

CoROA: Algoritmo para Coleta de Dados em Redes de Sensores Aquáticas Óptico-Acústicas

Eduardo P. M. Câmara 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 sensor networks are used to collect data from underwater environments. Nodes from these networks can communicate using acoustic or optical communication and can explore the best of which one. In this paper we propose CoROA, an algorithm to perform data collection with data aggregation in underwater optical-acoustic sensor networks. It divides the network into clusters, builds a routing tree among the cluster heads and uses data aggregation to deliver the data collected to the sink node. Experiments show that, compared to a shortest path algorithm, CoROA can achieve a lower energy consumption, lower latencies and greater amounts of data collected per hour by the sink node.*

Resumo. *Redes de sensores aquáticas são utilizadas para coleta de dados de ambientes aquáticos. Os nós dessas redes podem se comunicar utilizando comunicação óptica ou acústica e podem explorar o melhor de cada um dos meios de transmissão. Neste trabalho é proposto CoROA, um algoritmo para realizar coletas de dados com agregação em redes de sensores aquáticas óptico-acústicas. CoROA divide a rede em clusters, monta uma árvore de roteamento entre os líderes e utiliza agregação de dados para entregar os dados coletados ao nó coletor. Experimentos mostram que, comparado a um algoritmo de caminho mínimo, CoROA consegue ter um consumo energético menor, obter menores latências e um número maior de dados coletadas por hora pelo nó coletor.*

1. Introdução

As atividades de estudo e monitoramento de condições de ambientes aquáticos são muito relevantes para a humanidade, uma vez que cerca de 70% da superfície do planeta Terra é coberta por água. A coleta de dados destes ambientes é fundamental para a realização de tais atividades e pode ser feita com a ajuda de nós sensores. Esses nós podem ser distribuídos ao longo de determinadas regiões de interesse e se comunicarem para trocar dados, formando assim redes de sensores aquáticas.

Geralmente utilizada em redes de sensores terrestres sem fio, a comunicação por ondas de rádio não é encontrada nas redes de sensores aquáticas. Isto porque a água absorve grande parte das ondas eletromagnéticas, fazendo com que o alcance do sinal seja reduzido a pouco centímetros do dispositivo transmissor. Com isso, os nós das redes de sensores aquáticas sem fio utilizam como alternativa a comunicação acústica ou a comunicação óptica para trocarem dados.

Esses dois tipos de comunicação possuem algumas diferenças fundamentais. A primeira delas está na propagação dos sinais utilizados nelas. Enquanto sinais sonoros são omnidirecionais e se propagam na água a uma velocidade de 1500 m/s, os sinais ópticos possuem uma velocidade de propagação de 2.55×10^8 m/s e precisam ser direcionados. Outra diferença está no compromisso entre alcance e taxas de transmissões. Modems acústicos conseguem transmitir dados a baixas taxas de transferências por diversos quilômetros, enquanto os ópticos transmitem altas quantidades de dados por segundo por apenas alguns metros. A eficiência energética é ainda outro ponto de diferença entre esses dois tipos de transmissão. Como mostrando por Farr *et al.* [Farr et al. 2006], modems ópticos são significativamente mais energeticamente eficiente que os acústicos, conseguindo transmitir cerca de mil vezes mais bits por joule do que eles.

Redes de sensores cujos nós conseguem realizar ambos os tipos de comunicação recebem o nome de redes de sensores óptico-acústicas. Sendo a coleta de dados essencial para redes de sensores, nas redes óptico-acústicas ela pode ser beneficiada pelo baixo consumo de energia e alta taxa de transferência das transmissões ópticas, e pelo longo alcance das transmissões acústicas.

Com essa ideia em mente, neste trabalho é desenvolvido um algoritmo de coleta de dados para redes de sensores óptico-acústicas. Ele divide a rede em *clusters* e constrói uma árvore de roteamento para que os dados coletados possam ser entregues ao nó coletor. Além disso, os dados coletados pelos membros são agregados pelos líderes a fim de se reduzir o tráfego de mensagens na rede. Enquanto os nós membros dos *clusters* utilizam comunicação óptica, os líderes utilizam comunicação acústica.

As principais contribuições desse artigo são: CoROA, um algoritmo para realizar coletas de dados em redes óptico-acústica; suas técnicas que, em três fases, fazem a formação de *clusters*, a formação de rotas, e transmissões dos dados coletados; sua avaliação experimental; e os resultados que ressaltam os benefícios quando comparados com o estado da arte. Eles mostram que CoROA consegue consumir menos energia dos nós e ainda obter baixa latência e um maior número de dados coletados pelo nó coletor, quando aplicado em redes que possuem agrupamentos de nós.

O restante do artigo está organizado como a seguir. A seção 2 apresenta alguns trabalhos relacionados. O algoritmo proposto é descrito e ilustrado na seção 3. Os resultados das simulações são apresentados e analisados na seção 4, seguidos pelas conclusões na seção 5.

