

Escalonamento de Nós em Redes Aquáticas Estratificadas utilizando Voronoi

Eduardo P. M. C. Júnior¹, Luiz F. M. Vieira¹, Marcos A. M. Vieira¹

¹Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
31270-901 – Belo Horizonte – MG – Brasil

{epmcj, lfvieira, mmvieira}@dcc.ufmg.br

Abstract. *Underwater networks are usually used for monitoring water resources and underwater environments. Thus, it is important that the underwater sensor nodes cover the largest region possible, during the largest amount of time. This paper presents a method to perform node scheduling in underwater stratified networks. It aims to maintain the network active for longer, maintaining its connectivity. Voronoi Diagrams are used to decompose the space into regions around each node in order to determine which one should be scheduled to sleep. Simulation results show that the proposed method achieves the desired objectives, more than doubling the network lifetime while guaranteeing connectivity.*

Resumo. *Redes aquáticas são comumente utilizadas para fins de monitoramento de recursos hídricos e de ambientes aquáticos. Logo, é importante que seus nós cubram a maior região possível durante a maior quantidade de tempo. Este artigo apresenta um mecanismo para realizar o escalonamento de nós em redes aquáticas estratificadas e que visa mantê-las ativas por mais tempo. Diagramas de Voronoi são utilizados para decompor o espaço em regiões que cercam cada um dos nós e então decidir se é possível desativar alguns deles temporariamente. Resultados das simulações mostram que o método proposto alcança os objetivos almejados, mais que dobrando o tempo de vida da rede enquanto garante sua conectividade.*

1. Introdução

Estudos e monitoramentos de ambientes aquáticos são de grande relevância para as atividades humanas. Como tais ambientes causam grande impacto em nossas vidas, seja através da água que bebemos ou das mudanças climáticas pelos quais são responsáveis, é necessário se ter um bom conhecimento sobre eles. Nesse sentido, a coleta de dados desses ambientes é essencial e pode ser realizada utilizando redes aquáticas.

Essas redes são responsáveis por realizar a comunicação entre seus elementos de modo a permitir que uma cobertura adequada do ambiente seja alcançada. Diferentemente das redes terrestres, os equipamentos utilizados em redes aquáticas geralmente apresentam preços muito elevados e o gerenciamento de energia é algo ainda mais crítico, uma vez que o fornecimento pode ser impraticável. Assim, é necessário que os nós da rede realizem a cobertura da região desejada durante o maior tempo possível [Vieira et al. 2010].

Neste artigo, é proposto um mecanismo¹ para realizar o escalonamento de nós em

¹Código disponível em <https://github.com/epmcj/uwnodescheduling>.

redes aquáticas estratificadas, onde nós sensores e dispositivos são posicionados através de diversas camadas, cada uma em uma profundidade diferente. Ele visa aumentar o tempo de vida da rede, mantendo sua conectividade. São utilizados diagramas de Voronoi para determinar a importância de cada um dos nós e selecionar quais deles podem ser desativados temporariamente.

A avaliação do método é feita através de simulações. Os resultados mostram que a solução proposta consegue atingir seus objetivos e indicam um aumento do tempo de vida da rede quando ele é utilizado.

As principais contribuições deste artigo são: descrição do método proposto para escalonamento de nós baseado no diagrama de Voronoi, avaliação experimental com vários parâmetros e resultados que mostram que o tempo de vida da rede é aumentado.

O artigo está organizado da seguinte forma. A próxima seção discute os trabalhos relacionados. A seção 3 detalha os conceitos preliminares. A seção 4 é utilizada para descrever o método proposto. A seção 5 traz os resultados obtidos e as análises deles. Finalmente, a seção 6 apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Devido à crescente atenção dadas às redes aquáticas, muitos trabalhos tem sido desenvolvidos para resolver problemas encontrados nelas. Alguns protocolos foram desenvolvidos para a camada de enlace, como o Aloha [Vieira et al. 2006]. Outros protocolos foram feitos para a camada de rede, como o Pressure Routing [Lee et al. 2010], GEDAR [Coutinho et al. 2014], usando roteamento oportunístico [Vieira 2012, Coutinho et al. 2016d], roteamento geográfico [Coutinho et al. 2016a], com controle de profundidade [Coutinho et al. 2013] ou baseados em centralidade [Coutinho et al. 2016c]. Nenhum deles investiga o escalonamento de nós sensores aquáticos.

Técnicas para roteamento que consideram que os nós possam dormir por intervalos de tempo são apresentadas em [Coutinho et al. 2015]. O desenvolvimento de protocolos e algoritmos que possam economizar energia da rede são discutidos em [Coutinho et al. 2016b]. No entanto, nenhum deles propõe o uso de diagramas de Voronoi para escalonar os nós sensores, preservando a energia dos nós sensores e aumentando o tempo de vida da rede.

Em [Vieira et al. 2003], é desenvolvida uma solução para o escalonamento de nós sensores para redes de sensores terrestres que é baseada em diagramas de Voronoi. Com ela os autores conseguem poupar energia da rede sem diminuir sua área de sensoriamento. Não é apresentado um estudo para redes aquáticas ou redes 3D estratificadas, nem um estudo sobre o número de camadas.

Outros problemas em redes de sensores aquáticas também contam com soluções que utilizam diagramas de Voronoi. O problema de otimização de cobertura de redes aquáticas é um exemplo [Wang and Wang 2016]. Em [Wu et al. 2013], os autores propõem um mecanismo que utiliza diagramas de Voronoi para ajustar a profundidade dos nós de uma rede e assim maximizar sua cobertura. Vale notar que nenhum dos dois escalonam os nós sensores.

