

# Algoritmo Adaptativo Baseado em Energia-Conectividade para Roteamento em Redes de Sensores sem Fio Subaquáticas

Eduardo Chinelate Costa<sup>1</sup>, Leonardo Chinelate Costa<sup>1</sup>,  
Luciano Jerez Chaves<sup>2</sup>, Alex Borges Vieira<sup>1</sup>, Ana Paula Couto da Silva<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciência da Computação  
Universidade Federal de Juiz de Fora – Juiz de Fora – MG

<sup>2</sup>Instituto de Computação  
Universidade Estadual de Campinas – Campinas – SP

<sup>3</sup>Departamento de Ciência da Computação  
Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte – MG

{eduardo,leonardocosta}@ice.ufjf.br, luciano@lrc.ic.unicamp.br

alex.borges@ufjf.edu.br, ana.coutosilva@dcc.ufmg.br

**Resumo.** Neste artigo é proposto um algoritmo adaptativo, em múltiplos saltos, para o roteamento em redes de sensores sem fio subaquáticas. Nesse ambiente, a movimentação dos sensores e economia de energia são pontos desafiadores. Mais ainda, nem sempre é possível ter uma visão completa da rede. Assim, de acordo com o novo algoritmo de roteamento proposto, a escolha do sensor que receberá a informação deve considerar a energia residual dos sensores dentro do raio de alcance, bem como a conectividade deles. Três níveis de decisão são considerados, e políticas que consideram energia ou conectividade ou a combinação de ambos fatores são implementadas. Através de simulação, verifica-se que o algoritmo de roteamento adaptativo proposto aumenta o tempo de vida da rede em até 75%, quando nenhuma informação do estado da rede é considerada no processo de roteamento. Quando comparado a algoritmos que consideram somente o fator energia ou conectividade, o ganho da nova abordagem pode chegar a 57%.

**Abstract.** In this paper we propose an adaptive routing algorithm for underwater sensor networks that takes into account context information. The choice of the sensor that will receive the data is made considering its residual energy as well as its connectivity. In order to apply the policy that will guide the choice of the next sensor in the routing path, the algorithm is based on three different choice levels. A sensor is chosen by considering either only its residual energy or only its connectivity or the combination of both. Through simulations, we show that applying our adaptive routing algorithm increases the network lifetime by up to 75% when compared with the random policy for choosing a sensor. When compared with policies that take into account either residual energy or connectivity, our adaptive routing algorithm increases the network lifetime by up to 57%.

---

\*Este trabalho é parcialmente financiado pelas Agências de Fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG.

## 1. Introdução

Sensores fazem parte do nosso dia-a-dia em diversas situações e cenários. Sensores de presença, de monitoramento de temperatura e de umidade, de controle de estoque estão permeados em nosso cotidiano. Na maioria dos casos, estes sensores formam redes nas quais informações são armazenadas, processadas ou simplesmente repassadas entre os sensores que as compõem. Essas redes são denominadas redes de sensores sem fio (RSSFs) e diversos artigos na literatura apresentam aplicações e algoritmos direcionados a esta classe de redes [Akyildiz et al. 2002].

Nos últimos anos, o interesse no monitoramento de regiões subaquáticas tem aumentado expressivamente. Diferentes exemplos corroboram este fenômeno: a questão da segurança de cidades ou até mesmo países, nos casos de desastres naturais, como maremotos e *tsunamis*, bem como vazamento em reservatórios de exploração de petróleo. Usinas hidrelétricas devem monitorar suas barragens, verificando e prevenindo futuros vazamentos, bem como o nível de água para eventuais políticas de racionamento de recursos. Biólogos desejam estudar vidas marinhas existentes ou descobrir novas espécies. Para estes diferentes tipos de monitoramento a melhor estrutura é um sistema distribuído de redes de sensores sem fio subaquáticas.

O monitoramento destes diferentes tipos de regiões através de redes de sensores apresenta diversos desafios. Entre eles, destacam-se a movimentação dos sensores em função das correntes aquáticas e a necessidade de prolongar o tempo de vida da bateria dos mesmos, conseqüentemente aumentando o tempo de vida da rede como um todo. O tempo de vida da rede é definido como o tempo total em que a rede exerce a atividade de monitoramento continuamente. Dessa forma, contribuições para a melhoria do desempenho destes tipos de redes se concentram, na maioria dos casos, em prover coleta e difusão de informação visando economizar energia da bateria do conjunto de sensores.

Este artigo tem como principal objetivo apresentar um algoritmo adaptativo para o roteamento, em múltiplos saltos, de informações coletadas por sensores em redes subaquáticas. Através de informações locais de cada um dos sensores da rede, o próximo salto no roteamento é definido com base em três políticas. Essas políticas levam em consideração a energia residual, a conectividade ou a combinação das duas características de todos os sensores dentro de um raio de cobertura específico, com o principal objetivo de aumentar o tempo de funcionamento da rede. A escolha da política a ser utilizada é baseada na diferença do nível de energia entre os sensores pertencentes à região do raio de cobertura. A utilização do termo adaptativo neste trabalho remete à capacidade do algoritmo em decidir, dinamicamente, pelo uso da política baseada em conectividade, em energia residual, ou na combinação das duas.

Os resultados das simulações realizadas mostram que o algoritmo adaptativo proposto aumenta o tempo de vida da rede em até 75%, quando comparado a um algoritmo em que nenhuma informação do estado da rede é considerada no processo de roteamento. Quando comparado com algoritmos que consideram somente o fator energia ou conectividade isoladamente, o ganho do algoritmo adaptativo proposto pode chegar a 57%. Adicionalmente, o uso do novo algoritmo resulta em uma distribuição mais homogênea da energia residual dos diferentes sensores pertencentes à rede ao final do período de monitoramento. Este resultado mostra que o algoritmo adaptativo, em comparação a algoritmos que não combinam características do contexto da rede, utiliza a energia dos

sensores de maneira mais eficiente. Com os resultados mostrados, o algoritmo adaptativo pode ser utilizado como política de escolha de nós para a implementação de protocolos de roteamento, devido a simplicidade das informações requeridas para o seu funcionamento e da natureza distribuída do mesmo.

