

# Um Protocolo de Roteamento para o Consumo Balanceado de Energia em Redes de Sensores Aquáticas

Rodolfo W. L. Coutinho<sup>1,2</sup>, Azzedine Boukerche<sup>2</sup>, Luiz F. M. Vieira e Antonio A. F. Loureiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Depto. de Ciência da Computação – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)  
Av. Antonio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG, Brasil

{rwlc, lfvieira, loureiro}@dcc.ufmg.br

<sup>2</sup>School of Electrical Engineering and Computer Science – University of Ottawa  
800 King Edward Ave., Ottawa, Canadá

boukerch@site.uottawa.ca

**Abstract.** *Opportunistic routing (OR) has emerged as a promising paradigm to the design of routing protocols for underwater sensor networks (UWSNs). However, despite of its advantages, it introduces a critical problem that has been neglected in the current proposed protocols for UWSNs: the immutable transmission priority level of the next-hop forwarding nodes, which lead to an overuse of a unique node (or a few of them), quickly depleting its battery and shortening the network lifetime. In this paper, we shed light on the need for mechanisms for rotating the forwarding priority level between candidate nodes. We propose the energy-aware opportunistic routing (EnOR) protocol, which rotates the transmission priority level of the forwarding candidate nodes by considering the remaining energy, link reliability and packet advancement of them. Simulation results reveal that EnOR effectively extends the network lifetime as compared with other underwater sensor network opportunistic routing protocols.*

**Resumo.** *Protocolos de roteamento oportunístico têm sido extensivamente propostos para redes de sensores sem fio sub-aquáticas. Apesar de seus imensos benefícios, esses protocolos geralmente introduzem um consumo desigual de energia nos nós sensores. Isso acontece por causa da atribuição imutável das prioridades de transmissão nos nós sensores, que faz com que alguns nós participem extensivamente do roteamento de dados e esgotem suas baterias rapidamente, causando partições na rede e, conseqüentemente, uma diminuição do tempo de vida útil de uma rede de sensores sub-aquática. Este trabalho propõe um novo protocolo de roteamento oportunístico, chamado de EnOR. EnOR rotaciona a prioridade de transmissão dos nós de próximo salto, considerando a energia residual, confiabilidade dos enlaces acústicos e o avanço do pacote em direção ao destinatário. Resultados de simulação mostram que o protocolo proposto, quando comparado com trabalhos relacionados, estende o tempo de vida da rede de sensores sub-aquática.*

## 1. Introdução

O projeto de protocolos e algoritmos para redes aquáticas é bastante desafiador. Isso é devido as características da comunicação acústica em ambientes aquáticos como, por

exemplo, a baixa largura de banda, alto atraso de propagação, propagação do sinal por múltiplos caminhos, alto ruído, alto custo energético para comunicação sub-aquática, entre outros [Stojanovic and Preisig 2009, Partam et al. 2006]. Tradicionalmente, uma rede de sensores sub-aquática [Akyildiz et al. 2005] é formada por nós sensores sub-aquáticos com capacidades de sensoriamento, processamento e comunicação sem fio. Estes nós são usados para colaborativamente monitorar eventos e variáveis de interesse. Além disso, em uma rede de sensores sub-aquática, um ou diversos sorvedouros (*sinks*) são depositados na superfície. Estes nós são equipados com modems acústicos e rádio, o que lhes permitem comunicação sem fio com nós sensores sub-aquáticos e com a central de monitoramento, por exemplo, um navio. Mesmo com esses desafios, redes de sensores sem fio sub-aquáticas vêm ganhando crescente atenção da comunidade científica e industrial, no Brasil e no mundo. A razão desse crescente interesse é devido aos seus benefícios para aplicações distribuídas de monitoramento e exploração de ambientes sub-aquáticos.

Em redes de sensores sub-aquáticas, protocolos de roteamento oportunísticos têm sido preferencialmente adotados [Yan et al. 2008, Xie et al. 2006, Lee et al. 2010, Noh et al. 2013, Coutinho et al. 2016b], devido ao seu potencial para entrega dos dados. No paradigma de roteamento oportunístico, um subconjunto dos nós vizinhos, chamados de **candidatos**, é determinado. Para isso, o protocolo de roteamento utiliza algum critério, tais como número esperado de transmissões, avanço do pacote em direção ao destinatário ou o atraso médio. Esses nós são aptos a continuarem o encaminhamento do pacote, via múltiplos saltos, até o destinatário. Assim, o nó fonte transmite o pacote de dados, endereçando-o para esse subconjunto dos vizinhos. Os nós selecionados como próximo salto, irão coordenadamente por meio de prioridades, continuar o processo de entrega. Nessa abordagem, como mais de um vizinho é selecionado como nó de próximo salto, um pacote transmitido só será perdido e retransmitido se nenhum dos vizinhos selecionados o receber, o que é altamente benéfico para o ambiente sub-aquático com enlaces de baixa qualidade e altas taxas de erros. Além de uma maior taxa de entrega, o roteamento oportunístico resulta em economia de energia em redes sub-aquáticas, visto que menos pacotes precisarão ser retransmitidos, o que também reduz colisões.

Contudo, protocolos de roteamento oportunísticos que atribuem sempre o mesmo valor de prioridade para os nós vizinhos, podem reduzir o tempo de vida das redes de sensores sub-aquáticas. Nesses protocolos, a escolha do mesmo subconjunto de vizinhos, além da não rotatividade das prioridades de encaminhamento entre eles, pode levar a um gasto desigual de energia. Isso acontece porque o mesmo candidato ou alguns deles (nós centrais do ponto de vista de roteamento [Coutinho et al. 2016a]) sempre encaminharão o pacote de dados. Consequentemente, eles terão suas baterias esgotadas mais rapidamente, o que levará a existência de partições da rede, diminuindo o seu tempo de vida útil. De fato, apesar de ser um problema crítico, os protocolos de roteamento propostos até o momento vêm negligenciando esse aspecto.