3. Conceitos Preliminares

Nessa seção são apresentados conceitos preliminares relevantes para este trabalho. Primeiramente, o modelo da rede considerada é descrito. Em seguida, tem-se uma breve descrição sobre diagramas de Voronoi, seguida pela exposição do modelo utilizado na estimativa de erros em entregas de pacotes em redes aquáticas.

3.1. Modelo da Rede

A cobertura de uma região aquática por nós de uma rede pode ser feita de diversas maneiras. Uma delas consiste em definir camadas em determinadas profundidades de interesse e então distribuir nós dentro de cada uma delas. Redes que utilizam essa forma são chamadas de estratificadas. Essas são as redes consideradas no desenvolvimento do método proposto. A Figura 1 mostra o exemplo de uma rede estratificada que possui 3 camadas.

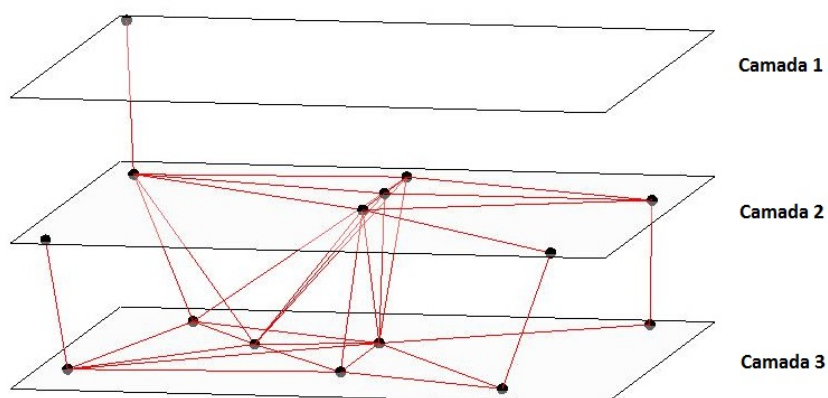


Figura 1. Exemplo de rede estratificada

É esperado que os dados da rede fluam no sentido de baixo pra cima, ou seja, que os nós das camadas mais profundas transmitam mensagens para aqueles que estão mais próximos da superfície. O protocolo de roteamento proposto em [Noh et al. 2016], por exemplo, utiliza a pressão dos nós da rede para rotear dados de nós submersos até as boias que se encontram na superfície.

Cada camada da rede é considerada como sendo um plano 2D, uma vez que todos os nós dentro dela possuem a mesma profundidade. É esperado que elas contenham pelo menos um nó e que cada uma consiga se comunicar com no mínimo mais uma, caso contrário a rede conteria um componente desconectado.

Em diferentes instantes de tempo pode ser feita a avaliação que considera a posição de cada um dos nós sensores. Essa posição pode ser global ou relativa a algum ponto. Mesmo que *Global Positioning Systems* (GPS) não funcionem muito bem em ambientes aquáticos [Akyildiz et al. 2005], pode-se utilizar abordagens que utilizem técnicas de localização [Erol et al. 2007b, Erol et al. 2007a, Erol et al. 2008].

A topologia da rede é considerada como sendo dinâmica. Isso se deve ao fato de que seus nós podem ser desativados temporariamente ou desligados definitivamente.

3.2. Diagrama de Voronoi

Seja $S = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ um conjunto de pontos em um plano Euclidiano. Esses pontos são chamados sítios. Seguindo a definição encontrada em [de Berg et al. 2008], tem-se que o Diagrama de Voronoi de S corresponde às n subdivisões do plano, chamadas de células, onde cada ponto q pertence à célula do sítio p_i se e somente se a distância entre q e p_i é menor do que a distância entre q e p_j , para todo $p_j \in S$ com $j \neq i$. Logo, cada sítio irá determinar uma célula cujo o tamanho dependerá da posição dos demais sítios. Assim, a célula $V(p_i)$ do sítio p_i pode ser expressada como:

$$V(p_i) = \{q : |p_i - q| \leq |p_j - q|, \forall j \neq i\} \quad (1)$$

A Figura 2 mostra os diagramas de Voronoi de um exemplo de uma rede estratificada com 3 planos. O plano do meio é destacado para exemplificar um diagrama de Voronoi.

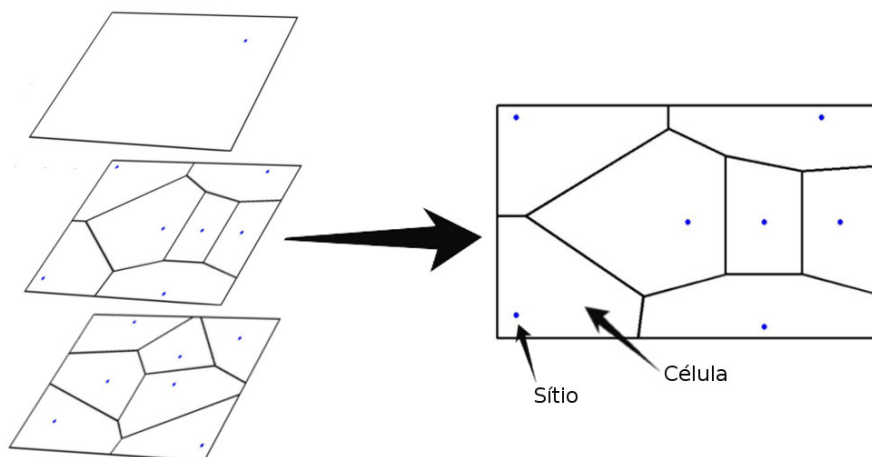


Figura 2. Diagrama de Voronoi dos pontos.

