

# Um Protocolo Cooperativo para Acesso ao Meio em Redes de Sensores Aquáticas Sem Fio.

Lucas S. Cerqueira<sup>1</sup>, Felipe R. da Silva<sup>1</sup>, Luiz Filipe M. Vieira<sup>2</sup>,  
Marcos Augusto M. Vieira<sup>2</sup>, José Augusto M. Nacif<sup>3</sup>, Alex B. Vieira<sup>1</sup>,

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

<sup>2</sup>Departamento de Ciência da Computação  
Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, MG – Brasil.

<sup>3</sup>Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas  
Universidade Federal de Viçosa – Florestal, MG – Brasil.

lucas.saar@ice.ufjf.br, {alex.borges, felipe.rooke}@ufjf.edu.br,  
{lfvieira, mmvieira}@dcc.ufmg.br, jnacif@ufv.br

**Abstract.** *Wireless communication in aquatic environments poses great challenges, since electromagnetic and optical waves do not propagate for long distances in the environment. In this scenario, an acoustic channel becomes a better option, even though bringing challenges as a higher latency, lower bandwidth and higher error rate. To improve the communication quality, this work proposes a MAC layer protocol based on the time division multiple access (TDMA) scheme and that uses cooperation, thereby taking advantage of the idleness of the nodes to retransmit messages that have failed. Our protocol has been evaluated on the ns-3 simulator and, the results show a significant improvement in the network metrics. For example, the average packet loss rate is reduced by up to 26% and goodput increases by up to 7.36%.*

**Resumo.** *A comunicação sem fio em ambientes aquáticos impõe grandes desafios, uma vez que ondas eletromagnéticas e ópticas não se propagam por longas distâncias nesse meio. Nesse cenário, um canal acústico se torna uma melhor opção, ainda que trazendo desafios como uma maior latência na propagação do sinal, largura de banda menor e alta taxa de erros. De forma a melhorar a qualidade na comunicação, este trabalho propõe um protocolo em camada MAC baseado no esquema de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA) e que utiliza cooperação, aproveitando assim a ociosidade dos nós para retransmissão de mensagens que falham. O protocolo proposto foi avaliado por simulações no ns-3 e, os resultados obtidos mostram que há uma melhora significativa nas métricas de rede avaliadas. Por exemplo, a taxa de perda de pacotes, na média, se reduz em até 26% e o goodput aumenta em até 7,36%.*

## 1. Introdução

As redes de sensores aquáticos (RSAs) tem se mostrado uma importante área de estudo e sua aplicação é cada vez mais frequente. O uso dessas redes em aplicações militares, comerciais e até mesmo em pesquisa tornam factíveis um número de tarefas até então

desafiadoras. Por exemplo, com o uso de RSAs, é possível realizar com eficiência o monitoramento da vida aquática e da qualidade da água, a exploração de recursos naturais como petróleo e gás, a detecção de minas e veículos submarinos e até mesmo, prevenção de desastres como tsunamis e derramamento de petróleo [Felemban et al. 2015].

As condições do meio aquático impõem grandes dificuldades na comunicação de dados. Na água, ondas eletromagnéticas e ópticas sofrem alta atenuação, sendo absorvidas em poucos metros [Brekhovskikh 2003]. Logo, redes baseadas em ondas de rádio não são apropriadas para o meio aquático. Assim, ondas acústicas têm sido adotadas como padrão tanto na indústria quanto na área acadêmica. No entanto, o canal acústico é caracterizado por três grandes desafios: largura de banda limitada e dependente da distância, o desvanecimento multi-caminho variado pelo tempo e a baixa velocidade do som na água [Heidemann et al. 2012]. Além disso, RSAs possuem energia limitada, o que torna o consumo de energia fator crucial no desenvolvimento de novas tecnologias nessa área.