Neste trabalho, é proposto um novo protocolo de roteamento oportunístico, chamado de EnOR – *Energy-aware Opportunistic Routing*, para redes de sensores sub-aquáticas. O protocolo proposto tem por objetivo principal estender o tempo de vida útil da rede de sensores sub-aquática, nesse caso, definido como o tempo decorrido até que apenas uma porcentagem de nós estejam ativos. Para a seleção e priorização dos candidatos a próximo salto, EnOR considera a energia residual dos nós, o avanço do pa-

cote em direção ao destinatário e a confiabilidade do enlace para cada vizinho. A ideia básica é balancear o consumo de energia entre os candidatos por meio da rotatividade da prioridade de transmissão entre eles. Assim, o desempenho da aplicação e o tempo de vida da rede podem ser melhorados com a ausência de partições. Resultados obtidos por simulações mostram que, com relação ao tempo de vida da rede, o protocolo proposto possui desempenho superior a protocolos relacionados.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira. A Seção 2 apresenta os principais trabalhos relacionados. Em seguida, a Seção 3 apresenta brevemente a arquitetura de rede de sensores sub-aquática considerada neste trabalho, bem como o modelo matemático utilizado para estimar a probabilidade de entrega de um pacote de dados entre dois nós. A Seção 4 apresenta o protocolo proposto de roteamento oportunístico. A descrição das avaliações e os resultados obtidos por meio de simulações estão presentes na Seção 5. Finalmente, as conclusões e alguns trabalhos futuros são descritos na Seção 6.

## 2. Trabalhos Relacionados

Diversos protocolos de roteamento oportunísticos foram propostos para redes de sensores sub-aquáticas. Contudo, como apresentado a seguir, não há trabalho na literatura investigando o problema do gasto desigual de energia ocasionado pela atribuição do mesmo valor de prioridade de transmissão para cada candidato, que é a estratégia usada.

Xie et al. [Xie et al. 2006] propuseram um protocolo de roteamento em que a rota e os nós intermediários para o encaminhamento do pacote é baseado na localização do nó fonte e do *sink*. No protocolo VBF (*vector-based forwarding*), cada pacote contém a localização do nó fonte, destinatário e encaminhador. O caminho para o roteamento do pacote é especificado por um vetor de roteamento (*routing vector*) do nó fonte para o destino. Os nós que recebem o pacote determinam sua posição em relação ao vetor de roteamento e, caso estejam localizados próximo ao vetor (distância menor que um limiar pré-estabelecido), incluem sua posição no pacote e encaminham o pacote. Caso contrário, o pacote é descartado. Dessa forma, os nós encaminhadores formam um “*routing pipe*” da fonte para o destino, onde os nós nesse *pipe* são candidatos a encaminharem o pacote.

A fim de se reduzir o consumo de energia em um ambiente denso em que muitos nós podem ser envolvidos no processo de encaminhamento de dados, os autores propuseram um algoritmo para o ajuste da política de encaminhamento baseado na densidade de nós, que permite aos elementos pertencentes ao *routing pipe* pesar o benefício de encaminhar o pacote e reduzir o consumo de energia via o descarte do pacote. Nesse algoritmo, quando um nó recebe um pacote, ele determina se está próximo o suficiente do *routing vector*. Se sim, o nó manterá o pacote por um período de tempo relacionado ao seu *desirableness factor*. Durante esse período, se o nó receber um pacote duplicado de outros nós, ele calculará seu *desirableness factor* relativo a esses nós e ao nó encaminhador original. Se uma restrição é satisfeita, o nó encaminhará o pacote. Caso contrário, o nó descartará o pacote.

Yan et al. [Yan et al. 2008] propuseram o primeiro protocolo de roteamento baseado na profundidade dos nós. Nesse protocolo, chamado de DBR (*Depth Based Routing Protocol*), o encaminhamento de pacotes dos nós fontes para os *sinks* na superfície ocorre exclusivamente baseado na informação da profundidade dos nós sensores. O processo de seleção do próximo salto é feito de forma gulosa. Os nós vizinhos que

estiverem em uma profundidade menor do que a do nó fonte são aptos a continuarem o encaminhamento do pacote de dados para os destinatários. O encaminhamento do pacote a partir dos nós de próximo salto é feito de forma coordenada. Isto é, os vizinhos aptos, assim que recebem o pacote, agendam a transmissão desse pacote para um tempo futuro. Esse atraso é determinado, basicamente, a partir da diferença de profundidade entre o vizinho e o nó fonte. Dessa forma, quanto mais o nó é próximo da superfície, maior será o tempo de espera até o encaminhamento do pacote. Os demais nós, ao receberem o pacote vindo, agora, de um vizinho com profundidade menor que a sua, cancelam a transmissão do pacote.