3.3. Estimativa da Probabilidade de Erros em Entrega de Pacotes

Nessa subseção é descrito um modelo de propagação de sinal em ambientes aquáticos para estimar a probabilidade de erros na entrega de pacotes. Ele é caracterizado por uma atenuação do sinal e por ruídos presentes no meio [Stojanovic 2007]. A atenuação, em dB, que ocorre em um canal acústico aquático sobre uma distância d , para um sinal de frequência f , é dado por

$$A(d, f) = 10k \times \log d + d \times \alpha(f) \times 1000 + 10 \quad (2)$$

Como dito em [Brekhovskikh 2003], o primeiro termo desta equação representa a perda por espalhamento, enquanto o segundo representa a perda por absorção. O fator de espalhamento k é utilizado para descrever a geometria da propagação. Seus valores comuns são $k = 2$, para o espalhamento esférico, $k = 1$, para espalhamento cilíndrico, e $k = 1.5$ para espalhamento prático. A perda por absorção pode ser determinada empiricamente pela fórmula de Thorp [Brekhovskikh 2003]. Para frequências maiores do que algumas centenas de Hz, essa fórmula é:

$$10 \log \alpha(f) = 0.11 \frac{f^2}{1 + f^2} + 44 \frac{f^2}{4100 + f^2} + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003, \quad (3)$$

onde $\alpha(f)$ é dado em dB/km se f é dado em kHz.

Os ruídos podem ser modelados através de quatro fontes: turbulência (N_t), atividade de embarcações (N_s), ondas (N_w) e ruídos térmicos (N_{th}) [Coates 1989]. Assim, o ruído total ($N(f)$) do ambiente é dado pela soma dos valores dessas fontes. As seguintes fórmulas empíricas mostram uma maneira de calcular os valores dos ruídos de cada uma das quatro fontes, em dB re μ Pa per Hz, em função da frequência f em kHz:

$$\begin{aligned} 10 \log N_t(f) &= 17 - 30 \log f \\ 10 \log N_s(f) &= 40 + 20(s - 0.5) + 26 \log f - 60 \log(f + 0.03) \\ 10 \log N_w(f) &= 50 + 7.5w^{\frac{1}{2}} + 20 \log f - 40 \log(f + 0.4) \\ 10 \log N_{th}(f) &= -15 + 20 \log f \end{aligned} \quad (4)$$

onde s é o fator de atividade de embarcações, com valor entre 0 (pouca atividade) e 1 (muita atividade), e w é a velocidade do vento, em m/s.

Com os valores da atenuação $A(d, f)$ e do ruído $N(f)$ é possível calcular o valor da relação sinal-ruído (SNR , do inglês *Signal-to-Noise Ratio*) observado sobre uma distância d , com frequência de transmissão f e utilizando uma potência P [Stojanovic 2007]. Sendo Δf a largura de banda de ruído do dispositivo receptor, então o valor de SNR é dado por

$$SNR(d, t) = \frac{P/A(d, f)}{N(f)\Delta f} \quad (5)$$

O valor de SNR é então utilizado para obter a taxa de erros de bits (BER , do inglês, *Bit Error Rate*). Utilizando a modulação BPSK (do inglês, *Binary Phase Shift Keying*), onde cada símbolo carrega um bit, o BER pode ser calculado através da fórmula [Rappaport et al. 1996]:

$$BER = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{SNR(d, f)}{1 + SNR(d, f)}} \right) \quad (6)$$

Obtido o BER , a taxa de erros em pacotes (PER , do inglês *Packet Error Rate*) pode ser estimada como sendo complemento da probabilidade de que todos os bytes do pacote estejam corretos. Ou seja, sendo os pacotes formados por n bits, o PER é dado por

$$PER = 1 - (1 - BER)^n \quad (7)$$

4. Método Proposto

O primeiro passo do método de escalonamento proposto é obter a parte do espaço pelo qual cada nó é responsável. Diagramas Voronoi de cada uma das camadas da rede são utilizados para isso. Neles, os sítios e as células representam, respectivamente, os nós da rede e suas áreas de monitoramento.

Após determinar a área pelo qual cada nó é responsável, o próximo passo consiste em verificar se existem nós que podem ser desativados temporariamente. A verificação é feita camada por camada, a começar por aquela mais próxima da superfície. Caso um nó possua uma área de monitoramento menor do que um dado limiar e sua ausência não desconecte alguma parte da rede, ele poderá ser desativado. Se isso ocorre, a região pelo qual ele era responsável é dividida entre seus vizinhos e o diagrama Voronoi da camada que o contém é atualizado. Quando não houver mais nós que possam ser desativados em uma camada, passa-se para a próxima. A verificação chega ao fim quando a camada mais profunda é atingida. Com isso, o escalonamento está feito.