Para melhorar a qualidade da comunicação e superar esses desafios, muitas técnicas vêm sendo estudadas em roteamento, protocolos MAC e camada física. Uma dessas técnicas é a transmissão cooperativa de mensagens que tenta aproveitar a ociosidade dos nós para retransmitir mensagens que falharam [Dianati et al. 2006]. De forma breve, uma transmissão em meio aquático é feita por *broadcast*. Assim, nós intermediários que escutam uma transmissão que falhou podem servir como cooperadores (*relays*) e retransmitir a mensagem. Assim, o nó que originou a mensagem pode tentar ir adiante, deixando a tarefa de retransmissão com seus parceiros de cooperação. Ou então, ambos podem tentar retransmitir a mesma mensagem, aumentando assim a diversidade de caminhos de transmissão. Enquanto a primeira abordagem aumenta principalmente a vazão, a segunda diminui a taxa de erros.

Neste trabalho é proposto um protocolo com cooperação na camada MAC. Para tal utilizamos o esquema de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA). O protocolo funciona a partir da sinalização de quais mensagens falharam na última rodada de transmissão. A partir daí, os nós que tenham recebido estas mensagens com sucesso, e que estão ociosos, podem retransmití-las no lugar dos nós originais.

Muitos trabalhos utilizam a cooperação de maneira semelhante a um roteamento, selecionando o melhor *relay* para transmitir sua mensagem [Cheng et al. 2012, Carbonelli and Mitra 2006]. Em nosso trabalho, a cooperação é um mecanismo de recuperação de falhas. Um esquema semelhante é proposto por [Lee et al. 2010], permitindo a retransmissão de mensagens que falharam, porém o controle de acesso ao meio não é considerado. A principal diferença em relação a cooperação é a escolha do *relay* que, em nosso esquema os *relays* se elegem através de mensagens de cooperação WTC ao invés de serem escolhidos pelo nó destino.

O novo protocolo foi avaliado por simulações no ns-3. Foram avaliados cenários compostos por 16 nós que tentam realizar uma comunicação com um nó destino. Em comparação com um cenário sem cooperação, os resultados obtidos mostram que há uma melhora significativa nas métricas de rede avaliadas. Por exemplo, a taxa de perda de pacote, na média, se reduz em até 26%, o *goodput* aumenta em até 7,36% sendo que energia total gasta por pacote entregue com sucesso se reduz em até 6,81%.

## 2. Formulação do Problema

No meio aquático, a comunicação apresenta alta taxa de erros, baixa vazão e baixa largura de banda. Isso caracteriza de forma única RSAs [Vieira et al. 2010]. Em especial, o problema abordado neste trabalho é a baixa eficiência de transmissão de dados no canal acústico: baixa vazão, alto consumo de energia e alta perda de pacotes.

Neste trabalho consideramos uma rede de sensores aquáticos com saltos únicos composta por  $N$  nós e um nó destino. Nesta rede todos os pacotes de dados gerados são endereçados para o nó destino. Consideramos também um esquema de acesso ao meio baseado em divisão por tempo (TDMA). Tipicamente, no protocolo TDMA, a cada nó é atribuído um período de tempo, denominado *slot*, no qual o acesso ao meio é exclusivo. Um nó é dito ocioso quando, em seu *slot*, ele não possui dados a serem transmitidos. Tais períodos de ociosidade podem ser utilizados para a retransmissão de mensagens que falharam de outros nós, o que chamamos –de forma ampla– de cooperação.

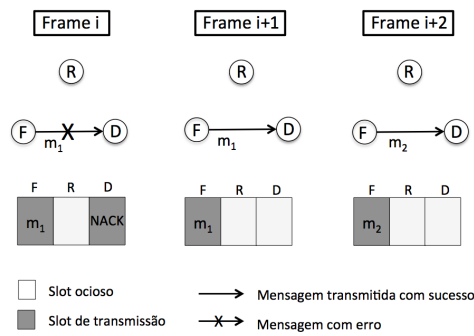
No meio aquático podemos estimar a probabilidade de entrega de pacotes baseado na frequência  $f$  de transmissão, na modulação da onda acústica, na distância  $d$  entre os nós transmissor e receptor [Vieira et al. 2010] e na quantidade de ruído. A perda na potência do sinal em caminho devido ao desvanecimento em larga escala é dada por  $A(d, f) = d^k a(f)^d$ , onde  $k$  é o fator de dispersão que, para um cenário prático, é dado por 1,5.  $a(f)$  é o coeficiente de absorção dado pela fórmula de Thorp em [Brekhovskikh 2003]. Com isso calculamos a razão entre sinal-ruído  $\gamma(d) = SL - A(d, f) - NL + DI$ , onde  $SL$  é a potência do sinal de transmissão,  $NL$  é o barulho ambiente dado pela equação de Wenz em [Wenz 1962], e  $DI$  é o fator diretivo que para hidrofones (e.g. modens acústicos) omnidirecionais  $DI = 0$  [Wang et al. 2016].