## 2. Trabalhos Relacionados

As restrições impostas pelo meio aquático, como a maior necessidade de economia de energia, principalmente em função do maior consumo nas transmissões acústicas ou a disposição da rede devido ao movimento natural dos sensores no ambiente, fazem com que os protocolos de roteamento desenvolvidos para as RSSFs terrestres não sejam diretamente aplicáveis em RSSFs subaquáticas. Os principais protocolos de roteamento de RSSFs subaquáticas propostos na literatura estão descritos em [Ayaz et al. 2011] e alguns deles são detalhados a seguir. Uma característica comum entre todos os protocolos é a aplicação de políticas simples para escolha dos nós, sendo que a maioria deles usam posicionamento ou energia residual dos sensores como critério de orientação da informação.

O protocolo *Focused Beam Routing* (FBR) [Jornet et al. 2008], estabelece a rota dinamicamente durante a retransmissão dos pacotes de dados. O nó sensor escolhe o próximo nó da rota considerando a energia necessária para transmitir pacotes para este determinado nó. O nó escolhido como receptor deve ser o mais próximo ao emissor, uma vez que se gastará menos energia para o envio de dados a ele. Tal abordagem tenta economizar energia com uma visão local, mas perde a flexibilidade de encontrar regiões com maior número de sensores. Outro protocolo é o *Directional Flooding-Based Routing* (DFR) [Hwang e Kim 2008], onde o nó receptor dos dados é escolhido pelo transmissor considerando sua energia residual e a proximidade deste nó do *sink*.

Alguns protocolos utilizam uma característica específica que é a informação de profundidade dos nós sensores (*Depth-Based Routing* – DBR [Yan et al. 2008]) e de proximidade com o *data sink* (*Sector-Based Routing with Destination Location Prediction* – SBR-DLP [Chirdchoo et al. 2009]). A localização do sensor pode ser utilizada de tal forma que se escolha o mais próximo ao *data sink*. Em outros, como no protocolo *Distributed Underwater Clustering Scheme* (DUCS) [Domingo e Prior 2007], nós sensores podem ser aleatoriamente escolhidos para a formação de *clusters*, onde ocorre a agregação dos dados para posterior retransmissão dos pacotes.

O algoritmo proposto neste artigo se difere dos demais da literatura dado que a escolha do próximo nó é feita de forma adaptativa. Os protocolos existentes utilizam políticas de escolha fixas, baseando-se em somente uma característica dos nós sensores que compõem a rede subaquática. Apesar da abordagem adaptativa proposta neste trabalho ter potencial para ser utilizada em qualquer tipo de RSSFs, ela se compatibiliza fortemente com as redes subaquáticas, devido à simplicidade no processo de escolha dos próximos nós, que é uma característica fundamental neste tipo de ambiente.

## 3. Formalização do Sistema

A rede RSSF subaquática considerada neste artigo é formada por nós sensores de dois tipos: nós que recolhem as informações do ambiente sendo monitorado e nós que repassam esta informação até o destino final. O destino é um nó especial denominado *sink*, que permanece estático durante todo o tempo de monitoramento.

A informação a ser transmitida é dividida em pacotes de tamanho  $L$ , que se propagam no meio aquático, baseando-se em transmissão acústica, com velocidade de  $1500m/s$ . A rede é formada pelo conjunto de nós sensores  $\mathcal{N}$ , com cardinalidade  $|\mathcal{N}|$ . O subconjunto de nós  $\mathcal{N}_g \subset \mathcal{N}$  gera informações de sensoriamento a uma taxa de  $\lambda$  e os enviam aos nós sensores vizinhos, ou seja, aos nós dentro dos seus respectivos raios de cobertura; o roteamento é realizado pelos próprios nós sensores em múltiplos saltos até chegar ao nó *sink*  $N_s$ . Matematicamente, a rede RSSF é representada por um grafo  $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{L})$ , sendo  $\mathcal{N}$  o conjunto de nós sensores e  $\mathcal{L}$  o conjunto de ligações que podem ser estabelecidas entre os nós sensores dentro de um raio de vizinhança  $\rho$ .

Seja  $\mathcal{V}_t(s) \subset \mathcal{N}$  o conjunto de nós sensores dentro do raio de vizinhança de um dado nó sensor  $s$ , no instante de tempo  $t$ . A lista de nós sensores vizinhos de  $s$ ,  $\mathcal{V}_t(s)$ , é dinâmica, com possíveis mudanças a cada movimentação de nós sensores (na Seção 5 é apresentado o modelo de movimentação utilizado neste artigo). A cardinalidade de  $\mathcal{V}_t(s)$  é o grau de conectividade do sensor  $s$ : quanto maior a quantidade de nós sensores dentro do raio de alcance de  $s$ , maior o seu grau de conectividade. Para todo  $s \in \mathcal{N}$ , denotamos como  $e_t(s)$  a energia residual do nó sensor  $s$  no tempo  $t$ ;  $e_t(s)$  é a energia máxima que poderá ser utilizada para enviar/receber pacotes. A cada transmissão e recepção de um pacote, um valor constante  $\gamma$  e  $\mu$  são retirados do montante total de energia  $e_t(s)$ , respectivamente. A diminuição contínua da energia de um nó resulta na sua inatividade e, conseqüentemente, no seu posterior desligamento da rede.