Depois de realizado o escalonamento, a rede então se torna ativa e os nós começam a enviar dados para a superfície. Em algum momento, alguns nós da rede devem começar a ficar inacessíveis ao esgotarem suas fontes de energia. Assim que um nó da rede morre, sua área de monitoramento deve ser dividida entre os outros ao seu redor. Para representar essa mudança, o diagrama de Voronoi da camada a qual ele pertence precisa ser atualizado. Também é preciso verificar se existem nós que perderam contato com aqueles mais próximos da superfície. Caso isso aconteça, pode ser necessário reativar algum dos nós previamente desativados. Essa necessidade pode ser verificada ao se refazer o diagrama de Voronoi da camada, considerando como sítios os nós que ainda estão ativos e aqueles que foram desativados. Vale notar que é possível que não existam alternativas para o desligamento de alguns nós. Por exemplo, um nó que é responsável sozinho por transmitir e repassar os dados de nós da sua camada e das outras abaixo, tem sua energia esgotada mais rapidamente. Ao morrer, faz com que todos os nós que dependem dele não consigam mais enviar dados para a superfície por não haver outra rota alternativa. Isso ajuda no processo de “morte” da rede. A rede é considerada morta quando apenas uma porcentagem pequena de seus nós ainda estão ativos e conseguem enviar mensagens para o nó da superfície.

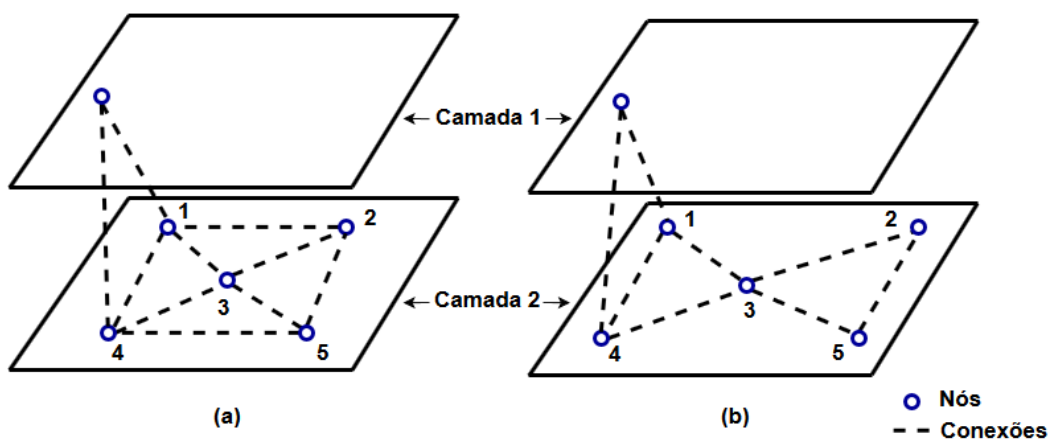
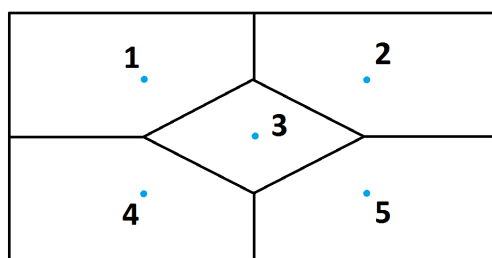
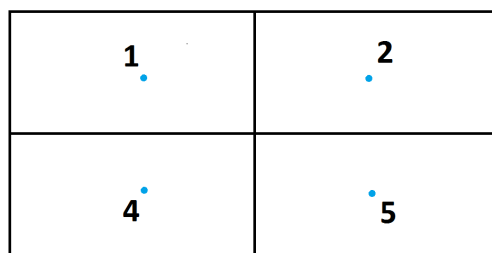


Figura 3. Exemplo de redes com topologias similares.

A parte de verificação do método é ilustrada utilizando as topologias mostradas nas Figuras 3(a) e 3(b). As duas topologias são similares, se diferenciando apenas em duas conexões: uma entre os nós 1 e 2 e outra entre os nós 4 e 5. Essas conexões existem na primeira, mas não na segunda. A verificação em ambos os casos começa pela camada 2, uma vez que a primeira possui somente 1 nó. Os diagramas de Voronoi dessa camada em ambas topologias são bastante semelhantes, sendo eles aproximadamente representados pela Figura 4(a). Supondo que a área de monitoramento do nó 3 seja menor do que um limiar previamente definido, deve-se verificar se ele pode ser desativado. Na primeira topologia isso é possível porque todos os nós que se comunicam com ele conseguem enviar dados para o nó da primeira camada através de outros. Já na segunda topologia, seu desligamento faria com que os nós 2 e 4 não conseguissem se comunicar com o restante da rede e por isso ele não pode ser desativado. No primeiro caso, após o nó ser desativado, o diagrama de Voronoi da segunda camada é atualizado e fica como aquele mostrado na Figura 4(b). Após esse passo, em ambos os casos não existe mais nenhum nó responsável por uma área muito pequena e logo termina-se a verificação.



(a) Diagrama de Voronoi inicial



(b) Diagrama de Voronoi atualizado

Figura 4. Exemplo de atualização de um diagrama de Voronoi quando um nó é desativado.

5. Avaliação de Desempenho

Nesta seção são descritas as configurações e os resultados dos experimentos realizados. A avaliação do método proposto foi feita através de simulações utilizando o software MATLAB.

5.1. Configurações dos Experimentos

A não ser quando descrito de outra forma, todos os experimentos foram realizados utilizando uma rede distribuída ao longo de cinco camadas quadradas de 1500x1500 m²

cada. A primeira camada da rede sempre possui somente um nó, chamado de nó *sink*. Já cada uma das outras camadas possuem n nós cada. Varia-se n para se obter diversas configurações de densidade de nós. As profundidades das camadas são determinadas aleatoriamente, com a restrição de que nenhuma fique isolada. Dentro das camadas, os nós são distribuídos de forma aleatória. O limiar da área de monitoramento é definido como sendo uma porcentagem da área de transmissão dos nós. É considerado que a rede está morta quando 50% ou mais de seus nós não conseguem transmitir dados para o nó *sink*.