2. Trabalhos Relacionados

Como ressaltado por Vieira *et al.* [Vieira et al. 2010], a utilização de redes de sensores aquáticas pode beneficiar diversas áreas. Exemplos de aplicações dessas redes incluem monitoramento de qualidade da água e poluição [Shakir et al. 2012], manutenção de hidroelétricas [Vieira et al. 2012], monitoramento de lagos [Vieira et al. 2018] e de exploração de petróleo [Kong et al. 2005].

Alguns trabalhos recentes têm proposto a utilização de redes óptico-acústicas para algumas aplicações. Farr *et al.* desenvolveu um sistema de comunicação óptico-acústico que oferece altas taxas de transferência de dados e baixa latência dentro do alcance do modem óptico e robustez e longo alcance quando fora dele [Farr et al. 2010]. Dentre as

aplicações possíveis para esse sistema, os autores citam a operação de veículos submarino operados remotamente (ROV, do inglês *Remotely Operated Vehicle*) sem a necessidade de conexões físicas a eles. Outro exemplo pode ser visto no trabalho de Wang *et al.* [Wang et al. 2017], onde os autores desenvolvem uma rede óptico-acústica com o foco na transmissão sem fio e em tempo real de imagens e vídeos de explorações marinhas. Nesta rede, os transmissores ópticos são utilizados para transmissões rápidas de dados e os transmissores acústicos são utilizados para comandos de controle e localização de nós. Han *et al.* apresentam uma solução híbrida onde a comunicação acústica é utilizada para alinhar os transmissores e receptores ópticos para permitir um aumento na quantidade de dados transmitidos [Han et al. 2014]. Já Moriconi *et al.* utilizam comunicações híbridas em enxames de AUV (do inglês *Autonomous Underwater Vehicle*) [Moriconi et al. 2015].

Ao buscar por algoritmos de roteamento para redes óptico-acústicas, percebe-se a existência de poucos. Pompili e Akyildiz [Pompili and Akyildiz 2009] fazem uma exposição sobre alguns algoritmos de roteamento desenvolvidos que levam em consideração as limitações encontradas em ambientes aquáticos, mas nenhum deles é focado em redes óptico-acústicas. MURAO [Hu and Fei 2012] é um algoritmo de roteamento baseado em *clusters* que realiza coleta de dados em redes de sensores óptico-acústicas. Diferentemente do CoROA, ele considera que somente os nós líderes possam se comunicar utilizando os dois tipos de transmissão, ficando os membros restritos à comunicação óptica. Outra diferença é que nele os nós membros de um agrupamento são aqueles que estão dentro do alcance acústico do nó líder dele, exigindo que os nós da rede sejam espalhados de maneira a garantir a existência de *gateways* (nós que estão na interseção de dois agrupamentos) para que os dados possam chegar ao nó coletor. Esse requerimento não existe aqui, podendo cada nó identificar se deve ser um membro, e utilizar a comunicação óptica, ou um líder, e utilizar a comunicação acústica.

Outro algoritmo de roteamento para redes óptico-acústicas é apresentado por Wang *et al.* [Wang et al. 2017] no mesmo trabalho onde tem-se a proposta da rede para transmissão de imagens e vídeo em tempo real. Por ter foco na transmissão de imagens e vídeos, ele não utiliza agregação de dados como o CoROA.

Ao contrário dos demais algoritmos de roteamento para coleta de dados dos trabalhos relacionados, CoROA é o único que utiliza agregação de dados junto com a coleta em redes de sensores óptico-acústicas.

3. O Algoritmo

O algoritmo proposto, CoROA, possui o objetivo de realizar a coleta de dados em redes de sensores aquáticas óptico-acústicas, buscando conciliar o grande alcance das comunicações acústicas com o baixo consumo e alta vazão de dados da comunicação óptica. Ele pode ser dividido em três fases. Na primeira fase tem-se a formação de *clusters* na rede, classificando os nós como membros ou líderes. Na segunda fase, rotas são estabelecidas entre os nós líderes e o nó coletor. Na última fase é onde ocorrem as transmissões de dados coletados e as manutenções de rotas. A seguir tem-se uma descrição detalhada sobre cada uma dessas fases.

3.1. Fase de Formação de *Clusters*

CoROA é baseado em clusterização pois dividir uma rede de sensores em *clusters* propicia vantagens como escalabilidade de controle de acesso ao meio e de roteamento

[Mhatre and Rosenberg 2004]. Assim, em sua primeira fase tem-se uma divisão da rede, onde os nós são classificados como líderes ou membros.

Os nós devem utilizar somente transmissões acústicas ao longo dessa fase para que possam se comunicar com o maior número de nós possíveis. O Algoritmo 1 descreve como o processo de formação é realizado em um nó.