Um sensor  $s$  pode adotar diferentes estratégias (ou políticas) de escolha do próximo nó sensor a receber o pacote de informação. A mais simples de todas é a aleatória, onde o próximo nó é escolhido uniformemente entre todos os seus vizinhos, desconsiderando informações de contexto do ambiente. Apesar de ser a mais simples, esta política é a mais ineficiente em termos de economia de energia (conforme resultados observados na Seção 5). O principal foco deste artigo é propor uma nova estratégia de escolha do nó que irá receber o pacote a cada salto do roteamento até ao *sink*. A política se adapta às condições atuais da rede, considerando a diferença do nível de energia entre os sensores dentro do raio de alcance do sensor  $s$ : a escolha poderá se basear na energia, conectividade ou na combinação destes dois fatores. O objetivo é aumentar o tempo de vida da rede, fazendo com que ela transmita, durante o maior intervalo de tempo possível, informações de monitoração do ambiente aquático em estudo.

## 4. Algoritmo Adaptativo Baseado em Energia-Conectividade

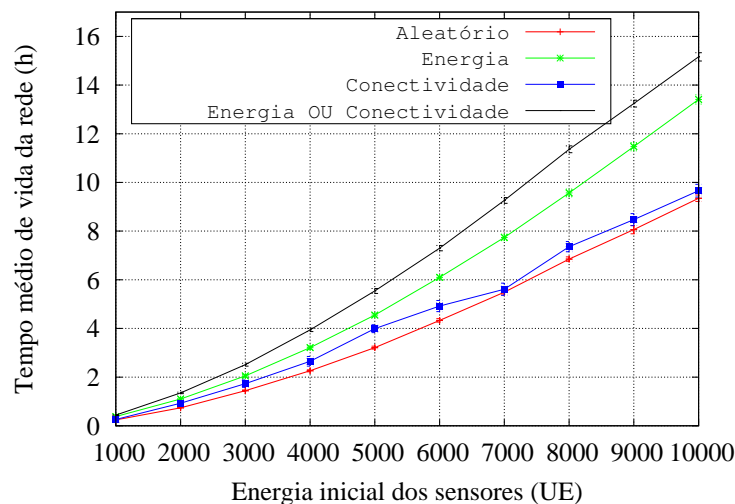
### 4.1. Discussão inicial

Nesta seção é apresentada a motivação para o algoritmo proposto neste artigo. Através de resultados obtidos via simulação, foi analisado um cenário (de referência, descrito na Seção 5) em que são implementadas quatro políticas para a escolha do nó sensor que receberá o pacote no próximo salto do roteamento.

A Figura 1 apresenta o tempo total de vida da rede de sensores, ou seja o tempo em que ela permanece em funcionamento, considerando as seguintes políticas:

1. **Aleatória:** Sensores dentro do raio de cobertura de um dado sensor  $s$  são escolhidos aleatoriamente, desconsiderando características relacionadas ao contexto da rede ou dos próprios sensores.

2. **Energia:** A probabilidade de escolha de um nó que receberá a informação é proporcional a sua energia residual. Em outras palavras, o sensor com maior energia dentro do raio de cobertura de  $s$  terá maior chance de ser escolhido.
3. **Conectividade:** A probabilidade de escolha de um nó que receberá a informação é proporcional a sua conectividade. Em outras palavras, o sensor com maior número de vizinhos dentro do raio de cobertura de  $s$  terá maior chance de ser escolhido. A intuição desta política está na possibilidade de explorar sensores com um maior número de nós dentro do raio de cobertura. Um maior espaço amostral de vizinhos, pode, probabilisticamente, aumentar a chance de encontrar nós com maior energia residual.
4. **Energia OU Conectividade:** Nesta política é introduzida aleatoriedade na escolha da característica a ser considerada na escolha do próximo nó. Ou seja, em alguns intervalos de tempo opta-se, probabilisticamente, por direcionar a informação para o sensor de maior energia. Em outros instantes de tempo, opta-se por direcionar a informação para o sensor com maior conectividade. No entanto, esta escolha não é baseada em informações do estado do sistema.



**Figura 1. Tempo de vida da rede de sensores para políticas não-adaptativas.**

Os resultados apresentados na Figura 1 indicam que considerar alternadamente as características de energia e conectividade aumentam em até 67% o tempo de vida da rede quando comparado ao tempo de vida da política aleatória. Para o caso onde é considerada somente a energia ou somente a conectividade, o ganho alcança 57%. O interessante é que este ganho acontece em uma política onde a alternância entre uma característica e outra não segue nenhuma informação de contexto de todo o sistema ou da visão parcial dentro do raio de cobertura de um sensor. Estes resultados motivam a proposta de um algoritmo que considere energia e conectividade na escolha do nó sensor, bem como a proposta de um mecanismo que adapte esta escolha para condições que podem ser analisadas dentro do raio de cobertura de um determinado sensor  $s$ .

#### 4.2. Descrição

Nesta seção é apresentado o algoritmo adaptativo baseado nas características de energia e de conectividade. Os parâmetros utilizados pelo algoritmo são discutidos, bem como o

mecanismo de adaptação proposto.