Hydrocast [Lee et al. 2010] e VAPR [Noh et al. 2013] são dois protocolos de roteamento oportunísticos em que o processo de escolha dos candidatos são também baseados na profundidade dos nós. Esses protocolos foram propostos para reduzir o alto número de pacotes redundantes, que é observado no DBR. Para isso, eles implementam uma heurística para selecionar apenas os vizinhos que estão próximos o suficiente e conseguem ouvir a transmissão do pacote uns dos outros. Assim, quando um nó encaminhador de alta prioridade transmite o pacote, os demais nós de menor prioridade conseguirão ouvir a transmissão e suprimir suas transmissões do mesmo pacote. A principal diferença entre os protocolos Hydrocast e VAPR é que o segundo usa *beacons* direcionados para determinar quais nós vizinhos não conseguem continuar o processo de entrega do pacote usando a metodologia gulosa, isto é, quais nós não estão localizados em zonas de vazio de comunicação [Coutinho et al. 2015]. O protocolo HydroCast simplesmente seleciona os candidatos a partir de um procedimento guloso, como empregado pelo DBR.

Diferentemente dos trabalhos relacionados e, mais especificamente, dos protocolos descritos acima, este trabalho propõe o protocolo de roteamento oportunístico EnOR, que visa balancear o consumo de energia dos nós encaminhadores. Para isso, o protocolo proposto considera o gasto de energia, a qualidade do enlace e o avanço do pacote a partir de cada vizinho para determinar o conjunto de candidatos (nós encaminhadores) e seus valores de prioridade de transmissão. A partir do uso dessas variáveis, a atribuição das prioridades de transmissão nos candidatos é rotacionada ao longo do tempo, o que se leva a um gasto de energia balanceado e, conseqüentemente, um tempo de vida prolongado da rede.

### **3. Preliminares**

#### **3.1. Arquitetura de Uma Rede de Sensores Sub-aquática**

Neste trabalho, considera-se uma arquitetura de redes de sensores sub-aquáticas voltada para aplicações de longo prazo. Nessa arquitetura, nós sensores sub-aquáticos são presos a bóias ou âncoras e permanecem semi-estáticos em suas localizações de deposição. Arquiteturas desse tipo têm sido usadas, por exemplo, em aplicações de monitoramento de reservatórios hidrelétricos [Vieira et al. 2012]. Além dos nós sub-aquáticos, nós sorvedouros são depositados na superfície. AquaNode [O'Rourke et al. 2012] e Teledyne Benthos [Teledyne-Benthos, Acoustic Modems 2016]) são exemplos de nós sensores sub-aquáticos que podem ser usados na arquitetura de rede descrita. Por fim, é importante mencionar que, nessas arquiteturas, os nós sub-aquáticos irão periodicamente coletar dados sobre as variáveis de interesse e enviar esses dados para os nós sorvedouros existentes na superfície. Estes dados são, então, enviados para uma central de monitoramento.

### **3.2. O Desafio**

Um dos principais desafios em redes de sensores sub-aquáticas para aplicações de longo prazo é como prolongar o tempo de vida da rede. Dado que missões marítimas para a manutenção da rede e substituição de nós e/ou baterias são extremamente custosas, é desejável manter operacional a rede de sensores sub-aquática, o maior tempo possível. Contudo, considerando as características da topologia e os protocolos de roteamento oportunistas atuais, que não mudam as prioridades de transmissão dos nós encaminhadores, um pequeno grupo de nós centrais [Coutinho et al. 2016a], do ponto de vista de roteamento, serão muito mais demandados e, conseqüentemente, terão suas baterias esgotadas mais rapidamente. Isso resulta em partições da rede, o que encurta o seu tempo de vida e degrada o desempenho das aplicações.

Portanto, é necessário estudar e propor protocolos de roteamento oportunistas, para o balanceamento no gasto de energia dos nós em redes de sensores sub-aquáticas. Nessa direção, este trabalho propõe uma heurística, visando o prolongamento do tempo de vida útil de uma rede de sensores sub-aquática. A solução proposta, em resumo, consiste no rotacionamento da prioridade de transmissão dos candidatos, ao longo do tempo, considerando diferentes variáveis. Nós candidatos que possuem valores semelhantes de qualidade do enlace, serão alternados na tarefa de encaminhamento do pacote de dados, visto que a sua prioridade de transmissão irá mudar ao longo do tempo.

## **4. O Protocolo de Roteamento Proposto**

Esta seção descreve em detalhes o protocolo de roteamento oportunístico proposto, EnOR, que é usado para rotacionar a prioridade de transmissão dos candidatos, a fim de se alcançar um balanceamento no gasto de energia. Como a maioria dos protocolos de roteamento oportunistas, EnOR implementa dois procedimentos principais: o procedimento de seleção dos candidatos (próximo salto) e o procedimento de atribuição de prioridades de transmissão nos candidatos. Estes procedimentos são discutidos abaixo.

Antes disso, é importante mencionar que tal como qualquer outro protocolo de roteamento geográfico, o protocolo proposto EnOR é impactado pelo problema de vazios de comunicação. Esse problema tem sido extensivamente estudado na literatura, como por exemplo em [Coutinho et al. 2015]. Este trabalho, portanto, não lida com o problema de vazios de comunicação. De fato, o principal objetivo deste trabalho é focar no aspecto do gasto desbalanceado de energia, referente à tarefa de roteamento oportunístico, nos nós sensores sub-aquáticos. Esse principal objetivo do trabalho vem da necessidade de estudos e propostas de protocolos energeticamente eficientes para comunicação sem fio sub-aquática [Coutinho et al. 2016d].

### **4.1. EnOR: Procedimento para Seleção dos Candidatos**

Em síntese, EnOR considera a confiabilidade do enlace, a energia residual e o avanço do pacote a partir de cada vizinho, a fim de selecionar o conjunto de candidatos de próximo salto, que participarão do processo de encaminhamento do pacote. Para essa seleção dos candidatos, três tarefas principais são implementadas, como descritas a seguir.