Podemos então descrever a probabilidade de erro no bit, para a modulação BPSK, dada uma distância  $d$  [Rappaport 2002] como:  $p_e(d) = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\Gamma(d)}{1+\Gamma(d)}} \right)$ , onde  $\Gamma(d)$  é dado por  $\Gamma(d) = 10^{\gamma(d)/10}$ .

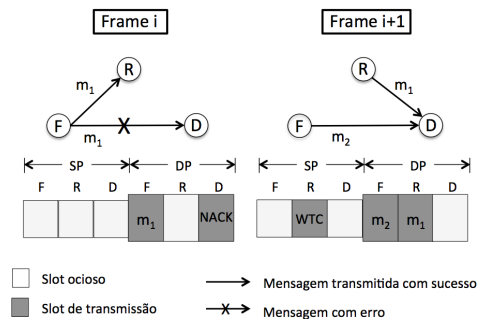
## 3. Protocolo MAC cooperativo para redes aquáticas

No esquema TDMA, cada nó da rede recebe um *slot* de igual tamanho de tempo. Quando o último nó termina seu *slot*, é reiniciado o *slot* do primeiro nó, completando um ciclo. O período que compreende os *slots* do primeiro ao último nó é chamado de *frame*. Em um *frame*, cada nó da rede recebe um *slot* para que possa transmitir mensagens. O *slot* do nó destino é utilizado para sinalizar quais mensagens do *frame* atual falharam, enviando uma única mensagem chamada NACK. A figura 1 ilustra a operação de uma rede com três nós: fonte (F), *relay* (R) e destino (D). Neste exemplo o nó fonte possui duas mensagens a serem transmitidas para D:  $m_1$  e  $m_2$ . No *frame*  $i$ , o nó fonte transmite  $m_1$  mas a mensagem falha, então o nó destino transmite um NACK para sinalizar o reenvio. No *frame*  $i + 1$ , F retransmite  $m_1$  e no *frame*  $i + 2$ , transmite  $m_2$ .

Sem perda de generalidade, propomos uma modificação do TDMA onde cada *frame* possui um período de sinalização (SP) e um período de dados (DP). O período de sinalização é utilizado para a troca de mensagens de controle de cooperação (WTC). No período de dados ocorre a troca de mensagens como no TDMA tradicional. A figura 2 ilustra o mesmo cenário da figura 1, porém agora, com cooperação. No *frame*  $i$ , o nó R



**Figura 1. Exemplo de TDMA sem cooperação**



**Figura 2. Modo de operação com cooperação**

recebe  $m_1$  com sucesso e, logo em seguida, o NACK transmitido por D. No próximo *frame* R está ocioso e possui a mensagem  $m_1$ , logo, sinaliza que vai cooperar em seu próximo *slot* enviando a mensagem WTC. Assim, o nó F pode transmitir sua próxima mensagem  $m_2$  no mesmo *frame* que R retransmite  $m_1$ . Observe que as mesmas duas mensagens foram enviadas utilizando dois *frames* ao invés de três, como no exemplo da figura 1.

A escolha do *relay* é crucial para o sucesso da cooperação. Em nossa abordagem, ordenamos os *slots* dos *relays* em relação a sua distância do nó destino, semelhante ao que foi feito em [Domingo 2011]. Assim, os primeiros *slots* de cada *frame* serão os dos *relays* mais próximos do destino, dando-os maior oportunidade de se tornarem nós cooperadores. O primeiro nó a enviar a mensagem WTC será escolhido como cooperador. Estes nós são priorizados por possuírem uma menor taxa de erro de pacote em relação aos nós mais distantes, devido a taxa de erro de pacote ser proporcional a distância, de acordo com a equação de probabilidade de erro no bit apresentada da seção 2. Estes nós transmitem mais mensagens que os outros *relays*, causando um consumo desigual de energia.