Seja  $s$  o nó sensor que deverá encaminhar a informação a um dos nós em  $\mathcal{V}_t(s)$ , em um instante de tempo  $t$ . Sem perda de generalidade, sejam  $k, j \in \mathcal{V}_t(s)$  os sensores que possuem, respectivamente, os valores máximo e mínimo de energia residual,  $MAX_e = e_t(k)$  e  $MIN_e = e_t(j)$ . Seja  $\Delta = (MAX_e - MIN_e)/MAX_e$  a variação dos valores de energia dos nós pertencentes ao conjunto  $\mathcal{V}_t(s)$ . Seja  $l_h, h = \{1, 2\}$  valores limites para o parâmetro  $\Delta$ . O intervalo limitado superiormente por  $l_1$  representa uma pequena variação de energia. O intervalo limitado inferiormente por  $l_2$  representa uma grande variação de energia. A adaptação da política a ser utilizada na escolha de um próximo nó baseia-se na diferença do nível de energia  $\Delta$  entre os sensores dentro do raio de cobertura de um determinado sensor  $s$ :

1. **Pequena Variação** -  $0 < \Delta \leq l_1$ : Para os casos com pequena variação nos valores de energia residual dos sensores em  $\mathcal{V}_t(s)$ , a escolha do próximo nó  $i$  é proporcional a sua conectividade. Como os valores de energia estão próximos, não é preciso se preocupar com qual nó irá gastar energia na transmissão. Assim, torna-se mais interessante explorar nós com maior conectividade, principalmente porque esta abordagem irá oferecer, no próximo salto da transmissão, mais opções de escolhas, potencializando as chances de encontrar nós com maior energia residual.
2. **Variação Balanceada** -  $l_1 < \Delta \leq l_2$ : Para os casos intermediários, a escolha do próximo nó  $i$  é proporcional a função  $f(e_t(i), |\mathcal{V}_t(i)|) = \alpha e_t(i) + (1 - \alpha)|\mathcal{V}_t(i)|$ . Nestes casos, onde a diferença de energia não é predominante, combinar as duas características possibilita explorar nós com grande quantidade de energia associado à uma vizinhança maior. Escolher nós com maiores quantidades de energia e de vizinhos possibilita, com maior probabilidade, explorar futuramente uma área de cobertura com nós que possuem uma maior quantidade de energia. O fator  $\alpha$  representa o peso dado a cada uma das características consideradas.
3. **Grande Variação** -  $l_2 < \Delta \leq 1$ : Para os casos com grande variação nos valores de energia residual dos sensores em  $\mathcal{V}_t(s)$ , a escolha do próximo nó  $i$  é proporcional a sua energia residual. Nestes casos, deve-se escolher nós com maior energia, evitando aqueles que poderão ficar com energia abaixo do mínimo necessário para transmitir ou receber informações.

A partir do algoritmo adaptativo proposto, o roteamento em múltiplos saltos considera características locais relacionados ao sensor  $s$ , ou seja, a energia residual e/ou a conectividade dos nós pertencentes à  $\mathcal{V}_t(s)$ . A combinação de diferentes políticas possibilita uma exploração mais ampla dos sensores que possuem maior quantidade de energia residual, evitando o envio de informação para sensores com pouca energia, e, consequentemente, aumentando o tempo de vida útil da rede como um todo. O Algoritmo 1 sumariza o roteamento adaptativo proposto, onde  $\tau$  é a proporção de nós cujo a energia residual está abaixo do nível necessário para transmitir/receber pacotes de informação.

## 5. Resultados Numéricos

Nesta seção é investigado o desempenho do algoritmo adaptativo considerando diferentes métricas de interesse. Adicionalmente, será analisado o comportamento do algoritmo quando os valores de seus parâmetros mudam. O desempenho do algoritmo proposto é comparado com o de algoritmos que consideram somente energia ou conectividade, bem

```

enquanto sensores em funcionamento  $\geq \tau\%$  do total de sensores faça
  para todo sensor  $s \in \mathcal{N}$  faça
    se evento disparado é de transmissão de um pacote então
      /* Escolher o próximo salto*/
      se  $0 \leq \Delta \leq l_1$  então /*somente conectividade*/
        para todo  $i \in V_t(s)$  faça
           $prob_i = \frac{|V_t(i)|}{\sum_{j:j \in V_t(s)} |V_t(j)|}$ 
        fim
      fim
      se  $l_1 < \Delta \leq l_2$  então /*energia e conectividade*/
        para todo  $i \in V_t(s)$  faça
           $f(e_t(i), |V_t(i)|) = \alpha e_t(i) + (1 - \alpha)|V_t(i)|$ 
           $prob_i = \frac{f(e_t(i), |V_t(i)|)}{\sum_{j:j \in V_t(s)} f(e_t(j), |V_t(j)|)}$ 
        fim
      fim
      se  $l_2 < \Delta < 1$  então /*somente energia*/
        para todo  $i \in V_t(s)$  faça
           $prob_i = \frac{e_t(i)}{\sum_{j:j \in V_t(s)} e_t(j)}$ 
        fim
      fim
      Escolha o sensor  $i$  (próximo salto) segundo  $prob_i$ 
    fim
  fim
fim

```

**Algorithm 1:** Algoritmo de Roteamento Adaptativo.

como de algoritmos que não consideram nenhuma informação de contexto. Vale ressaltar que a avaliação feita neste artigo não está atrelada a nenhum protocolo de roteamento em particular, mas sim à política de escolha do sensor no próximo salto do roteamento. Desta forma, os resultados apresentados podem ser considerados resultados do melhor caso para os protocolos de roteamento que se baseiam nas políticas avaliadas.

### 5.1. Implementação do simulador

Os resultados apresentados foram obtidos através de um simulador de eventos discretos implementado especificamente para o sistema descrito na Seção 3. A simulação é organizada em duas fases. Primeiramente, os nós sensores são distribuídos uniformemente em uma superfície quadrada e isopical, ou seja, de densidade constante, onde a movimentação do fluxo é praticamente reduzida a duas dimensões. Os nós sensores são projetados para permanecerem em apenas uma dessas superfícies. A área de monitoramento simulada se assemelha àquelas implantadas para o monitoramento de usinas hidrelétricas, regiões costeiras ou campos de petróleo, onde os sensores se encontram a pequenas distâncias uns dos outros. Durante a segunda fase, um subconjunto de sensores recolhem informações que devem ser roteadas até ao *sink*. A simulação continua até que seja alcançada uma porcentagem de  $\tau\%$  de sensores com energia residual abaixo da necessária para transmitir/receber informações. Os principais eventos implementados foram o de geração, transmissão e recepção de pacotes, além o evento de movimentação dos sensores.