Algorithm 1 Formação de *Cluster*

- 1: **transmite** mensagem de descobrimento de vizinhança
 - 2: **recebe** mensagens vindas de nós vizinhos
 - 3: **cria** lista de vizinhos ópticos
 - 4: **calcula** sua pontuação
 - 5: **anuncia** sua pontuação para os nós vizinhos
 - 6: **recebe** pontuação dos vizinhos ópticos
 - 7: **se** sua pontuação é a maior da vizinhança
 - 8: **é** líder
 - 9: **senão**
 - 10: **é** membro
 - 11: **define** vizinho com maior pontuação como seu próximo *hop*
 - 12: **informa** vizinhos se é líder ou membro
-

Inicialmente o nó deve transmitir uma mensagem de descobrimento de vizinhança para anunciar sua presença aos seus vizinhos. Essa mensagem deve conter principalmente o identificador do nó (ID) e sua posição. Ainda que GPS (do inglês *Global Positioning Systems*) não funcione bem em ambientes aquáticos [Akyildiz et al. 2005], é possível utilizar serviços de localização como o DNR [Erol et al. 2007], LPS [Vieira et al. 2009] ou outros [Othman et al. 2006, Zhou et al. 2007, Erol et al. 2008] para determinar a posição dos nós da rede. Aqui considera-se que a posição de um nó ao longo do tempo não deve variar muito da sua posição obtida com o serviço de localização.

Quando um nó recebe uma mensagem de descobrimento, ele registra a existência de um vizinho acústico. Em seguida, ele utiliza a informação recebida sobre a posição do nó para calcular a distância entre eles. Se essa distância for menor do que o alcance de seu modem óptico, então ele armazena os dados sobre o nó em uma lista de vizinhos ópticos. Vale a pena notar que todos os vizinhos ópticos também são considerados como vizinhos acústicos.

Tendo as mensagens de descobrimento de vizinhança de seus nós vizinhos, o nó utilizará as informações obtidas para calcular sua pontuação. Essa pontuação é utilizada para determinar quais nós serão líderes e quais serão membros. Um nó será líder se sua pontuação for a maior dentre seus vizinhos ópticos e membro caso contrário. Em caso de empate no valor da pontuação, o nó com menor ID ganha. A pontuação P de um nó é calculada da seguinte forma:

$$P = \begin{cases} \infty, & \text{se o nó é o coletor} \\ 0, & \text{se } VO = VA \\ \frac{|VO|}{|VA|} + \text{PERCENTUAL_ENERGIA} & \end{cases}$$

onde VO é o conjunto de vizinhos ópticos, VA é o conjunto de vizinhos acústicos e

PERCENTUAL_ENERGIA é o percentual de energia restante do nó. Um nó coletor recebe pontuação infinita afim de garantir que ele seja um dos líderes da rede. Já nós que conhecem somente seus vizinhos ópticos ($VO = VA$) recebem a menor pontuação possível ($P = 0$), pois não conseguirão enviar dados para nenhum nó de outros *clusters* caso se tornem líderes. A pontuação dos demais nós é calculada com base na porcentagem de vizinhos que estão dentro do alcance de seus transmissores ópticos e na porcentagem de energia residual deles. Por isso, os líderes tenderão a ser aqueles com maiores quantidade de vizinhos ópticos no início de operação da rede, quando todos os nós possuem praticamente a mesma quantidade de energia residual. A medida que o tempo passar, o fator energético será mais decisivo e nós com grandes quantidades de energia disponíveis devem se tornar os novos líderes quando trocas de liderança forem realizadas.

Depois de calcular sua pontuação, um nó informa seus vizinhos sobre ela e aguarda o recebimento das pontuações de seus vizinhos ópticos. Após recebê-las, ele decide se se torna um líder ou um membro e então anuncia sua decisão para seus vizinhos. Caso se torne um membro, então ele também registra seu vizinho com a maior pontuação como sendo o próximo *hop* para dados. Assim, todas as mensagens de dados geradas ou recebidas por esse nó serão enviadas para ele. Nós que recebem a mensagem de um nó líder devem guardar esta informação para possível uso posterior.

A figura 1 mostra um exemplo de formação de *clusters*. Na figura 1(a) temos a indicação dos alcances dos dois tipos de transmissores, óptico e acústico. Já na figura 1(b) tem-se o estado onde os nós receberam informações de seus vizinhos e sabem quais destes estão dentro do alcance óptico. A figura 1(c) mostra quais nós se tornariam líderes e quais virariam membros.

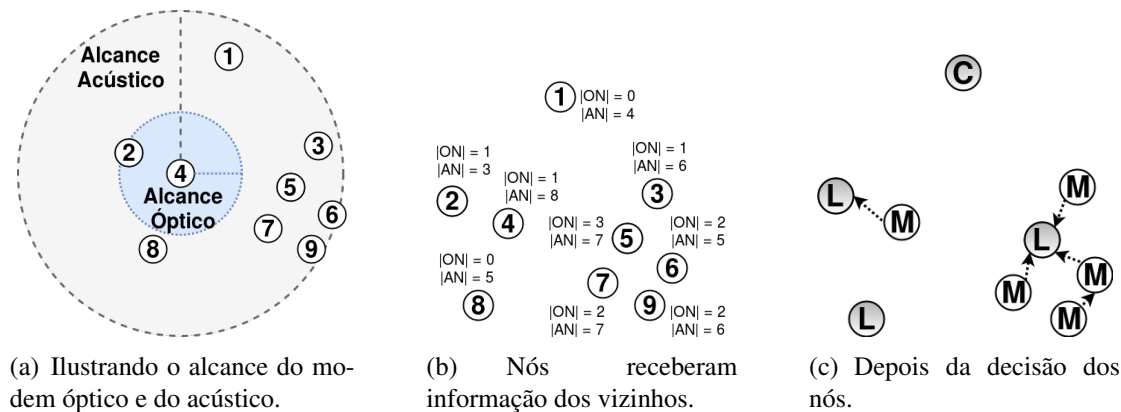


Figura 1. Processo da fase de formação de *clusters* exemplificado.