A troca de mensagens foi simulada através de um esquema onde somente um nó transmite a cada unidade de tempo. A escolha do nó que irá transmitir é feita da seguinte maneira:

1. Escolhe-se aleatoriamente um nó da rede, que não seja o da primeira camada, para enviar seus dados para a superfície.
2. Traça-se uma rota do nó escolhido até o nó *sink*.
3. O primeiro nó na rota realiza uma transmissão para o segundo. Caso haja sucesso, o segundo transmite uma confirmação de volta. Em seguida, o segundo repassa a mensagem para frente até que ela chegue no último nó da rota. Cada nó pode tentar transmitir a mesma mensagem por até 3 vezes.
4. Se o nó *sink* recebe os dados ou se as tentativas de transmissão são esgotadas, então começa-se o ciclo novamente na etapa 1.

A estimativa de erros em entregas de pacotes descrita na Seção 3.3 é utilizada para verificar o sucesso das transmissões. O coeficiente de espalhamento escolhido foi aquele que corresponde ao espalhamento prático ($k = 1.5$). A velocidade do vento e o nível de atividade de embarcações foram considerados como sendo nulos. É considerado que a taxa de transmissão da rede é de uma mensagem por segundo. Também assumiu-se que os transmissores possuam potência de 1 W e transmitam a 100 kHz. A menos que especificado com outro valor, o alcance dos transmissores é de 250 metros. Já a largura de banda de ruído dos receptores foi utilizada com um valor igual a 3 dB. O tamanho dos pacotes é de 500 bytes. Um resumo dos valores dos parâmetros utilizados se encontra na Tabela 1.

Parâmetro	Valor
Taxa de transmissão	1 nó/ segundo
Frequência de transmissão	100 kHz
Tamanho do pacote	500 bytes
Alcance de transmissão	250 metros
Potência de transmissão	1 W
Largura de banda de ruído	3 dB
Coeficiente de espalhamento	1.5 (espalhamento prático)
Velocidade do vento	0 m/s
Atividade de embarcações	0

Tabela 1. Parâmetros utilizados durante a simulação.

O consumo de energia da rede foi modelado da seguinte forma:

- A cada unidade do tempo, os nós consomem um pouco de sua energia. Nós ativos gastam uma quantidade maior de energia do que aqueles que estão desativados.

- A transmissão de dados consome energia somente do transmissor. Isso porque para receberem mensagens, os nós precisam escutar o ambiente o tempo todo.
- Os receptores gastam energia se estão ativos. Caso estejam desativados, não recebem mensagens.

Os valores associados aos consumos foram utilizados como percentuais nas simulações. Isso permite uma maior generalidade, uma vez que o consumo varia de dispositivo para dispositivo. Assim, cada nó da rede possui inicialmente 100% de sua capacidade energética. Também é considerado que a capacidade energética do nó *sink* é maior do que a dos demais. Isso se deve ao fato de que na superfície tem-se uma maior facilidade para obtenção de energia, podendo ser utilizada a energia solar para recarregá-lo, por exemplo. Os valores de consumo de energia utilizados se encontram na Tabela 2.

Estado	Consumo (em %)
Transmitindo	0.2
Ativado	0.01
Desativado	0.001

Tabela 2. Parâmetros de consumo de energia utilizados nos experimentos.

O tempo de vida da rede é medido baseado no número de mensagens trocadas. Isso porque, como dito anteriormente, foi considerado que é realizada uma transmissão por segundo.

Os resultados consistem da média dos valores obtidos através da execução de cada experimento 30 vezes. O intervalo de confiança utilizado é igual a 95%.

5.2. Resultados dos Experimentos

Primeiramente procurou-se verificar a influência do número de camadas na quantidade de nós desativados. Para isso, o número de nós da rede foi mantido em 200, o limiar da área de monitoramento foi fixado em 20% e variou-se o número de camadas até que não fosse