## 4. Avaliação

### 4.1. Metodologia de avaliação

Para avaliar o protocolo proposto, utilizamos o ns-3<sup>1</sup>, um simulador de redes baseado em eventos discretos. Implementamos no ns-3 o protocolo proposto juntamente com o TDMA tradicional e a equação de probabilidade de erro no bit apresentada na seção 2. O cenário de simulação é composto por 16 nós, sendo 10 nós fontes, 5 nós *relays* e 1 nó destino. Os nós fontes são responsáveis por gerar pacotes de dados e transmiti-los para o nó destino. Os nós *relays* representam nós que não estão gerando dados, e o nó destino somente recebe os pacotes e transmite a mensagem NACK caso necessário. Os nós são dispostos de forma aleatória, sendo reposicionados a cada execução, em uma área quadrada de lado 500 metros a uma profundidade de 70 metros, com exceção do nó destino que é posicionado sempre no centro do quadrado, na coordenada (250,250,70).

O ns-3 implementa um algoritmo baseado em fluxos e subfluxos. Cada fluxo gera um conjunto de subfluxos que não se sobrepõe [L'ecuyer et al. 2002]. Assim para produzir múltiplas execuções independentes, fixamos o fluxo escolhendo uma valor para a semente e mudamos apenas o subfluxo para cada execução. A semente escolhida foi o valor arbitrário 138 e para cada execução  $i$  utiliza-se o subfluxo  $i$ .

<sup>1</sup>ns-3 - <https://www.nsnam.org/>, 2017.

Para cada protocolo foram realizadas 100 execuções, e cada execução simula o funcionamento da rede por 10.000 segundos transmitindo pacotes de dados de 800 bytes, e pacotes de controle de 3 bytes. As configurações do transdutor são baseadas no modem acústico WHOI [Freitag et al. 2005]: taxa de dados de 4.000 bps, frequência central de 4.000 Hz e modulação BPSK, consumo de energia para a transmissão de pacotes de 50 W, consumo de energia para recepção de pacotes de 158 mW e consumo de energia em modo ocioso de 158 mW. Já para a configuração dos protocolos, os *slots* possuem duração de 2 s, sendo 1,5 s para a transmissão de dados e 0,5 s como tempo de guarda para evitar a colisão de pacotes. No protocolo proposto os *slots* de controle duram 0,4 s.

## 4.2. Resultados Numéricos

Os resultados foram avaliados segundo um conjunto de três métricas. A primeira é o *goodput* que corresponde ao total de bytes dos pacotes de dados recebidos pelo nó destino, em relação ao tempo total da simulação. A segunda é a taxa de perda de pacotes e a terceira é a energia total gasta na simulação por pacote entregue.