3.2. Fase de formação de rotas

Terminado o processo de formação dos *clusters*, inicia-se a fase de formação de rotas. Nela, assim como na primeira fase, os nós devem se comunicar somente de forma acústica. Como cada nó membros da rede já definiu o destino de seus dados na fase anterior, é necessário apenas definir o próximo *hop* dos líderes da rede. Para fazer isto, cria-se uma árvore de roteamento cuja raiz é o nó coletor.

A criação da árvore de roteamento começa quando o nó coletor transmite uma mensagem informando aos seus vizinhos que ele é a raiz. Os nós líderes que receberem

essa mensagem tomam conhecimento de que estão a um *hop* de distância do nó coletor e que podem enviar mensagens diretamente para ele. Agora fazendo parte da árvore, eles informam seus vizinhos sobre a existência de uma rota até a raiz e o número de *hops* que ela contém. Assim, novos nós podem se juntar à árvore e continuar o processo de construção até que todos os líderes façam parte dela. Seguindo o exemplo mostrado na figura 1, a figura 2 mostra a árvore de roteamento formada após os nós concluírem a fase de formação de rotas.

Vale notar que, se não tratados, erros em transmissões podem fazer com que nós não tenham conhecimento da existência de algumas rotas. Isso pode induzi-los a não fazer parte da melhor rota possível para eles ou que até mesmo fiquem de fora da árvore. Por isso, é necessário que um nó saiba se todos os seus vizinhos que ainda não fazem parte da árvore conseguiram receber a mensagem de construção de rota transmitida. Caso algum vizinho tenha falhado em recebê-la, o nó deve retransmiti-la. Assim, caso um nó receba uma mensagem lhe informando de uma opção de um próximo *hop* com menor distância (em hops) até o coletor, ele deve utilizá-la para atualizar suas informações e depois informar aos seus vizinhos sobre essa atualização.

Também pode acontecer que algum nó líder não consiga contato com outro líder que faça parte da árvore de roteamento e assim necessite de outra forma para entrar nela. Como nós líderes geralmente vão conhecer algum nó fora do *cluster* (nós que conhecem somente seus vizinhos ópticos são penalizados com pontuação nula), então ele deve conhecer pelo menos um membro de outro *cluster*. Assim, uma forma de entrar na árvore seria utilizar esse nó membro como próximo *hop*. Para que isto seja possível, nós membros também devem transmitir mensagens de construção de rota. Com isso, quando esse líder recebe uma mensagem lhe informando de uma possível rota através de um nó membro, ele salva aquele nó como próximo *hop* e continua a propagação da mensagem de criação de rota normalmente.

3.3. Fase de Envio de Dados e Manutenção de Rotas

Quando um nó encontra seu lugar na árvore de roteamento, ele pode avançar para a fase onde enviará dados coletados para o nó coletor. Além de enviar os próprios dados coletados, alguns nós também devem repassar dados coletados por outros. Como tem-se a utilização de uma árvore de roteamento, cada nó deverá ser responsável por repassar as mensagens com dados dos nós contidos na subárvore onde ele é a raiz. Além disso, nós líderes devem agregar os dados coletados pelo seu *cluster* para depois repassá-los. Dando continuidade ao exemplo, tem-se que o nó 5 está nas rotas que levam as mensagens dos nós 3, 6, 7 e 9 até o nó coletor, vide figura 3, e deverá agregar os dados coletados por eles.

Cada nó enviará mensagens de dados coletados para o seu próximo *hop*, com exceção do nó coletor que as coletará. Além disso, o tipo de comunicação utilizado nesses envios dependerá do nó que estiver com a mensagem. Se ele for um líder, então deve utilizar o transmissor acústico. Caso seja um membro, então ele deve utilizar o modem óptico para transmitir a mensagem até o seu próximo *hop*. Aqui supõe-se a utilização de receptores ópticos omnidirecionais e transmissores ópticos que podem ser direcionados livremente para qualquer direção ou que também sejam omnidirecionais. Como mostrado em [Farr et al. 2005], transmissores e receptores ópticos omnidirecionais podem ser obtidos com a utilização de múltiplos LEDs.

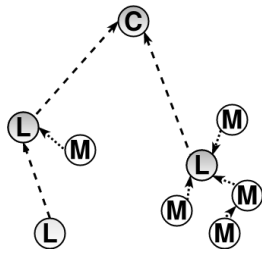


Figura 2. Árvore de roteamento formada na fase de formação de rotas.