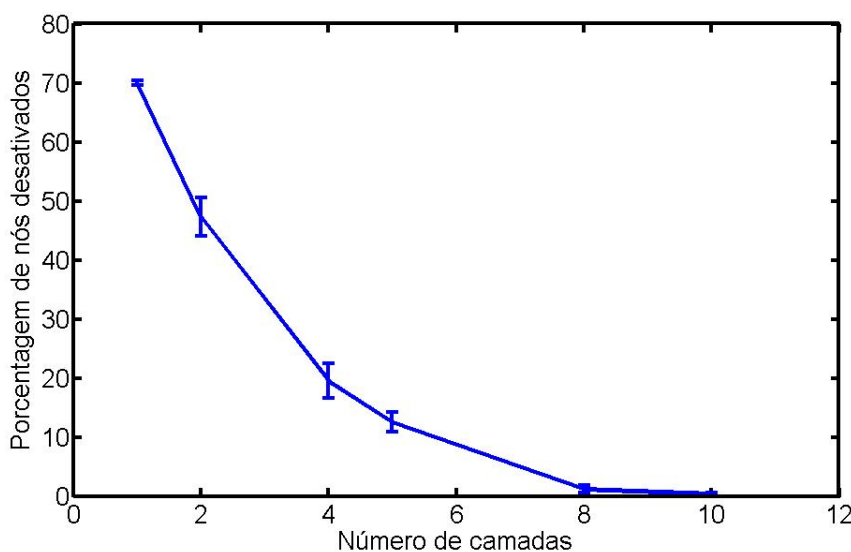
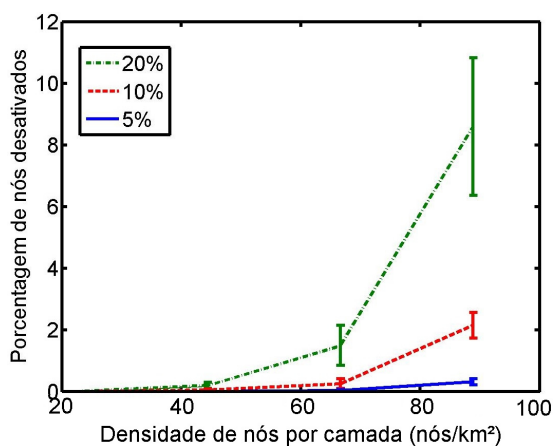
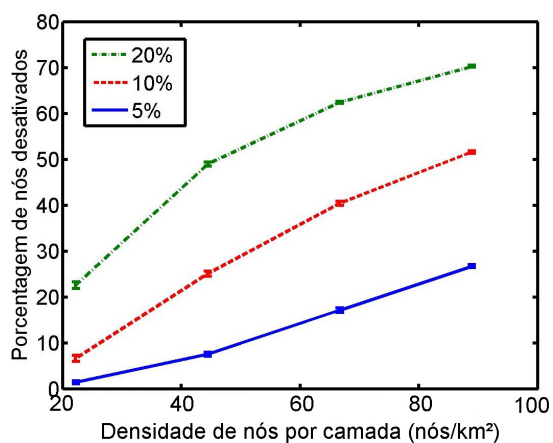


Figura 5. Porcentagem de nós desativados de acordo com o número de camadas da rede.

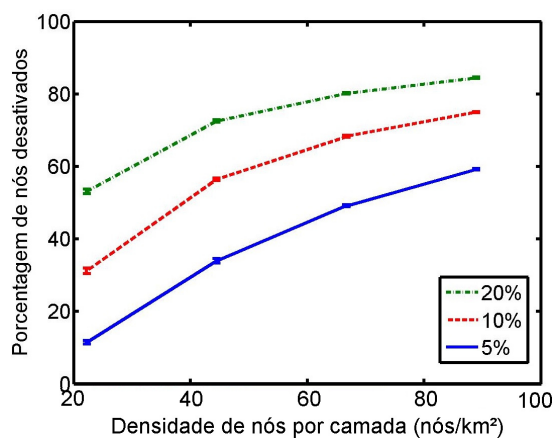
possível desativar algum nó. Como pode ser observado na Figura 5, o número de nós desativados cai rapidamente com o crescimento do número de camadas. Este comportamento era esperado, uma vez que a adição de uma nova camada aumenta a área de cobertura da rede e assim é necessário que mais nós fiquem ativos.



(a) Alcance de transmissão igual a 100 m.



(b) Alcance de transmissão igual a 250 m.



(c) Alcance de transmissão igual a 400 m.

Figura 6. Número de nós desativados por densidade de nós por camada, para três limiares de área de monitoramento, com diferentes valores de alcance de transmissão.

A Figura 6 mostra a relação entre a densidade de nós por camada e o número de nós desativados, para os limiares de área de monitoramento de 5%, 10% e 20%. O alcance de transmissão varia em cada uma das figuras, assumindo os valores de 100, 250 e 400 m nas Figuras 6(a), 6(b) e 6(c), respectivamente. É possível perceber que, como esperado, a porcentagem de nós desativados cresce a medida que a densidade de nós aumenta. Esse crescimento também pode ser observado quando se aumenta o valor do limiar da área de monitoramento. Os resultados também mostram que o alcance de transmissão impacta diretamente na quantidade de nós desativados, podendo fazer com que nenhum nó seja desativado, como mostrado na Figura 6(a), ou com que mais de 80% da rede o sejam, como na Figura 6(c).

Para verificar o tempo de vida da rede, voltou-se a considerar o limiar de área de monitoramento como 20%. A Figura 7 mostra a relação entre a densidade de nós por camada e o tempo de vida da rede, sem e com a utilização do método proposto. Nela é possível ver que a utilização do método proposto realmente leva a um aumento no tempo de vida da rede, principalmente quando se tem uma densidade de nós alta.

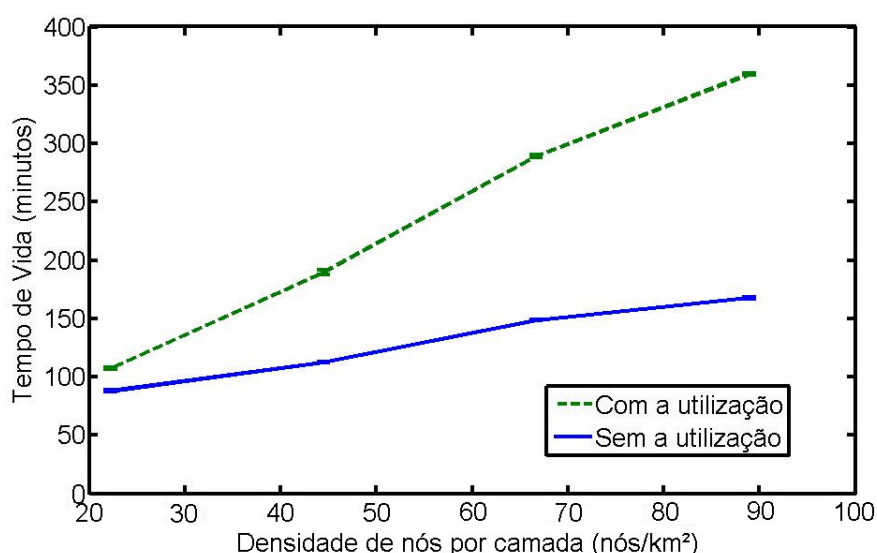


Figura 7. Tempo de vida de uma rede por densidade de nós por camada, com e sem o método proposto.