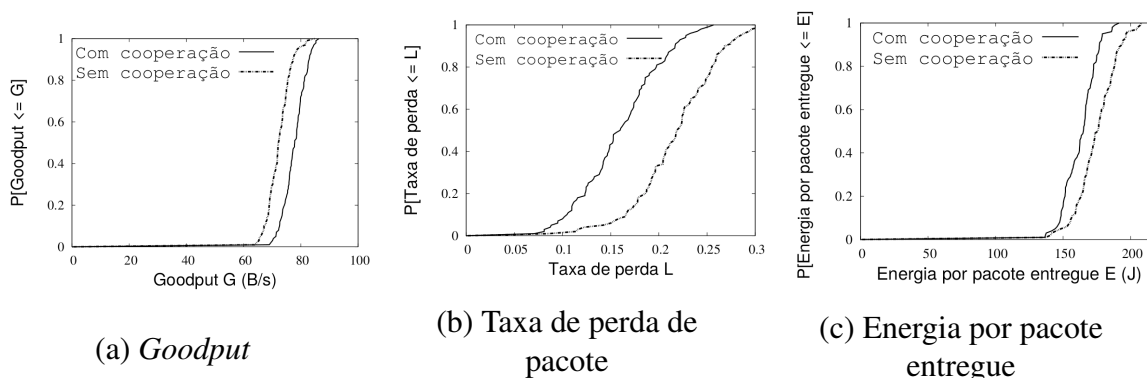


Figura 3. Gráficos das funções de distribuição acumulada dos resultados

A Figura 3-a apresenta o *goodput* que, com cooperação, teve média de 77,816 bps e sem cooperação média de 72,476 bps, um ganho médio de 7,36%. A Figura 3-b mostra a taxa de perda de pacote que, com cooperação, teve média de 16,06% e sem cooperação média de 21,82%, um ganho médio de 26,39%. A Figura 3-c mostra a energia total gasta na simulação por pacote entregue com sucesso, tendo média com cooperação de 163,19918 J e sem cooperação de 175,14045 J, um ganho médio de 6,818%

O esquema de cooperação proposto acrescenta ao protocolo um *overhead* devido a mensagens de cooperação WTC e aos períodos de sinalização. Porém, os resultados demonstram que os ganhos obtidos com a cooperação são significativos, especialmente segundo a métrica de energia, conseguindo reduzir o consumo por pacote entregue.

## 5. Conclusões

Nesse artigo, apresentamos um protocolo MAC cooperativo para redes de sensores aquáticos. Nosso esquema de cooperação se baseia na retransmissão de mensagens que falharam, por nós que estariam ociosos. Os resultados das simulações mostram uma melhoria, principalmente, na taxa de perda de pacotes, que em média, foi reduzida em 26%. A energia gasta por pacote entregue foi reduzida, em média, em 6,81%, indicando que o esquema de cooperação é eficiente em relação ao consumo energético. Trabalhos futuros

devem avaliar a escalabilidade do esquema proposto bem como a cooperação utilizando outros protocolos MAC, além de implementá-los em uma rede real e confrontar os resultados com os alcançados até o momento.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio de CNPq, CAPES e da FAPEMIG.

## Referências

- Brekhovskikh, L. M. (2003). *Fundamentals of ocean acoustics*. Springer Science & Business Media.
- Carbonelli, C. and Mitra, U. (2006). Cooperative multihop communication for underwater acoustic networks. In *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Underwater networks*, pages 97–100. ACM.
- Cheng, X., Cao, R., Qu, F., and Yang, L. (2012). Relay-aided cooperative underwater acoustic communications: Selective relaying. In *IEEE OCEANS*, pages 1–7.
- Dianati, M., Ling, X., Naik, K., and Shen, X. (2006). A node-cooperative arq scheme for wireless ad hoc networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 55(3):1032–1044.
- Domingo, M. C. (2011). A distributed energy-aware routing protocol for underwater wireless sensor networks. *Wireless Personal Communications*, 57(4):607–627.
- Felemban, E., Shaikh, F. K., Qureshi, U. M., Sheikh, A. A., and Qaisar, S. B. (2015). Underwater sensor network applications: A comprehensive survey. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015:5.
- 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, 2005. Proceedings of MTS/IEEE*, pages 1086–1092. IEEE.
- Heidemann, J., Stojanovic, M., and Zorzi, M. (2012). Underwater sensor networks: applications, advances and challenges. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 370(1958):158–175.
- L’ecuyer, P., Simard, R., Chen, E. J., and Kelton, W. D. (2002). An object-oriented random-number package with many long streams and substreams. *Operations research*, 50(6):1073–1075.
- Lee, J. W., Cheon, J. Y., and Cho, H.-S. (2010). A cooperative arq scheme in underwater acoustic sensor networks. In *OCEANS 2010 IEEE-Sydney*, pages 1–5. IEEE.
- Rappaport, T. S. (2002). Wireless communications—principles and practice, (the book end). *Microwave Journal*, 45(12):128–129.
- 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*.
- Wang, H., Wang, S., Zhang, E., and Zou, J. (2016). A network coding based hybrid arq protocol for underwater acoustic sensor networks. *Sensors*, 16(9):1444.
- Wenz, G. M. (1962). Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(12):1936–1956.