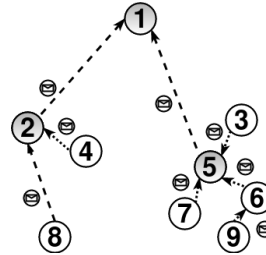


Figura 3. Nós devem enviar mensagens para o próximo hop.

Assumindo que a coleta de dados é feita periodicamente por todos os nós, é possível adotar uma estratégia para agregar os dados obtidos. A agregação de dados é utilizada em conjunto com outros protocolos de redes de sensores aquáticas para que melhores resultados possam ser obtidos [Goyal et al. 2017]. Para realizá-la aqui, os nós líderes devem receber os dados vindos dos nós membros e agregá-los para então enviá-los para o próximo *hop*. Assim, eles podem diminuir o número de transmissões acústicas realizadas por eles a cada rodada de coleta de n para m , sendo $m < n$. Isso diminui o consumo energético deles e pode resultar em um aumento do tempo de vida da rede.

Como nós líderes utilizam comunicação acústica, o gasto energético deles será maior do que o gasto dos nós membros. Logo, faz-se necessário o uso de um esquema de revezamento de líderes para que a rede possa permanecer ativa por mais tempo. O esquema de revezamento utilizado funciona da seguinte forma: quando a energia de um líder atinge um determinado valor, ele realiza uma pesquisa local sobre a pontuação de seus vizinhos e verifica se existem nós com a pontuação maior que a dele. Em caso negativo, ele continua como líder. Caso contrário, ele opta pelo nó com a maior pontuação para substituí-lo e então anuncia a troca de liderança. Para um maior revezamento, pode-se definir vários níveis de energia onde a troca de líder deverá ocorrer. Vale notar que, por motivos óbvios, nós líderes sem vizinhos ópticos não realizam esse esquema.

Outra situação encontrada durante o período de atividade de uma rede é a morte de alguns nós. Um nó é considerado morto quando sua energia não é o suficiente para mantê-lo ativo. Sua morte faz com que ele fique indisponível na rede e leva os nós da sua subárvore de roteamento a perderem contato com o nó coletor. Para resolver o problema da perda de contato, é necessário encontrar um substituto para o nó morto. Esta tarefa deve ser realizada pelos nós que ficaram sem um próximo *hop*. Eles devem requisitar informações sobre a existência de rotas alternativas aos seus vizinhos e, se possível, fazer parte de alguma delas (de preferência aquela com a menor quantidade de *hops* até o nó coletor). Caso não existam rotas alternativas disponíveis, deve-se tentar criar uma nova fazendo com que alguns nós membros se tornem líderes para poderem alcançar outros nós da rede.

4. Avaliação

O funcionamento do CoROA foi avaliado através de simulações onde ele foi comparado com um algoritmo de caminho mínimo. Chamado a partir daqui de SPA, o algoritmo de caminho mínimo implementado leva um nó a escolher o seu vizinho que faz parte

do menor caminho até o nó coletor como o destino de suas mensagens. Além disso, a comunicação entre dois nós deverá ser óptica se a distância entre eles for menor que alcance do transmissor óptico e acústica caso contrário. A implementação de ambos os algoritmos deu-se um simulador desenvolvido especialmente para os testes. A seguir tem-se uma descrição das configurações deste simulador e dos cenários simulados. Em seguida, são apresentados os resultados obtidos.

4.1. Configurações e Cenários

No simulador implementado, nós são simulados como se rodassem uma pilha de aplicações. No camada mais alta tem-se uma aplicação que gera mensagens de dados periodicamente. Abaixo dela, tem-se uma camada de roteamento que utiliza o CoROA ou o SPA para entregar as mensagens geradas ao nó coletor. Na camada seguinte assume-se a utilização de um sistema TDMA, onde cada nó transmite somente durante seu intervalo de tempo definido. Assim, evita-se colisões entre mensagens transmitidas. A camada mais baixa é aquela onde o nó acessa o canal acústico ou óptico para transmitir dados.

As transmissões acústicas são simuladas considerando o modelo de canal acústico descrito por Stojanovic [Stojanovic 2007], assim como em [Coutinho et al. 2014, Júnior et al. 2017]. Ele é caracterizado principalmente por uma atenuação do sinal $A(d, f)$ e por ruídos $N(f)$ presentes no meio, que dependem da distância d percorrida pelo sinal e de sua frequência f . Considerou-se um espalhamento esférico do sinal ($k = 2$), nenhuma atividade de embarcações ($s = 0$) e que a velocidade do vento era $w = 0$ m/s. A relação sinal ruído (SNR) do canal segue a equação 1, onde P é a potência do sinal e Δf é a largura de banda de ruído do dispositivo receptor.