### 4.1.1. Beacons Periódicos

Usando o protocolo proposto EnOR, cada nó sensor sub-aquático transmite periodicamente um *beacon*. O pacote de *beacon* contém o identificador do nó fonte, sua localização (em termos de profundidade) e a informação sobre o seu nível atual de energia. Sempre que um nó recebe um pacote de *beacon*, ele atualiza sua tabela de vizinhos com essas informações recebidas e com o valor da distância para o nó transmissor. Cada nó sub-aquático consegue estimar sua distância para o nó que transmitiu o *beacon*, a partir da potência do sinal recebido, (RSSI, do inglês *Received Signal Strength Indicator*). Essa técnica é bem conhecida e utilizada em cenários de redes sub-aquáticas, por exemplo, por algoritmos de localização nessas redes [Han et al. 2012, Carroll et al. 2014].

### 4.1.2. Algoritmo de Seleção dos Candidatos

O procedimento de seleção dos candidatos propostos no EnOR é dado pelo Algoritmo 18. Seja  $i$  um nó sensor sub-aquático qualquer com um pacote de dados para transmitir. Seja  $N_i$  a tabela de vizinhos do nó  $i$ . O processo de seleção dos candidatos ao próximo salto é feito como segue. Primeiramente, o nó fonte ( $i$ ) determina o valor de aptidão de cada vizinho que consegue avançar o pacote em direção ao destinatário (nós sorvedouros na superfície) (Linhas 3–8). É dito que um nó vizinho  $j$  avança o pacote se ele está localizado em uma profundidade menor do que o nó fonte, isto é, ele está mais próximo da superfície. O avanço feito pelo vizinho  $j$  é simplesmente calculado por:  $P_j = Profundidade(i) - Profundidade(j)$ .

---

**Algoritmo 1: PROCEDIMENTO DE SELEÇÃO DOS CANDIDATOS**

---

```
1 início
2   ▷  $i$ : nó sensor que tem um pacote de dados para transmitir.
3   para  $j \in N_i$  faça
4     se  $P_j > 0$  então
5        $F.node \leftarrow j$ 
6        $F.aptidão \leftarrow aptidão(P_j, p(d_j, m), E_{rem}^j, E_{init}^j)$ 
7     fim
8   fim
9   ordena( $F.aptidão$ , 'descendente')
10   $P_d \leftarrow 0$ ;  $\Gamma \leftarrow \emptyset$ 
11  prioridade  $\leftarrow 1$ 
12  enquanto  $P_d < \gamma$  faça
13     $\Gamma \leftarrow \Gamma \cup \{F(prioridade).node\}$ 
14     $P_d \leftarrow update()$ 
15    incrementa prioridade
16  fim
17 fim
18 retorna  $\Gamma$ 
```

---

A aptidão dos nós vizinhos (Linha 6) é calculada a partir da confiabilidade do enlace do fonte ( $i$ ) para o nó vizinho ( $j$ ), do avanço do pacote e da energia residual do nó

vizinho ( $j$ ). O valor de aptidão  $F_j$  do vizinho  $j$  é calculado por:

$$F_j = P_j \times p(d_j, m) \times \left( \frac{E_{rem}^j}{E_{init}^j} \right), \quad (1)$$

onde  $P_j > 0$  corresponde ao quanto o nó  $j$  poderá avançar o pacote, em direção ao destinatário, enviado pelo nó  $i$ ;  $p(d_j, m)$  é a probabilidade de entrega de um pacote de  $m$  bits transmitidos pelo enlace entre os nós  $i$  e  $j$ ;  $E_{rem}^j$  é o valor de energia remanescente no nó  $j$ ; e  $E_{init}^j$  é o valor de energia inicial do nó  $j$ , que na verdade, é o valor inicial de todos os nós.

Os nós vizinhos aptos a continuarem a encaminhar o pacote de dados, são ordenados de acordo com seus valores de aptidão (Linha 9). Finalmente, o conjunto de nós candidatos é determinado a partir da aptidão de cada nó. Nem todos os nós aptos são considerados como candidatos. Isso porque a quantidade de candidatos é um fator que pode influenciar no desempenho da aplicação. A escolha de poucos candidatos pode resultar em uma baixa taxa de entrega, por causa da baixa confiabilidade dos enlaces acústicos. Contudo, a escolha de muitos candidatos poderá resultar em um alto atraso na entrega do pacote. No protocolo proposto, o número de candidatos é determinado pela confiabilidade agregada dos enlaces. Dessa forma, nas Linhas 10–16, os nós vizinhos aptos são escolhidos como candidatos, dos maiores valores de aptidão para as menores, até que a confiabilidade agregada dos enlaces alcance o valor desejado  $\gamma$ . A confiabilidade agregada é calculada a partir da confiabilidade de cada enlace, dado por:

$$P_d = 1 - \prod_{j=1}^{|\Gamma|} [1 - p(d_j, m)], \quad (2)$$

onde  $p(d_j, m)$  é a probabilidade de entrega de um pacote de  $m$  bits transmitido pelo nó  $i$  para um nó  $j$ , distantes  $m$  metros.

### 4.1.3. Prioridade de Transmissão dos Candidatos

É importante mencionar que o EnOR intrinsecamente lida com o problema da imutabilidade das prioridades de transmissão dos candidatos. No EnOR, essas prioridades são rotacionadas ao longo do tempo. Isso acontece devido ao uso da energia residual dos candidatos, no processo de seleção deles, dado pela Eq. 1. Dessa forma, os vizinhos com baixa energia residual terão baixa prioridade de transmissão, mesmo sendo os melhores candidatos em termos de avanço do pacote em direção ao destinatário. Altas prioridades de transmissão são atribuídas a nós com maior valor de energia residual.