Os sensores se movimentam segundo o modelo *Random Waypoint* [Broch et al. 1998], projetado para redes *ad-hoc*. Após o posicionamento inicial dos sensores dentro da área de simulação, a movimentação dos nós é feita da seguinte maneira. Cada sensor da rede seleciona aleatoriamente uma posição de destino dentro da região de interesse. O sensor segue em linha reta até o destino, com velocidade constante uniformemente distribuída entre 0 e  $v_{max}$ , onde  $v_{max}$  é a maior velocidade permitida para todos os nós sensores. A velocidade e a direção de um nó são escolhidas independentemente dos outros nós. Ao alcançar o destino, o nó deixa de se movimentar durante um intervalo de tempo  $\mathcal{T}_{pausa}$ . Após o tempo de pausa, o nó escolhe, aleatoriamente, um novo destino e uma nova velocidade de deslocamento. Esse processo se repete continuamente até o final da simulação.

Cada sensor  $s$  possui um raio de cobertura onde os sensores pertencentes a  $\mathcal{V}_t(s)$  estão posicionados. Ao receber ou transmitir um pacote, a energia de um sensor  $i \in \mathcal{V}_t(s)$  é consumida. A quantidade total de energia residual  $e_t(i)$  é medida em Unidades de Energia (UE). A UE se refere a toda relação de consumo e armazenamento de energia elétrica da RSSF. Cada nó possui uma bateria, com capacidade inicial total de  $\beta$  UE. A cada envio,  $\gamma$  UE são decrescidas da bateria do sensor  $s$ . A cada recebimento de pacote,  $\mu$  UE são decrescidas da bateria do sensor  $i$ . Segundo [Akyildiz et al. 2002], a tarefa de transmissão de pacotes é a tarefa que mais consome energia.

Para a análise do desempenho do algoritmo proposto, as seguintes métricas de interesses são calculadas pelo simulador:

1. **Tempo médio de vida da rede.** Denotada por  $\mathcal{T}_G$ , a variável aleatória tempo de vida da rede é o tempo no qual a rede exerce ininterruptamente suas atividades de monitoramento e transmissão de dados até atingir uma situação em que não é mais



possível realizar as tarefas de transmissão/recebimento de pacotes. Nesse artigo, é calculado o valor médio  $E[\mathcal{T}_G]$ , considerando as diferentes rodadas de simulação realizadas.

2. **Energia residual média da rede.** Denotada por  $\mathcal{E}_G$ , a variável aleatória energia residual da rede é a soma total da energia que permanece disponível nos nós sensores após a rede ter interrompido suas atividades de monitoramento. Nesse artigo, é calculado o valor médio  $E[\mathcal{E}_G]$ , considerando as diferentes rodadas de simulação realizadas.
3. **Jain's Fairness Index para a energia residual dos sensores.** Como o objetivo é prolongar o tempo de vida da rede de sensores, a política ideal é aquela que equilibra o uso da energia dos diversos sensores. Para mensurar o equilíbrio entre valores de energia residual e definindo como mais justa a política onde não existe, ao final da simulação, uma grande variação nos valores de  $e(i), \forall i \in \mathcal{N}$ , utiliza-se a métrica *Jain's Fairness Index* [Jain 1991]:

$$\mathcal{J}(e(1), e(2), \dots, e(|\mathcal{N}|)) = \frac{(\sum_{i=1}^{|\mathcal{N}|} e(i))^2}{|\mathcal{N}| \cdot \sum_{i=1}^{|\mathcal{N}|} e(i)^2}.$$

No melhor caso,  $\mathcal{J} = 1$  e equivale ao caso onde todos os nós sensores possuem o mesmo valor final de energia residual. Em outras palavras, a política de escolha resultou em um equilíbrio na utilização da energia individual dos nós sensores, não sobrecarregando nós específicos. Quanto mais próximo  $\mathcal{J}$  está de 1, menor a variação entre os valores da energia residual. No pior caso,  $\mathcal{J} = 1/n$ .

## 5.2. Cenário de Referência

Com o objetivo de analisar o desempenho do algoritmo adaptativo, considera-se o seguinte cenário de referência: a rede é composta por 100 sensores, uniformemente posicionados em uma região quadrada de  $1000 m \times 1000 m$ . O total de  $|\mathcal{N}_g| = 10$  sensores geram informações de sensoriamento. A velocidade máxima de deslocamento dos nós no interior da área monitorada é  $v_{max} = 20 m/s$  [Yoon et al. 2003, Kumar et al. 2011]. O intervalo entre deslocamentos sucessivos é de  $\mathcal{T}_{pausa} = 5s$ . O raio de cobertura considerado é  $\rho = 100 m$ . A Unidade de Energia inicial total  $\beta$  varia no conjunto  $\{1000, 2000, \dots, 10000\}$ . Cada envio consome  $\gamma = 5$  UE e cada recebimento consome  $\mu = 1$  UE [Sanchez et al. 2011]. Em relação aos parâmetros do algoritmo adaptativo, serão utilizados os valores  $\alpha = 0.5$ ;  $l_1$  e  $l_2$  iguais a 0.3 e 0.6, respectivamente. Nas simulações realizadas, pacotes de controle (sinalização) são desconsiderados.