A Figura 8 mostra a relação entre o número de envio de dados até a nó *sink* e a densidade de nós por camada, com e sem a utilização do método proposto. Envios de dados ocorrem todas as vezes que se escolhe um nó para mandar seus dados para a superfície. Pode-se observar que, como consequência do aumento no tempo de vida da rede, a utilização do método proposto leva a um aumento no número de transmissões.

A relação entre o número médio de mensagens por envio de dados, variando-se a densidade de nós por camada, é mostrada na Figura 9. Percebe-se que utilizando o método proposto, o número médio de mensagens por envio é maior do que sem a sua utilização. Isso se deve principalmente ao fato de que desativar alguns nós faz com que a distância entre nós vizinhos seja maior. Com esse aumento, a probabilidade de erros em pacotes cresce e podem ser necessárias mais retransmissões para entregar os dados corretamente.

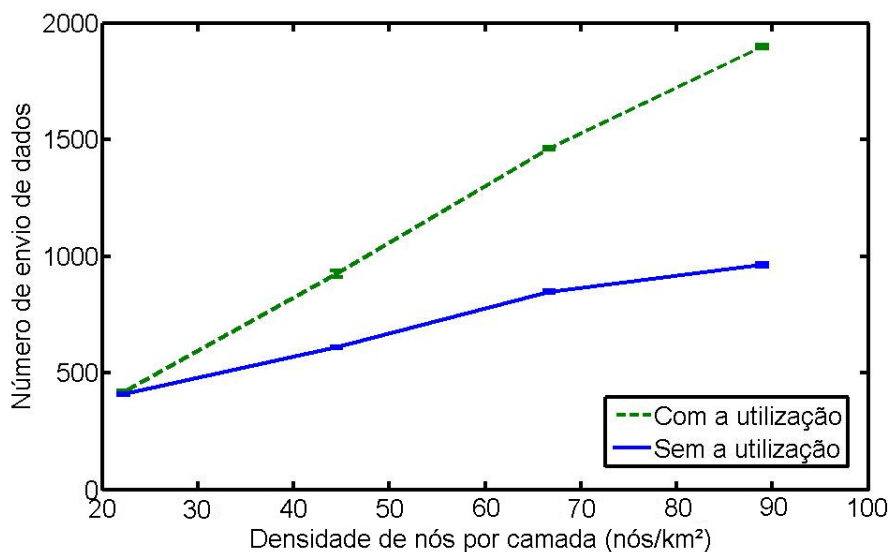


Figura 8. Número de envio de dados por densidade de nós por camada, com e sem o método proposto.

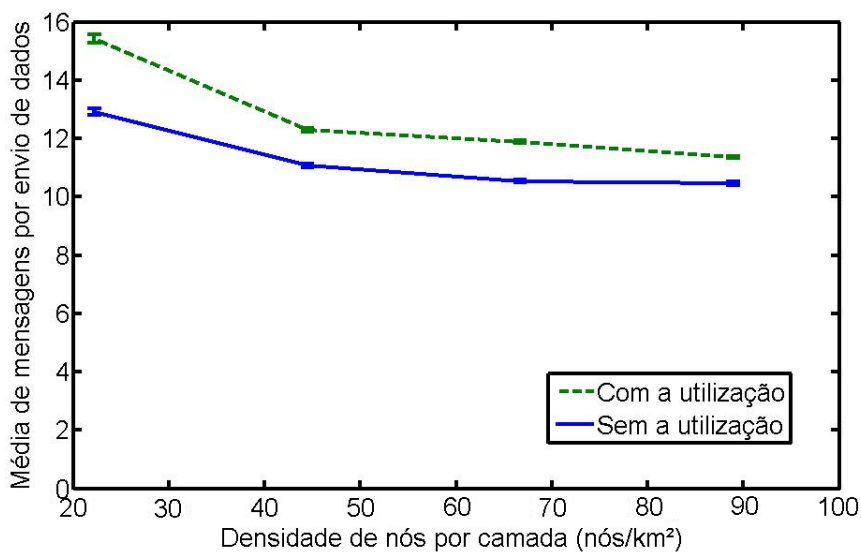


Figura 9. Número médio de mensagens por transmissão por densidade de nós por camada, com e sem o método proposto.

6. Conclusão e Trabalhos Futuros

Nesse artigo é apresentado um método para a realização do escalonamento de nós em redes de sensores aquáticas estratificadas. Este método utiliza diagramas de Voronoi em cada uma das camadas da rede para determinar quais nós podem ser desativados temporariamente. Isso possui o objetivo de poupar energia de tais nós para que eles possam ser utilizados em momentos posteriores. Um nó no entanto, só poderá ser desativado caso não desconecte outros nós da rede. Com isso esperava-se aumentar o tempo de vida da rede, ao mesmo tempo que mantém sua conectividade.