### 4.1.4. Transmissão do Pacote de Dados

Após a seleção dos candidatos e a atribuição das prioridades de transmissão, o nó fonte atual transmite o pacote em *broadcast*. No cabeçalho do pacote, o nó fonte inclui a lista de identificadores dos candidatos e a distância  $D_{max}$  para o candidato mais longe. Os identificadores dos candidatos são incluídos em formato ascendente às suas prioridades

de transmissão. Isso é para informar o candidato a sua prioridade. Dessa forma, um candidato qualquer somente encaminha o pacote se ele não detectar o encaminhamento do mesmo pacote a partir de um nó com prioridade mais alta. A distância entre o nó fonte e o candidato mais longe é usada para a coordenação das transmissões por meio de temporizadores, como será descrito na próxima seção.

## 4.2. EnOR: Algoritmo de Coordenação das Transmissões

A coordenação das transmissões dos candidatos é um dos problemas mais desafiadores no projeto de protocolos de roteamento oportunistas. Uma discussão detalhada sobre esse aspecto é apresentada em [Coutinho et al. 2016c].

EnOR implementa um procedimento baseado em temporizador, para a coordenação das transmissões dos candidatos. Nessa abordagem, um *slot* para transmissão é atribuído a cada candidato, de acordo as suas prioridades. Isso pode ser implementado localmente, sem o auxílio de pacotes de controle, o que é desejado para redes de sensores sub-aquáticas. O procedimento adotado pelo EnOR funciona como segue. Cada nó candidato agenda a transmissão do pacote recebido para um tempo futuro. Esse atraso é proporcional ao nível de prioridade do candidato. Quando esse tempo expira, o candidato, então, encaminha o pacote de dados, caso ele não detecte que houve o encaminhamento do mesmo pacote, por um nó de maior prioridade. Essa abordagem é simples e escalável. Além disso, ela não acarreta em *overhead* para a rede. Contudo, uma vez que nós candidatos não encaminham o pacote imediatamente, tem-se um maior atraso para a entrega do pacote.

### 4.2.1. Tempo de Espera Antes do Encaminhamento

Em uma coordenação baseada em temporizador, um nó deverá esperar um tempo relativo à sua prioridade. Esse tempo deve ser um pouco maior ao tempo necessário pelo seu predecessor de alta prioridade para receber, processar e encaminhar o pacote. Além disso, esse atraso deverá considerar o tempo de propagação do pacote encaminhado pelo nó de maior prioridade. Somente após esse tempo, caso o candidato em questão não detecte o encaminhamento do pacote por um nó de maior prioridade, ele encaminha o pacote. Para determinar esse tempo de retenção do pacote, o procedimento de seleção do conjunto de candidatos deve garantir que todos os nós do conjunto são vizinhos, que permitem detectar as transmissões dos outros e que conheçam as distâncias entre si. A informação da distância entre eles é incluída no cabeçalho do pacote de dados. Para evitar um longo cabeçalho no pacote do EnOR, o tempo de espera de pacote, com base na prioridade dos nós, deve considerar a maior distância entre o remetente e os candidatos. Assim, ao receber um pacote de dados, o nó candidato retém o pacote durante um certo tempo  $T_h$  dado como:

$$T_h(p) = \begin{cases} \frac{R - D_{\max}}{v}, & \text{if } p = 1 \\ \frac{R + p \times D_{\max}}{v}, & \text{if } p > 1, \end{cases} \quad (3)$$

onde  $R$  é o valor do raio de comunicação,  $D_{\max}$  é a distância entre o nó fonte e o candidato mais longe,  $p$  é a prioridade do candidato que recebeu o pacote e está calculando seu

tempo de retenção do pacote e  $v$  é a velocidade de propagação do sinal acústico, dado aproximadamente por 1500 m/s.

#### **4.2.2. Supressão de Transmissões Redundantes**

A supressão de transmissões desnecessárias é importante, visto que encaminhamentos redundantes de pacotes afetam diretamente o desempenho da rede. Nos protocolos VBF [Xie et al. 2006] e DBR [Yan et al. 2008], um nó de baixa prioridade cancelará a transmissão de um pacote agendado se o nó escutar a transmissão do mesmo pacote por um nó de alta prioridade. Em ambos os protocolos, espera-se ter um número elevado de pacotes redundantes devido ao problema do terminal oculto.

A fim de se reduzir as transmissões redundantes ocasionadas pelo problema do terminal oculto, os protocolos Hydrocast [Lee et al. 2010], VAPR [Noh et al. 2013] e GEDAR [Coutinho et al. 2016b] procuram selecionar como candidatos, os nós vizinhos que estão distantes entre si e no máximo o valor do rádio de comunicação. Assim, um nó candidato pode ouvir as transmissões de seus vizinhos. No entanto, isso não é suficiente para evitar o problema de terminal oculto dada a atenuação do sinal e o ambiente sub-aquático ruidoso.

EnOR emprega um mecanismo de supressão ativo. No mecanismo proposto, sempre que um nó sub-aquático de alta prioridade encaminha o pacote de dados, todos os nós de baixa prioridade que ouvem a transmissão cancelam o encaminhamento do mesmo pacote. Além disso, o nó fonte, ao receber seu pacote encaminhado por um candidato, envia um curto pacote de supressão, contendo o seu identificador e o número de sequência do pacote transmitido. Assim, todos os candidatos que recebem esse pacote de supressão, cancelam o encaminhamento do pacote de dados referente a esse alerta.