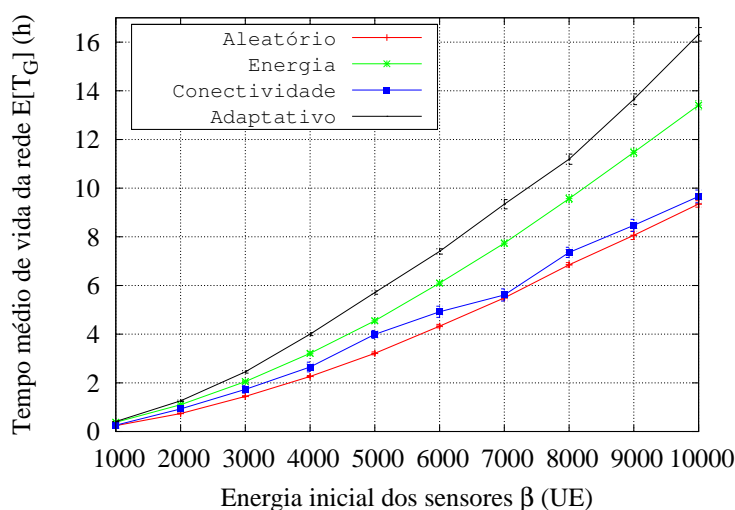
Os resultados das métricas de interesse foram obtidos através da média de 500 rodadas independentes de simulação, com intervalo de confiança de 95%. Inicialmente o critério de parada da simulação é o descarregamento da bateria de 15% dos nós sensores. Em todas as execuções realizadas, o algoritmo adaptativo convergiu e se mostrou estável.

## 5.3. Desempenho do Algoritmo Adaptativo

Uma das métricas mais importantes a ser analisada é o tempo médio de vida da rede,  $E[\mathcal{T}_G]$ . A Figura 2 apresenta os resultados obtidos pelo algoritmo que implementa políticas adaptativas e os resultados das demais políticas de escolha de sensores, descritas na Seção 4.1. No melhor caso, o aumento do tempo médio de vida da rede é de aproximadamente 75% quando comparado com a política aleatória, aproximadamente 26% quando

somente a informação de energia é considerada e aproximadamente 57% quando somente a conectividade é considerada.

Conforme esperado, o aumento do valor de  $\beta$  resulta em um melhor desempenho quando as informações de contexto dos sensores são incluídas na política de escolha do próximo nó sensor. Para pequenos valores de  $\beta$  ( $\leq 4000$ ), o desempenho do algoritmo adaptativo está próximo ao dos algoritmos que consideram somente energia ou conectividade. O ganho do algoritmo adaptativo é ainda mais expressivo nos casos onde  $\beta$  possui valores mais elevados. Nesses casos, os sensores possuem um intervalo maior de valores de energia que pode ser melhor explorado pelas políticas de escolhas do próximo nó. É possível observar um comportamento exponencial no tempo médio de vida da rede para todos os algoritmos. Esse comportamento é consequência do modelo utilizado nas simulações, onde o número de eventos de transmissão diminui à medida que se aproxima do fim da simulação e os nós vão se desligando da rede por falta de energia.



**Figura 2. Tempo médio de vida da rede - Comparação entre algoritmos.**

A Figura 3 apresenta os resultados da energia média residual para as diferentes políticas de escolha do próximo nó. O algoritmo adaptativo apresenta uma menor energia residual que as abordagens aleatória e conectividade. Isso indica uma melhor utilização da energia se comparado a essas duas abordagens. Para o caso da política que considera somente energia, o desempenho é equivalente ao do algoritmo adaptativo proposto. O comportamento mostrado na Figura 3 é consequência da natureza das políticas que se baseiam em energia, dado que o principal objetivo é equilibrar o uso da energia de todos os nós sensores da rede de monitoramento.

Finalmente, a Tabela 1 apresenta os valores para o *Jain's Fairness Index*,  $\mathcal{J}$ , considerando diferentes políticas de escolha do próximo nó. Devido à própria definição do fator  $\mathcal{J}$ , que considera a energia residual entre os diversos sensores como fator de justiça, a política que considera somente a energia residual e o algoritmo adaptativo proposto alcançam os maiores valores de  $\mathcal{J}$ . Como o objetivo é aumentar o tempo de vida da rede, e este tempo está diretamente ligado ao uso equilibrado de energia dos sensores, esta definição é a que se enquadra melhor no contexto aqui apresentado. No entanto, vale ressaltar que, apesar de possuírem valores bem próximos do fator  $\mathcal{J}$ , o algoritmo adapta-

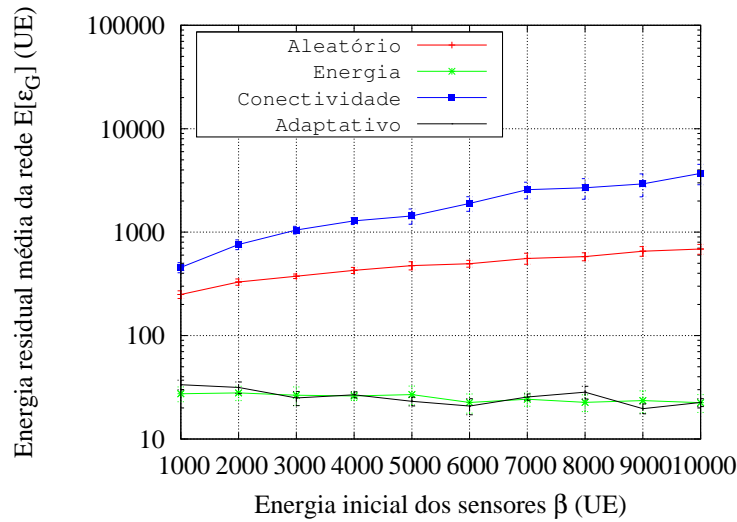


Figura 3. Energia residual média - Comparação entre algoritmos.

Algoritmo	$\mathcal{J}$
Aleatório	0.85
Somente Energia	0.98
Somente Conectividade	0.83
Adaptativo	0.99

Tabela 1. Jain's Fairness Index - Comparação entre algoritmos.

tivo aumenta em até 26% o tempo de vida da rede quando comparado com algoritmos de roteamento que consideram somente energia.