$$\text{SNR}_A = \frac{P/A(d, f)}{N(f)\Delta f} \quad (1)$$

Já as transmissões ópticas simuladas seguiram o modelo de canal óptico descrito por Anguita *et al.* [Anguita et al. 2011], assim como em [Han et al. 2014, Campagnaro et al. 2015]. O modelo considera principalmente a turbidez da água e os parâmetros dos receptores. Para as simulações, considera-se a utilização de ondas ópticas de comprimento $\lambda = 514$ nm em um oceano com água pura (coeficiente de atenuação total $c = 0.043$ m⁻¹). O SNR pode ser calculado segundo a equação 2, sendo q a carga elétrica (1.6×10^{-19} C), K a constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K), T a temperatura em K, Bw a largura de banda, S a sensibilidade do receptor (A/W), P_r a potência da luz recebida (dBm), I_d a corrente escura, I_l a fotocorrente e R a resistência *shunt* do fotodiodo (Ω).

$$\text{SNR}_O = \frac{(SP_r)^2}{2q(I_d + I_l)Bw + \frac{4KT Bw}{R}} \quad (2)$$

Sucessos e falhas nas transmissões são calculadas considerando as propriedades de cada um dos canais e dos transmissores e receptores dos nós. Utiliza-se a modulação BSPK (*Binary Shift Phase Keying*), onde cada símbolo carrega um bit, para ambos os casos. Assim, tem-se que as taxas de erros em bits (BER) e em pacotes (PER) são dadas respectivamente pelas equações 3 e 4, onde erfc é a função de erro complementar e m é o tamanho da pacote em bits.

$$\text{BER} = \frac{1}{2}(\text{erfc}(\sqrt{\text{SNR}})) \quad (3)$$

$$\text{PER} = 1 - (1 - \text{BER})^m \quad (4)$$

Simula-se o comportamento do modem acústico Evologics S2CR 18/34 [EvoLogics 2014] para as comunicações acústicas. Assim, o modem acústico dos nós trabalha em frequências de 26 kHz e possui taxa de transmissão máxima igual a 10 kbps (o máximo do modem é 13.9 kbps). Utilizando um alcance de 1000 m, ele possui consumo de transmissão igual a 2.8 W e de recebimento igual a 1.3 W.

Para as comunicações ópticas, simula-se a utilização de um fotodiodo de alta velocidade Si PIN Hamamatsu S5971 como receptor, assim como em [Campagnaro et al. 2015]. Assim, tem-se uma área de transmissão $A_r = 1.1 \text{ mm}^2$, sensibilidade $S = 0.26 \text{ A/W}$, corrente escura máxima $I_d = 1 \text{ nA}$, resistência *shunt* $R = 1.43 \times 10^9 \Omega$ e uma largura de banda igual a 100 kHz. Já para o transmissor óptico tem-se um ângulo de divergência do feixe igual a 0.5 rad, tamanho do transmissor igual a $A_t = 10 \text{ mm}^2$ e taxa de transmissão igual a 1 Mbps. Baseado no modem óptico BlueComm 200 [Sonardyne 2016], o alcance de transmissão utilizado é de 50 m (alcance máximo do BlueComm 200 é de 150 m) e os consumos de recebimento e transmissão são iguais a 10 e 15 W respectivamente. Ainda, assume-se que um nó pode receber dados vindos de qualquer direção e enviar mensagens para qualquer nó vizinho com o transmissor e o receptor estando perfeitamente alinhados.

O esquema de agregação utilizado é o mesmo apresentado por Manjula e Manvi [Manjula and Manvi 2012]. Nele, a mensagem agregada é gerada através da média dos dados recebidos. Dessa forma, um líder é capaz de reduzir sua quantidade de transmissões de dados de n para apenas uma a cada rodada de coleta da rede, sendo n o número de nós membros de seu *cluster*. Como nós membros de um *cluster* estão a pequenas distâncias uns dos outros (utilizam comunicação óptica que possui alcance reduzido), os dados coletados por eles tenderão a ser parecidos e por isso a média pode ser uma boa representação.

O consumo de energia foi simulado considerando apenas as transmissões e os recebimentos de dados. Nós transmissores consomem energia para transmitir mensagens, enquanto os nós receptores consomem energia para recebê-las. Cada nó possui uma energia inicial de 1000 J, com exceção do nó coletor, que possui energia ilimitada. A razão para o nó coletor não possuir limite de energia reside no fato de que é considerado que ele está na superfície e assim pode ser recarregado sempre que for necessário.

Os nós das redes simuladas são distribuídos ao longo de uma região de $1500 \text{ m} \times 1500 \text{ m} \times 1500 \text{ m}$. Sempre existe um nó coletor e mais 50, 100, 150 ou 200 nós sensores na rede. O tempo total de simulação é de 24 horas, sendo que os nós sensores começam a coletar dados a partir da primeira hora de atividade da rede. As coletas de dados são realizadas de 15 em 15 minutos e resultam em mensagens com tamanho fixo de 200 bytes. Essas mensagens necessitam de uma confirmação de recebimento que é feita através do envio de uma mensagem ACK pelo nó receptor. Mensagens ACK possuem tamanho de 10 bytes e são enviadas utilizando o mesmo tipo de comunicação utilizado no envio da mensagem cujo recebimento precisa ser confirmado. Os intervalos de tempo do TDMA possuem tamanho igual a 0.5 segundo e são distribuídos seguindo a ordem de ID dos nós.

Todos os resultados mostrados a seguir são valores médios dos resultados de 100 execuções. As figuras 5 a 7 possuem intervalo de confiança igual a 95%.