### **5. Avaliação de Desempenho**

Nesta seção, é avaliado o desempenho do protocolo de roteamento oportunístico EnOR. Seu desempenho é comparado com outros dois protocolos de roteamento oportunísticos para redes sub-aquáticas: DBR [Yan et al. 2008] e VAPR [Noh et al. 2013].

#### **5.1. Metodologia**

A avaliação de desempenho realizada neste trabalho foi feita através de simulações, usando o simulador Aqua-Sim v.1.0 [Xie et al. 2009]. Aqua-Sim é um simulador de rede sub-aquática, baseado no ns-2.30. Esse simulador implementa as deficiências da comunicação acústica, tais como a atenuação do sinal acústico e as colisões de pacotes no ambiente sub-aquático.

Com relação à topologia de rede, nós sensores sub-aquáticos são distribuídos aleatoriamente na região de interesse. Para a deposição dos sorvedouros, a área de interesse é dividida em uma grade de quatro quadrados de lado  $l$  igual a 500 m. Em cada quadrado, 16 sorvedouros são distribuídos aleatoriamente. Em termos de densidade da rede, dois cenários são considerados: 150 e 350 nós sensores sub-aquáticos. Nas simulações, as configurações dos parâmetros são baseadas nos trabalhos encontrados na literatura, tais como em [Yan et al. 2008, Lee et al. 2010, Noh et al. 2013]. Esses valores

**Table 1. Parâmetros de simulação e propriedades da topologia da rede.**

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Área de interesse	(1000 m) <sup>3</sup>	Raio de comunicação ( $r_c$ )	250 m
Número de sub-áreas ( $K$ )	4	Largura de banda ( $B$ )	20 kb/s
Tamanho da sub-área ( $l$ )	500 m×500 m	Protocolo MAC	CSMA
Número de <i>sinks</i> ( $\mathcal{N}_s/K$ )	16 <i>sinks</i> /sub-área	Tam. do pacote de dados	100 bytes
Quant. de nós sensores	150, 350 nodes	Custo energético para transmissão ( $P_t$ )	4 W
Duração da simulação	2 dias	Custo energético para recepção ( $P_r$ )	0.65 W
Taxa de geração de pacotes ( $\lambda$ )	0.01 pac./min	Limiar de qualidade de link ( $\gamma$ )	0.9

são mostrados na Tabela 1. Os resultados apresentados correspondem a um valor médio de 50 execuções com intervalo de confiança de 95 %.

EnOR usa a confiabilidade do enlace para a seleção do conjunto de candidatos. Neste trabalho, utilizamos o modelo de canal acústico de Urick [Urick 1983], para estimar a confiabilidade do enlace, em termos de probabilidade de entrega de pacotes, entre dois nós sensores sub-aquáticos, como descrito a seguir.

A perda na potência do sinal em caminho de distância  $d$  em uma frequência  $f$  devido ao desvanecimento em larga escala é dada por:

$$A(d, f) = d^k a(f)^d. \quad (4)$$

Na Eq. 4,  $k$  é o fator de dispersão e  $a(f)$  é o coeficiente de absorção. A geometria da propagação é descrita usando um fator de dispersão ( $1 \leq k \leq 2$ )ç para um cenário prático,  $k$  é dado por 1.5. O coeficiente de absorção  $a(f)$  é calculado pela fórmula de Thorp [Brekhovskikh and Lysanov 2003], dado por:

$$10 \log a(f) = \frac{0.11 \times f^2}{1 + f^2} + \frac{44 \times f^2}{4100 + f} + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.003. \quad (5)$$

A média da razão entre sinal-ruído (SNR – *Singal-to-Noise Ratio*) por uma distância  $d$  é dada por:

$$\Gamma(d) = \frac{E_b/A(d, f)}{N_0} = \frac{E_b}{N_0 d^k a(f)^d}, \quad (6)$$

onde  $E_b$  e  $N_0$  são constantes que representam a energia média de transmissão por bit e a densidade de ruído potência em um canal sem desvanecimento e com ruído gaussiano branco aditivo (AWGN – *non-fading additive white Gaussian noise*). Como mostrado em [Stojanovic 1996] e [Carbonelli and Mitra 2006], o modelo de desvanecimento Rayleigh é usado para modelar desvanecimento em pequena escala, onde o SNR tem a seguinte distribuição de probabilidade:

$$p_d(X) = \int_0^\infty \frac{1}{\Gamma(d)} e^{-\frac{x}{\Gamma(d)}}. \quad (7)$$

A probabilidade de erro pode ser avaliada como:

$$p_e(d) = \int_0^{\infty} p_e(X)p_d(X)dX. \quad (8)$$

onde  $p_e(X)$  é a probabilidade de erro para uma modulação arbitrária para valores específicos do SNR  $X$ . Neste trabalho, usamos a modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) que é vastamente utilizada no estado da arte dos modems acústicos [Freitag et al. 2005, Stojanovic and Preisig 2009, Yang et al. 2009]. Na modulação BPSK, cada símbolo carrega um bit. A probabilidade de erro no bit, dada uma distância  $d$ , é dada por [Rappaport 2002]:

$$p_e(d) = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\Gamma(d)}{1 + \Gamma(d)}} \right). \quad (9)$$