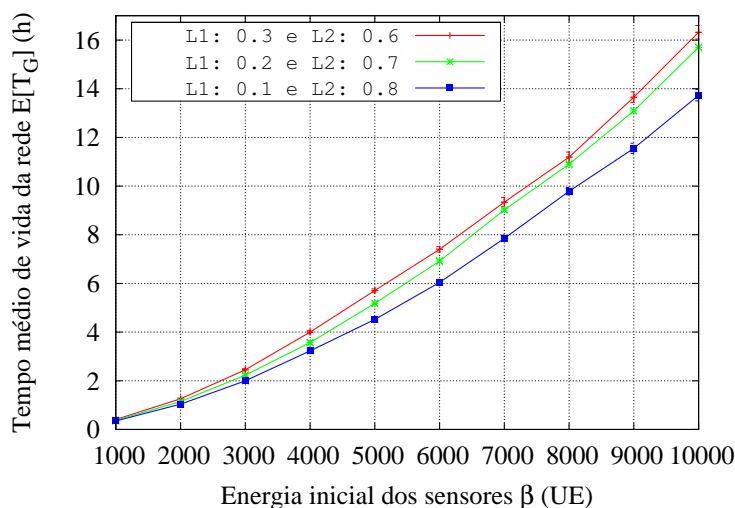
#### 5.4. Análise dos Parâmetros do Algoritmo Adaptativo

Conforme mostrado anteriormente, o algoritmo adaptativo aumenta em até 75% o tempo de vida da rede quando comparado com políticas mais simples que não consideram características da rede. Dessa forma, o uso do algoritmo proposto é atrativo principalmente nos casos onde a substituição de sensores não é uma tarefa trivial. Para finalizar o estudo do algoritmo adaptativo, nesta seção é analisado o comportamento do algoritmo quando os valores dos seus parâmetros são variados. Para os parâmetros não explicitados serão considerados os valores descritos no cenário de referência (Seção 5.2).

#### Variação dos níveis de energia $l_1$ e $l_2$

Sejam os valores  $l_1$  e  $l_2$  que determinam os tamanhos dos intervalos onde serão consideradas somente a conectividade, somente a energia ou a combinação de ambas características na escolha do sensor no próximo salto do roteamento. A Figura 4 mostra os valores do tempo médio de vida da rede para três pares diferentes de valores de  $l_1$  e  $l_2$ . Os resultados indicam que o algoritmo adaptativo alcança o melhor desempenho no caso em que é feita a escolha equilibrada da política a ser utilizada na escolha do próximo nó. A diversidade espacial deve ser explorada, diminuindo a sobrecarga em sensores específicos. Em outras palavras, todas as características dos sensores devem ser exploradas de forma equilibrada,

não privilegiando uma determinada característica. Por exemplo, no caso da conectividade, explorar somente esta característica pode levar a situações em que o mesmo sensor tem a maior chance de ser escolhido a cada salto do roteamento, diminuindo muito a sua energia residual. Por consequência, diminuindo o tempo de vida da rede. Para a variação dos parâmetros  $\tau$  e  $\alpha$ , serão considerados os valores de  $l_1 = 0.3$  e  $l_2 = 0.6$ . No entanto, vale ressaltar que o desempenho do algoritmo proposto é superior a todos os casos onde somente uma das características é considerada.



**Figura 4. Variação dos parâmetros  $l_h, h = \{1, 2\}$ .**

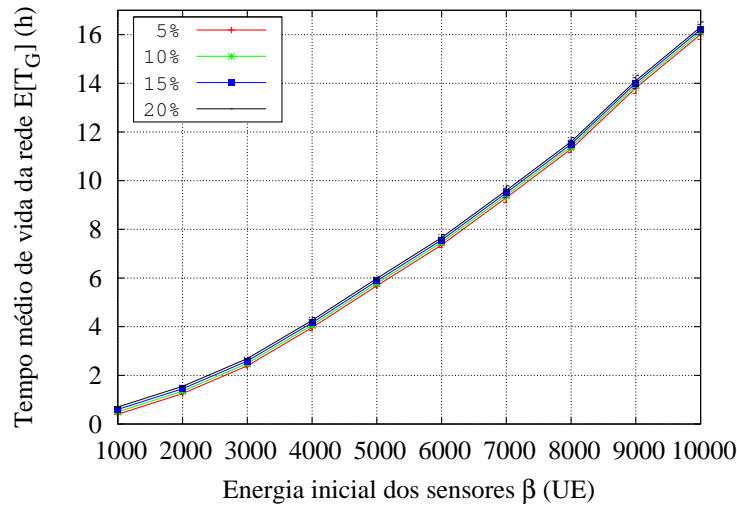
### Variação do critério de parada $\tau$

O critério de parada considerado nas simulações realizadas é a porcentagem de nós sensores que não podem colaborar para o roteamento das informações monitoradas desde a origem até o *sink*, dado que não possuem a quantidade de energia mínima necessária. A Figura 5 mostra os resultados para valores de  $\tau = \{5\%, 10\%, 15\%, 20\%\}$ . Para todos os casos considerados, os valores do tempo médio de vida permanecem praticamente iguais.

Com a utilização do algoritmo adaptativo, os nós sensores da rede consomem energia uniformemente. Ao se descarregar alguns sensores, a tendência é que vários sensores se descarreguem logo a seguir. Assim, a diferença dos tempos entre descarregar 5% ou 20% dos sensores da rede é mínima. Este fenômeno explica a proximidade do tempo médio de vida para os diferentes valores de  $\tau$  considerados. Vale ressaltar que, para todos os casos apresentados, a rede possui um tempo de vida longo.