4.2. Resultados

A distribuição dos nós na região de interesse pode ser feita de diferentes formas. Uma delas consiste em distribuí-los aleatoriamente e outra em distribuí-los de maneira a formar agrupamentos na rede. Para verificar o consumo energético nos nós com a utilização do CoROA e do SPA, testou-se esses dois cenários de distribuição dos nós. Para simular a distribuição de agrupamentos, primeiro definiu-se aleatoriamente os centros de cada agrupamento e depois distribuiu-se os nós, também de forma aleatória, igualmente dentro de esferas centradas nos agrupamentos e de raios iguais a duas vezes o alcance do transmissor óptico.

Os gráficos da figura 4 mostram a comparação dos dados de consumo energético obtidos na utilização dos dois algoritmos para os dois cenários de distribuição com 100 nós. Como pode ser visto, CoROA conseguiu consumir menores quantidades de energia dos nós que o SPA quando os nós foram distribuídos em grupos. Isto deve-se principalmente à maior probabilidade de existirem nós membros neste tipo de rede, o que possibilita uma maior utilização de comunicação óptica e uma redução no número de mensagens enviadas devido ao método de agregação de dados. O melhor caso de consumo da rede ocorreu quando ela continha agrupamentos de 10 nós e CoROA foi utilizado. Nele, cerca de 95% dos nós consumiram menos do que 10% da energia inicial e o consumo máximo foi perto de 45%.

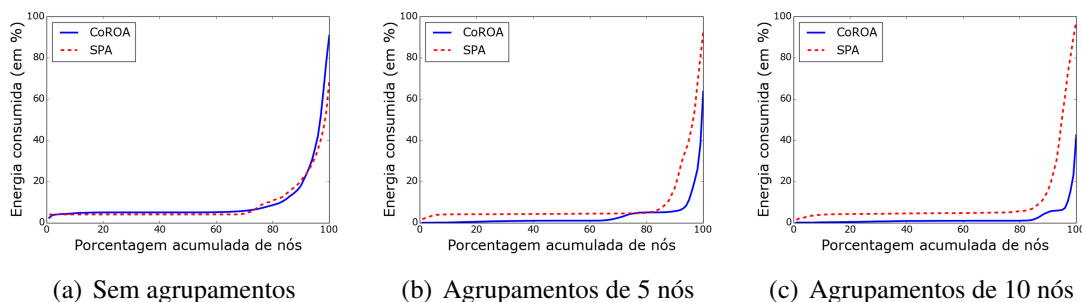


Figura 4. Porcentagem acumulada de nós que gastaram até uma determinada porcentagem de sua energia durante o período de atividade da rede.

Utilizando a distribuição de nós com agrupamentos de 10, verificou-se a latência média da rede. O gráfico da figura 5 mostra uma comparação de quanto tempo, em média, foi necessário para que os dados coletados chegassem ao nó coletor com a utilização dos dois algoritmos. A latência média observada foi menor com o uso do CoROA do que com o uso do SPA para as quantidades de 100, 150 e 200 nós. Já para 50 nós os valores foram bem próximos. O aumento no número de nós na rede leva à um consequente aumento da latência com a utilização de ambos os algoritmos, mas ele é menor com CoROA. Isto porque um aumento no número de coletas realizadas pelos membros não impacta muito na quantidade de mensagens enviadas pelos líderes, que tendem a ser os gargalos da rede, uma vez que a agregação de dados é utilizada.

Na figura 6 pode-se observar o número de dados coletados por hora pelo nó coletor para as quatro quantidades de nós. Considera-se que um dado foi coletado se sua mensagem foi entregue ao nó coletor. Como CoROA utiliza agregação de dados, uma mensagem que contém dados agregados de n fontes corresponderá à entrega de n dados.

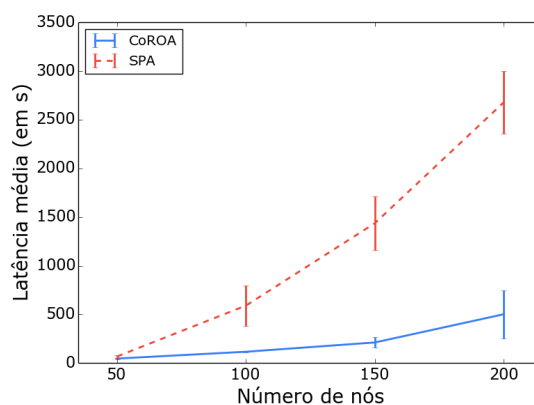


Figura 5. Comparação da latência média observada.

É possível observar que, com exceção das redes com 50 nós, o número de dados coletados com a utilização do CoROA foi próximo do ideal. Além disso, ele foi capaz de entregar mais dados que o SPA em redes com 150 ou 200 nós. Esse melhor desempenho provavelmente ocorreu devido ao menor fluxo de mensagens que é alcançado quando CoROA é utilizado.