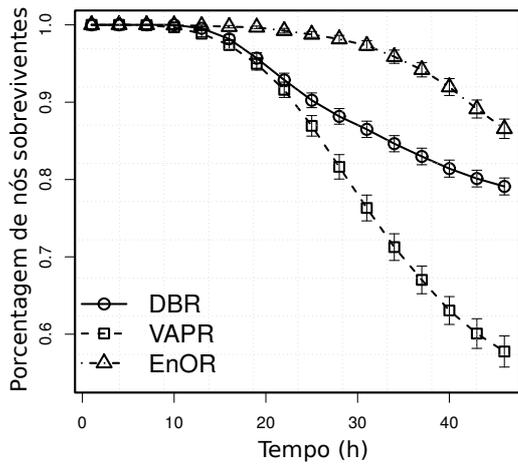
Assim, a probabilidade de entrega de um pacote com tamanho  $m$  bits, transmitido entre um par de nós com distância de  $d$  metros, pode ser calculada por:

$$p(d, m) = (1 - p_e(d))^m. \quad (10)$$

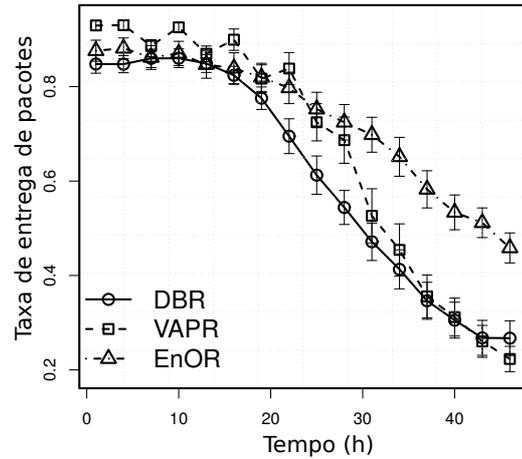
## 5.2. Resultados

As Figuras 1(a) e 2(a) mostram a taxa de nós sobreviventes ao longo do tempo. Nota-se que a fração de nós sobreviventes reduz rapidamente no cenário de rede de alta densidade, mostrado na Figura 2(a). Isso acontece devido ao custo de energia para recepção de pacotes e o meio *broadcast* de transmissão sem fio, que faz com que todos os nós no alcance de comunicação do nó fonte recebam o pacote de dados, mesmo quando este é endereçado a um nó específico. Os resultados mostram que o protocolo proposto estende significativamente a vida útil da rede, quando comparado com os protocolos DBR e VAPR. Isto acontece devido ao rotacionamento das prioridades de transmissão dos candidatos, em função de sua energia residual. Com relação aos protocolos DBR e VAPR, os resultados mostram que a exaustão das baterias dos nós ocorre de forma não homogênea em ambos os cenários, devido ao fato de que esses protocolos selecionam os candidatos apenas considerando o avanço do pacote a partir de cada vizinho. Isso faz com que o mesmo candidato seja o nó de maior prioridade e encaminhador do pacote.

O comportamento acima mencionado reflete no desempenho da rede. As Figuras 1(b) e 2(b) mostram a taxa de entrega de pacotes. Essa métrica é calculada como a porcentagem dos pacotes de dados recebidos durante um período de tempo pré-determinado (1 hora). A taxa de entrega de dados dos protocolos de roteamento oportunistas avaliados, diminuem em função do tempo. Essa diminuição é associado ao fato que alguns nós sensores esgotam suas baterias ao longo do tempo, como corroborado pelas Figuras 1(a) e 2(a). No EnOR, a taxa de entrega de pacotes é maior que 90% em 87% do tempo para cenários de baixa densidade (veja Figura 1(b)) em comparação com VAPR e DBR, respectivamente. Isso porque mais nós estão ativos, como observado para cenários de alta densidade como mostrado na Figura 2(a).