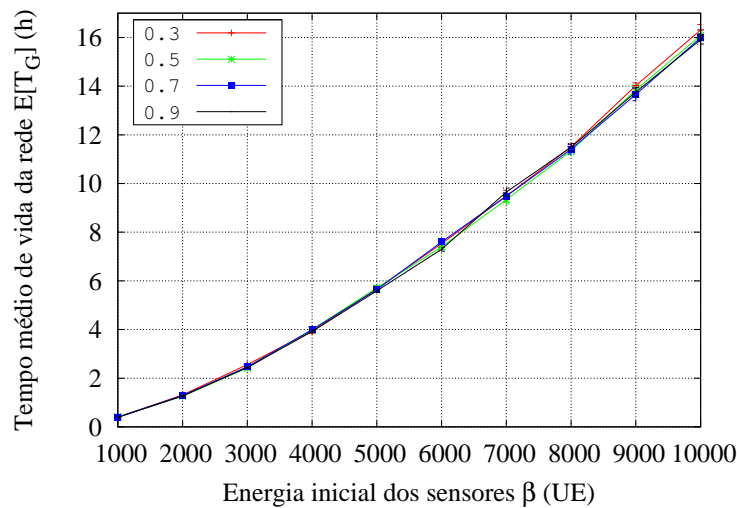
### Variação do peso $\alpha$ para conectividade e energia

Finalmente, é avaliado o comportamento do novo algoritmo adaptativo quando se varia o valor do peso dado para a energia e para a conectividade quando um nó é escolhido (parâmetro  $\alpha$ ). No caso do algoritmo adaptativo proposto,  $\alpha$  é utilizado para calibrar a função  $f(e_t(i), |\mathcal{V}_t(i)|)$  aplicada na escolha do próximo nó dentro do intervalo  $[l_1, l_2]$ . Os



**Figura 5. Variação do critério de parada  $\tau$ .**

resultados na Figura 6 mostram que a variação do parâmetro  $\alpha$  não causa grande impacto no tempo de vida da rede. Este resultado indica que o fator de impacto mais importante é considerar diferentes políticas de escolha a cada salto do roteamento, e não o peso que deve ser dado quando é utilizada a função  $f(e_t(i), |\mathcal{V}_t(i)|)$ . Dessa forma, o algoritmo é robusto a variações do parâmetro  $\alpha$ .



**Figura 6. Variação do peso  $\alpha$  para conectividade e energia.**

## 6. Conclusões

Neste artigo foi proposto um algoritmo adaptativo para o roteamento de informações em redes de sensores sem fio subaquáticas. Devido a natureza destas redes, a questão da economia de energia deve ser considerada, dado que a troca de baterias dos sensores não é uma tarefa trivial.

O algoritmo adaptativo considera três diferentes níveis e políticas para a escolha do nó do próximo salto de roteamento. Dada a diferença entre os níveis de energia

dos sensores presentes no raio de cobertura de um sensor em particular  $s$ , o algoritmo considera somente a energia, a conectividade ou a combinação das duas características para associar a importância do nó, e consequentemente, a maior chance de ser o nó que receberá a informação.

Através de simulação, verificou-se que o algoritmo de roteamento adaptativo proposto aumenta o tempo de vida da rede em até 75%, quando nenhuma informação do estado da rede é considerada no processo de roteamento. Quando comparado a algoritmos que consideram somente o fator energia ou conectividade, o ganho da nova abordagem pode chegar a 57%. Adicionalmente, mostrou-se que o algoritmo é robusto a variação dos valores dos seus parâmetros.

Como trabalhos futuros, será realizada uma análise mais formal da convergência e estabilidade do algoritmo adaptativo proposto.

## Referências

- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., e Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Comput. Netw.*, 38:393–422.
- Ayaz, M., Baig, I., Abdullah, A., e Faye, I. (2011). A survey on routing techniques in underwater wireless sensor networks. *J. Netw. Comput. Appl.*, 34(6):1908–1927.
- Broch, J., Maltz, D. A., Johnson, D. B., Hu, Y.-C., e Jetcheva, J. (1998). A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols. In *Proc. of the ACM MobiCom '98*, páginas 85–97.
- Chirdchoo, N., Soh, W.-S., e Chua, K. C. (2009). Sector-based routing with destination location prediction for underwater mobile networks. In *Proc. of the IEEE WAINA '09*, páginas 1148–1153.
- Domingo, M. C. e Prior, R. (2007). Design and analysis of a gps-free routing protocol for underwater wireless sensor networks in deep water. In *Proc. of the SENSORCOMM '07*, páginas 215–220.
- Hwang, D. e Kim, D. (2008). Dfr: Directional flooding-based routing protocol for underwater sensor networks. In *Proc. of the OCEANS '08*, páginas 1–7.
- Jain, R. (1991). *The Art of Computer Systems Performance Analysis*. Wiley Interscience.
- Jornet, J. M., Stojanovic, M., e Zorzi, M. (2008). Focused beam routing protocol for underwater acoustic networks. In *Proc. of the ACM WuWNeT '08*, páginas 75–82.
- Kumar, S., Sharma, S. C., e Suman, B. (2011). Simulation based performance analysis of routing protocols using random waypoint mobility model in mobile ad hoc network. *Glob. J. of Comput. Sc. and Tech.*, 11(1).
- Sanchez, A., Blanc, S., Yuste, P., e Serrano, J. (2011). A low cost and high efficient acoustic modem for underwater sensor networks. In *Proc. of the OCEANS '11*, páginas 1–10.
- Yan, H., Shi, Z. J., e Cui, J.-H. (2008). DBR: Depth-based routing for underwater sensor networks. *Int. Federation for Information Processing*, páginas 72–86.
- Yoon, J., Liu, M., e Noble, B. (2003). Random waypoint considered harmful. In *Proc. of the IEEE INFOCOM '03*, páginas 1312–1321.