Simulações mostraram que o número de nós desativados cresce com a densidade de nós, com o alcance de transmissão e com o limiar da área de monitoramento. Elas também mostraram que, mesmo com um aumento no número médio de mensagens por envio de dados, o método proposto é capaz de cumprir seu objetivo de aumentar o tempo de vida da rede.

Como trabalhos futuros, pretende-se avaliar o uso do método quando se tem uma quantidade maior de tráfego de dados na rede. Também deverá ser avaliado o uso dele em redes aquáticas tridimensionais que não são estratificadas.

Referências

- Akyildiz, I. F., Pompili, D., and Melodia, T. (2005). Underwater acoustic sensor networks: research challenges. *Ad Hoc Networks*, 3(3):257 – 279.
- Brekhovskikh, L. M. (2003). *Fundamentals of ocean acoustics*. Springer Science & Business Media.
- Coates, R. F. (1989). *Underwater acoustic systems*. Halsted Press.
- Coutinho, R. W., Boukerche, A., Vieira, L. F., and Loureiro, A. A. (2015). Modeling and analysis of opportunistic routing in low duty-cycle underwater sensor networks. In *Proceedings of the 18th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pages 125–132. ACM.
- Coutinho, R. W., Boukerche, A., Vieira, L. F., and Loureiro, A. A. (2016a). Geographic and opportunistic routing for underwater sensor networks. *IEEE Transactions on Computers*, 65(2):548–561.
- Coutinho, R. W., Boukerche, A., Vieira, L. F., and Loureiro, A. A. (2016b). On the design of green protocols for underwater sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 54(10):67–73.
- Coutinho, R. W., Boukerche, A. F., Vieira, L., and Loureiro, A. (2016c). A novel centrality metric for topology control in underwater sensor networks. In *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pages 205–212. ACM.
- Coutinho, R. W., Vieira, L. F. M., and Loureiro, A. A. F. (2013). DCR: Depth-controlled routing protocol for underwater sensor networks. In *2013 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 453–458. IEEE.
- Coutinho, R. W. L., Boukerche, A., Vieira, L. F. M., and Loureiro, A. A. F. (2014). GE-DAR: geographic and opportunistic routing protocol with depth adjustment for mobile underwater sensor networks. In *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 251–256. IEEE.
- Coutinho, R. W. L., Boukerche, A., Vieira, L. F. M., and Loureiro, A. A. F. (2016d). Design guidelines for opportunistic routing in underwater networks. *IEEE Communications Magazine*, 54(2):40–48.
- de Berg, M., Cheond, O., van Kreveld, M., and Overmars, M. (2008). *Computational Geometry: Algorithms and Applications*. Springer-Verlag, 3rd edition.

- Erol, M., Vieira, L. F., Caruso, A., Paparella, F., Gerla, M., and Oktug, S. (2008). Multi stage underwater sensor localization using mobile beacons. In *Sensor Technologies and Applications, 2008. SENSORCOMM'08. Second International Conference on*, pages 710–714. IEEE.
- Erol, M., Vieira, L. F., and Gerla, M. (2007a). Localization with Dive'N' Rise (DNR) beacons for underwater acoustic sensor networks. In *Proceedings of the second workshop on Underwater networks*, pages 97–100. ACM.
- Erol, M., Vieira, L. F. M., and Gerla, M. (2007b). AUV-aided localization for underwater sensor networks. In *Wireless Algorithms, Systems and Applications, 2007. WASA 2007. International Conference on*, pages 44–54. IEEE.
- Lee, U., Wang, P., Noh, Y., Vieira, L. F. M., Gerla, M., and Cui, J.-H. (2010). Pressure routing for underwater sensor networks. In *INFOCOM 2010. The 29th Conference on Computer Communications. IEEE*, pages 1676–1684.
- Noh, Y., Lee, U., Lee, S., Wang, P., Vieira, L. F., Cui, J.-H., Gerla, M., and Kim, K. (2016). Hydrocast: pressure routing for underwater sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(1):333–347.
- Rappaport, T. S. et al. (1996). *Wireless communications: principles and practice*, volume 2. Prentice Hall PTR New Jersey.
- Stojanovic, M. (2007). On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 11(4):34–43.
- Vieira, L., Loureiro, A., Fernandes, A., and Campos, M. (2010). Redes de sensores aquáticas. *XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, Gramado, RS, Brasil, 24*.
- Vieira, L. F. M. (2012). Performance and trade-offs of opportunistic routing in underwater networks. In *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 2911–2915. IEEE.
- Vieira, L. F. M., Kong, J., Lee, U., and Gerla, M. (2006). Analysis of aloha protocols for underwater acoustic sensor networks. *Extended abstract from WUWNet*.
- Vieira, M., Vieira, L., Ruiz, L. B., Loureiro, A. A. F., Fernandes, A. O., and Nogueira, J. M. S. (2003). Scheduling nodes in wireless sensor networks: A voronoi approach. In *Local Computer Networks, 2003. LCN'03. Proceedings. 28th Annual IEEE International Conference on*, pages 423–429. IEEE.
- Wang, Z. and Wang, B. (2016). A novel node sinking algorithm for 3d coverage and connectivity in underwater sensor networks. *Ad Hoc Networks*.
- Wu, J., Wang, Y., and Liu, L. (2013). A voronoi-based depth-adjustment scheme for underwater wireless sensor networks. *Int. J. Smart Sens. Intell. Syst*, 6:244–258.