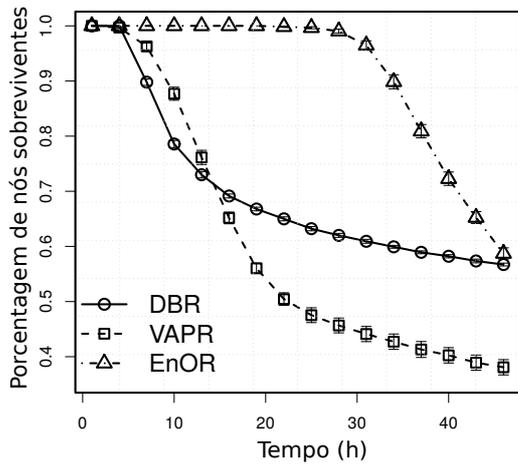


(a) Fração de nós sobreviventes

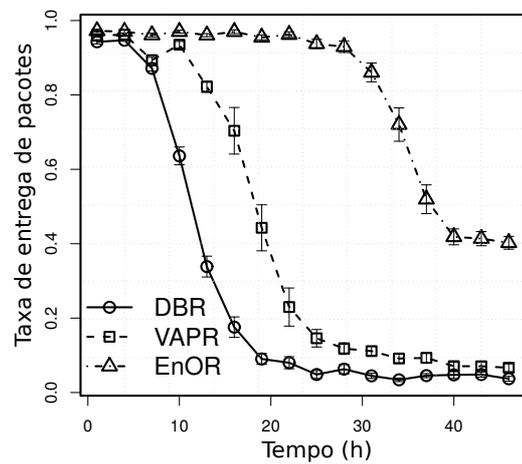


(b) Taxa de entrega de pacotes

**Figure 1. Resultados: Cenário com 150 nós sensores sub-aquáticos**



(a) Fração de nós sobreviventes



(b) Taxa de entrega de pacotes

**Figure 2. Resultados: Cenário com 350 nós**

## 6. Conclusão

Neste trabalho, abordamos o problema de imutabilidade da prioridade de transmissão de nós candidatos, em protocolos de roteamento oportunísticos em redes de sensores sub-aquáticas. Propusemos um novo protocolo de roteamento oportunístico, chamado EnOR, que considera a energia residual dos vizinhos, a confiabilidade do enlace para cada vizinho e o quanto cada vizinho avança o pacote de dados em direção ao destinatário. No protocolo proposto, essas métricas foram utilizadas para selecionar os nós candidatos e priorizar seus encaminhamentos de pacotes de dados. O principal objetivo da nossa proposta foi alcançar um balanceamento de energia nos nós sensores, para estender o tempo de vida da rede. Os resultados de simulação confirmaram que o protocolo proposto efetivamente prolonga a vida útil dos nós sensores sub-aquáticos. Como consequência imediata, o desempenho da rede foi melhorado. Como trabalho futuro, pretendemos combinar o EnOR com a solução para o problema de vazão de comunicação [Coutinho et al. 2016d].

## References

- 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. and Lysanov, Y. (2003). *Fundamentals of Ocean Acoustics*. Springer.
- Carbonelli, C. and Mitra, U. (2006). Cooperative multihop communication for underwater acoustic networks. In *WUWNet'06*, pages 97–100.
- Carroll, P., Mahmood, K., Zhou, S., Zhou, H., Xu, X., and Cui, J.-H. (2014). On-demand asynchronous localization for underwater sensor networks. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 62(13):3337–3348.
- Coutinho, R. W., Boukerche, A., Vieira, L. F., and Loureiro, A. A. (2016a). A novel centrality metric for topology control in underwater sensor networks. In *Proc. of the 19th ACM MSWiM*.
- Coutinho, R. W. L., Boukerche, A., M.Vieira, L. F., and Loureiro, A. A. F. (2016b). Geographic and opportunistic routing for underwater sensor networks. *IEEE Trans. on Computers*, 65(2):548–561.
- Coutinho, R. W. L., Boukerche, A., Vieira, L. F. M., and Loureiro, A. A. (2015). A novel void node recovery paradigm for long-term underwater sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 34:144 – 156.
- Coutinho, R. W. L., Boukerche, A., Vieira, L. F. M., and Loureiro, A. A. F. (2016c). Design guidelines for opportunistic routing in underwater networks. *IEEE Commun. Magazine*, 54(2):40–48.
- Coutinho, R. W. L., Boukerche, A., Vieira, L. F. M., and Loureiro, A. A. F. (2016d). On the design of green protocols for underwater sensor networks. *IEEE Commun. Magazine*, 54(10):67–73.
- Freitag, L., Grund, M., Singh, S., Partan, J., Koski, P., and Ball, K. (2005). The whoi micro-modem: An acoustic communications and navigation system for multiple platforms. In *Oceans'05*.
- Han, G., Jiang, J., Shu, L., Xu, Y., and Wang, F. (2012). Localization algorithms of underwater wireless sensor networks: A survey. *Sensors*, 12(2):2026–2061.
- Lee, U. et al. (2010). Pressure routing for underwater sensor networks. In *Proc. of the IEEE INFOCOM*, pages 1–9.
- Noh, Y., Lee, U., Wang, P., Choi, B. S. C., and Gerla, M. (2013). VAPR: void-aware pressure routing for underwater sensor networks. *IEEE Trans. on Mobile Comput.*, 12(5):895–908.
- O'Rourke, M., Basha, E., and Detweiler, C. (2012). Multi-modal communications in underwater sensor networks using depth adjustment. In *Proc. of the 17th ACM WUWNet*, pages 31:1–31:5.
- Partam, J., Kurose, J., and N., L. B. (2006). A Survey of Practical Issues in Underwater Networks. In *Proc. of the ACM WUWNet*.
- Rappaport, T. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall.

- Stojanovic, M. (1996). Recent Advances in High-speed Underwater Acoustic Communications. *IEEE Journal of Oceanic Engin.*, pages 125–136.
- Stojanovic, M. and Preisig, J. (2009). Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization. *IEEE Communications Magazine*, 47(1):84–89.
- Teledyne-Benthos, Acoustic Modems (2016). <http://teledynebenthos.com>. [Online].
- Urick, J. R. (1983). *Principles of Underwater Sound*. McGraw-Hill.
- Vieira, L. F. M., Vieira, M. A. M., Pinto, D., Nacif, J. A. M., Viana, S. S., and Vieira, A. B. (2012). Hydronode: An underwater sensor node prototype for monitoring hydroelectric reservoirs. In *Proc. of the 17th ACM WUWNet*, pages 43:1–43:2.
- Xie, P., Cui, J.-H., and Lao, L. (2006). VBF: Vector-Based Forwarding Protocol for Underwater Sensor Networks. In *IFIP Networking'06*.
- Xie, P., Zhou, Z., Peng, Z., Yan, H., Hu, T., Cui, J.-H., Shi, Z., Fei, Y., and Zhou, S. (2009). Aqua-Sim: An NS-2 based simulator for underwater sensor networks. In *Proc. of the MTS/IEEE OCEANS*, pages 1–7.
- Yan, H., Shi, Z., and Cui, J.-H. (2008). DBR: depth-based routing for underwater sensor networks. In *Ad Hoc and Sensor Networks, Wireless Networks, Next Generation Internet*, volume 4982 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 72–86. Springer Berlin Heidelberg.
- Yang, H., Liu, B., Ren, F., Wen, H., and Lin, C. (2009). Optimization of energy efficient transmission in underwater sensor networks. In *Proc. of the IEEE GLOBECOM*, pages 1–6.