes de 70 bytes de tamanho e taxa de 250 kbps.



(a) Pacotes Enviados

(b) Percentual de Perda de Pacotes

Figura 5. Gráficos de Número de Pacotes Enviados e de Percentual de Perda

A Figura 5(a) apresenta o número médio de pacotes enviados por cada protocolo em relação aos fluxos definidos. Devido ao tráfego utilizador ser Poisson, este gera pacotes simulando a geração de eventos que não ocorrem constantemente, sendo assim pode-se ter a geração de diferentes quantidades de pacotes em cada simulação.

A Figura 5(b) mostra o percentual de perda médio de cada fluxo. Nota-se que o protocolo AODV-FWSN consegue uma maior eficiência quando se trata dos tráfegos de maior distância, fluxos de 3 a 7, devido ao critério de roteamento mais eficaz, ou seja, devido ao uso do custo *fuzzy*.

Entretanto, nos fluxos 1 e 2, o protocolo AODV obtêm um desempenho superior, pois estes por serem fluxos mais próximos do coordenador acabam não necessitam de um critério eficiente para definição de rotas, visto que os nós envolvidos nestes fluxos podem alcançar o coordenador com apenas um salto, ou seja, são vizinhos diretos.

Dentro deste contexto, quando ocorrem perdas o protocolo AODV-FWSN acabam perdendo mais informações, pois este incorpora todas as informações recebidas em raja-

das, que são enviadas periodicamente, ou seja, a perda de uma rajada acaba implicando na perda de mais de uma informação.

Os dados referentes à energia de cada nó durante as simulações foram divididos em seis gráficos. São mostrados os gráficos referentes às três primeiras simulações de cada protocolo.

Este esquema foi feito, pois de acordo com as rotas determinadas em cada simulação, a energia dos nós utilizados acaba mais rápido, sendo assim a utilização da média de energia se tornaria algo inviável, que não retrataria o real consumo de energia dos nós.

Visando proporcionar uma melhor visualização do consumo de energia, os gráficos de energia em relação ao tempo de cada um dos protocolos são mostrados separadamente.

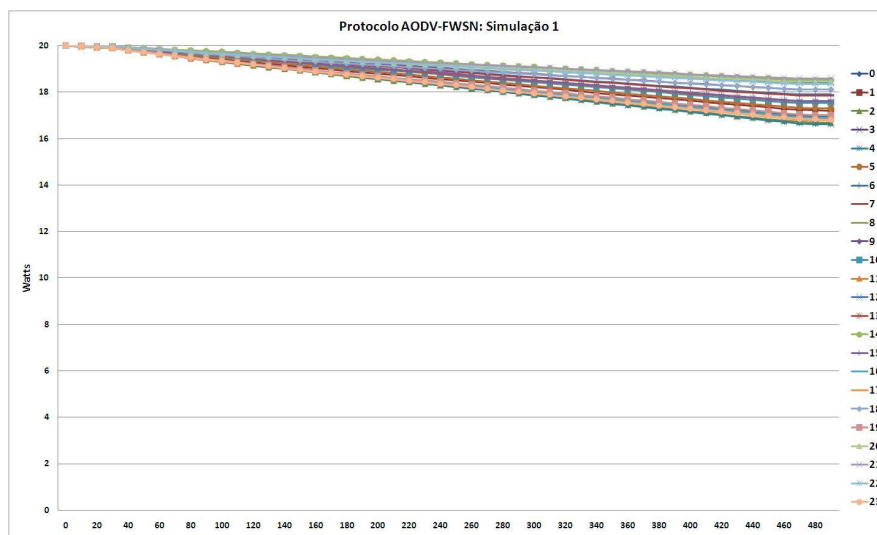


Figura 6. Simulação 1 do Protocolo AODV-FWSN

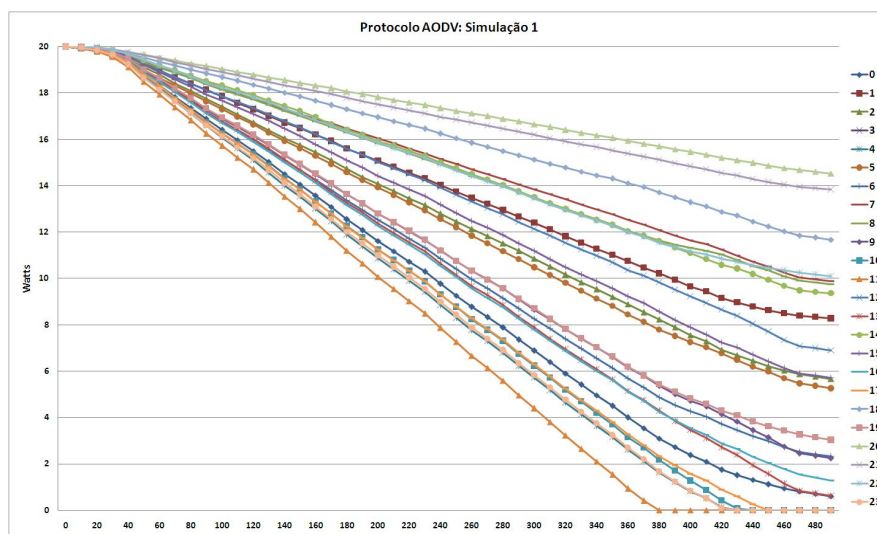


Figura 7. Simulação 1 do Protocolo AODV

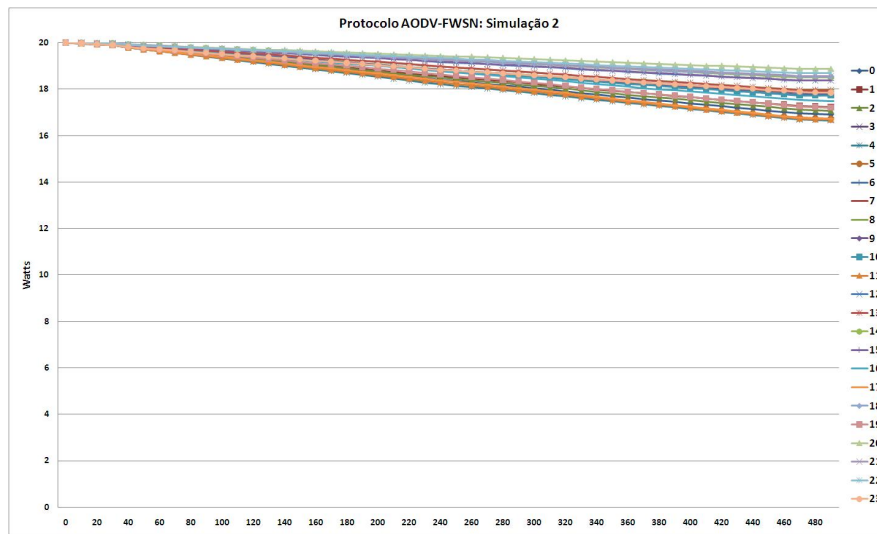


Figura 8. Simulação 2 do Protocolo AODV-FWSN

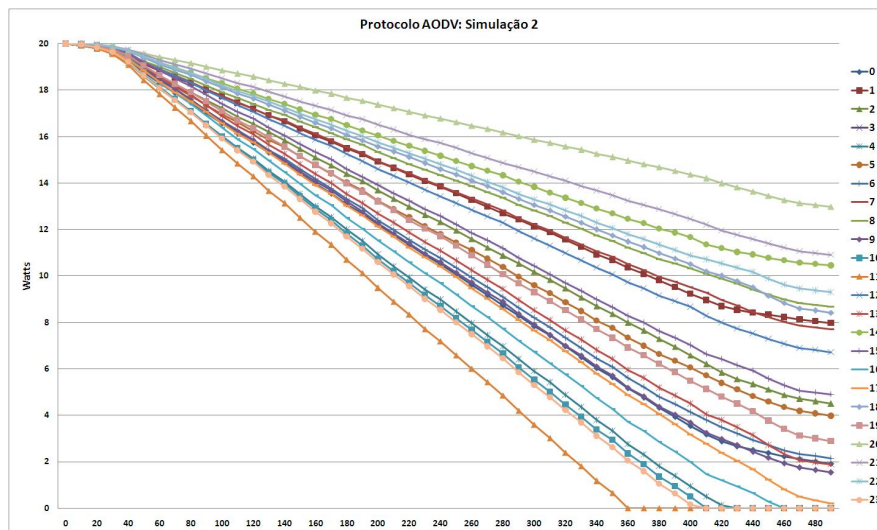


Figura 9. Simulação 2 do Protocolo AODV

As Figuras 7, 9 e 11 mostram os valores de energia dos nós em relação ao tempo de simulação quando usado o protocolo AODV. E nas Figuras 6, 8 e 10 encontram-se os valores referentes à utilização do protocolo AODV-FWSN.

A partir dos dados mostrados, percebe-se que o uso do protocolo AODV-FWSN consegue-se aumentar a vida útil da rede ao efetuar a fusão de dados que passam pelos sensores e realizar o roteamento baseado na energia restante dos nós junto com o grau de adjacência de cada um dele, isto é baseado no custo *fuzzy* que proporciona ao protocolo a capacidade de distribuir melhor os tráfegos, entre os sensores que seriam mais adequados.

Estas características tornam o protocolo mais viável em cenários onde a utilização do roteamento com vários saltos é necessária, e é algo vital para a vida útil da rede. Além de claro garantir uma eficiência na entrega das informações para o nó coordenador.

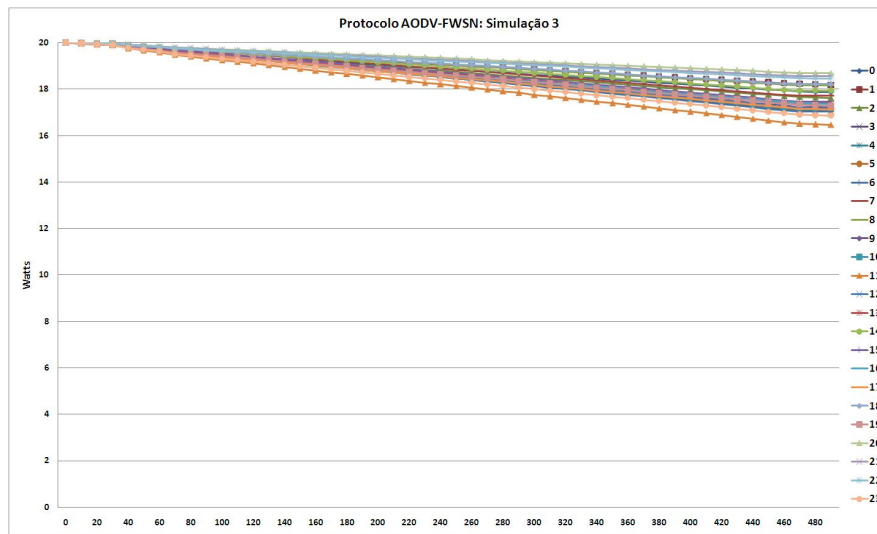


Figura 10. Simulação 3 do Protocolo AODV-FWSN

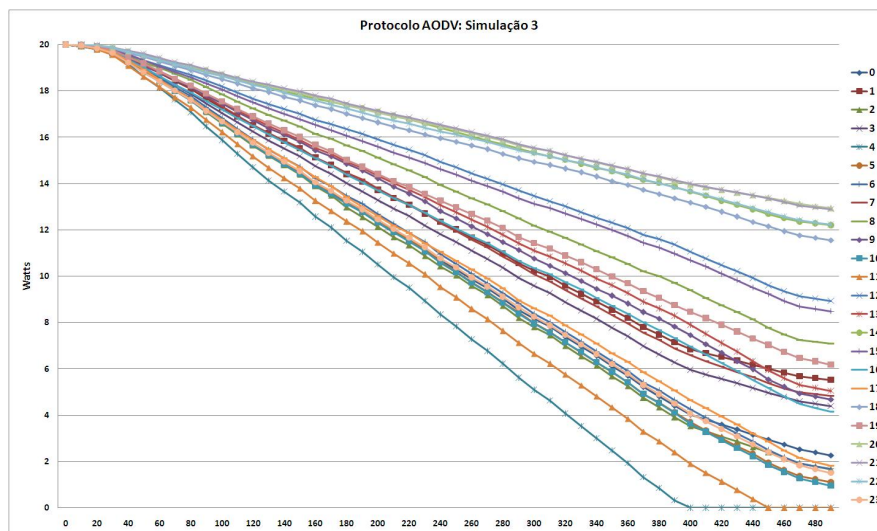


Figura 11. Simulação 3 do Protocolo AODV

6. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este artigo apresentou uma versão para o protocolo AODV voltado para redes de sensores, o protocolo AODV-FWSN, que visa aumentar a vida útil da rede através da utilização de envio dos dados por rajadas, fusão dos dados e roteamento baseado na utilização de um custo *fuzzy*.

O custo *fuzzy* é baseado na informações de energia e grau de adjacência de um determinado nó, estas informações são usadas para se escolher rotas onde o nó em questão possua um bom nível de energia e que a chance de ocorrência da fusão de dados seja maior.

Os resultados mostraram que o AODV-FWSN consegue aumentar a vida útil da rede e manter o nível de eficiência na entrega dos pacotes, fazendo com que o protocolo AODV-FWSN consiga obter um desempenho superior ao do protocolo AODV.

Como trabalhos futuros pretende-se implementar um processo de escalonamento entra as rotas, desenvolver esquema de prioridade nas rajadas para as informações emergenciais e adequar o protocolo ao contexto de redes de sensores multimídia.

Referências

- Adeli, H. and Sarma, K. C. (2006). *Cost Optimization of Structures: Fuzzy Logic, Genetic Algorithms, and Parallel Computing*. Wiley.
- Akkaya, K. and Younis, M. (2005). A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 3:325–349.
- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2002). A survey on sensor networks. *Communications Magazine, IEEE*, 40(8):102–114.
- Anderson, D. and Hall, L. (1999). Mr. fis: Mamdani rule style fuzzy inference system. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics.*, vol.5:238–243.
- Ding, W., Iyengar, S. S., Kannan, R., and Rummler, W. (2004). Energy equivalence routing in wireless sensor networks. *Microprocessors and Microsystems*, 28.
- Kalantari, M. and Shayman, M. (2004). Energy efficient routing in wireless sensor networks. In *in Proc. Conference on Information Sciences and Systems, Princeton*.
- Perkins, C. E., Royer, E. M., and Das, S. R. (2002). Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing. *IETF INTERNET DRAFT, MANET working group*.
- Pinto, A. R., Benedito, B., Dantas, M., and Montez, C. (2007). Fusão de dados tempo real em redes de sensores sem fio multimídia. *XIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Multimídia e Web (Webmedia'07), Gramado/RS*, pages 95–102.
- Salustiano, R. E., , and dos Reis Filho, C. A. (2007). Sistema de fusão de sensores destinado ao monitoramento remoto de ambientes. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)*, pages 7087–7093.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*.
- Zhu, J., Zhao, H., and Xu, J. (2009). An energy balanced reliable routing metric in wsns. *Scientific Research Publishing - Wireless Sensor Network*. Disponível em: <http://www.SciRP.org/journal/wsn>, pages 22–26.