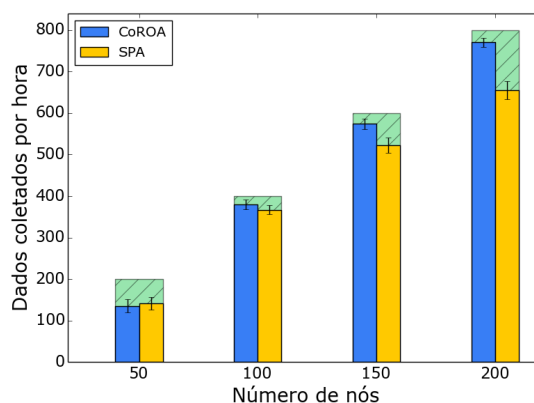


Figura 6. Comparação da quantidade média de dados coletados pelo nó coletor por hora. Barras hachuradas representam a quantidade ideal.

Os gráficos da figura 7 mostram comparações do número de transmissões ópticas e acústicas quando os dois algoritmos são utilizados. Como é possível observar, o uso do SPA leva a uma maior média na quantidade de ambos os tipos de transmissões. Isto é ruim para as redes, visto que o número de dados coletados por hora com CoROA chegou a ser próximo ou maior do que com a utilização do SPA. Outro ponto a ser observado são os grandes intervalos de confiança dos valores para o algoritmo SPA. Eles indicam que o número de envios de mensagens varia muito quando ele é utilizado, o que não acontece com a utilização do CoROA. Também tem-se que as transmissões acústicas foram geralmente predominantes nas redes. Porém, em média, a porcentagem de transmissões ópticas é maior com a utilização do CoROA. Assim como era esperado, o número de transmissões acústicas é menor com CoROA devido à utilização da agregação de dados.

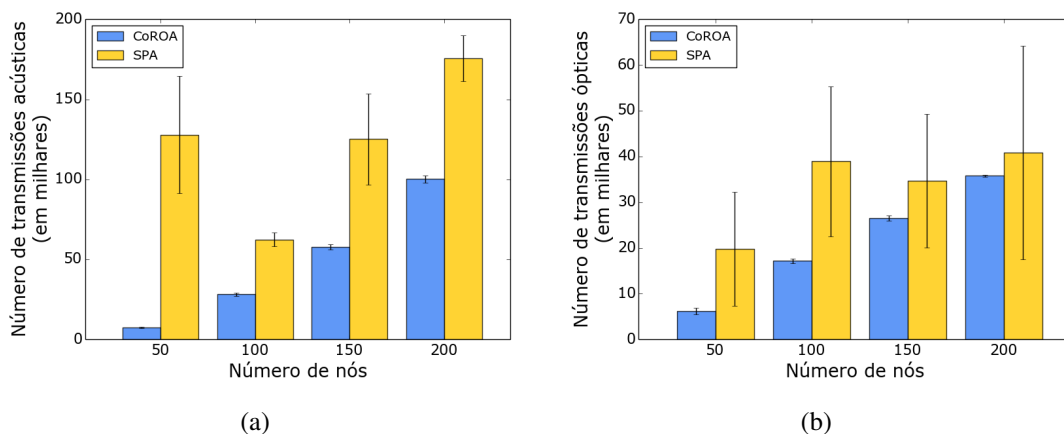


Figura 7. Comparação do número de transmissões acústicas e ópticas realizadas pelos nós da rede.

5. Conclusões

Este trabalho apresenta um algoritmo de coleta de dados para redes de sensores óptico-acústicas chamado CoROA. Ele divide a rede em *clusters* e então monta uma árvore de roteamento a partir do nó coletor. Nós são divididos em líderes e membros dos *clusters* com base na quantidade de vizinhos ópticos e de energia residual deles. Enquanto nós membros utilizam comunicação óptica para transmitir dados com menor consumo energético, nós líderes utilizam a comunicação acústica para alcançarem nós distantes. Nós líderes são responsáveis por reunir os dados coletados pelo seu *cluster*, realizar a agregação deles e então repassa-los para seu próximo *hop*.

CoROA é testado e avaliado através de simulações que o comparam com um algoritmo de caminho mínimo, chamado aqui de SPA. Resultados mostram que CoROA consegue consumir menores quantidades de energia dos nós, o que é muito importante para redes aquáticas onde a vida dos nós é restrita à quantidade inicial de energia deles. Além disso, a latência média registrada com a utilização do CoROA foi, em geral, menor do que com o SPA, sendo que a diferença entre os valores cresce com o número de nós. Também foi possível observar que CoROA conseguiu atingir taxas de coletas de dados por hora próximas das ideais, utilizando, em média, menores quantidades de transmissões ópticas e acústicas que o SPA.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq, à CAPES e FAPEMIG pelo suporte financeiro fornecido.

Referências

- Akyildiz, I. F., Pompili, D., and Melodia, T. (2005). Underwater acoustic sensor networks: research challenges. *Ad Hoc Networks*, 3(3):257 – 279.
- Anguita, D., Brizzolara, D., Parodi, G., and Hu, Q. (2011). Optical wireless underwater communication for AUV: Preliminary simulation and experimental results. In *OCEANS, 2011 IEEE-Spain*, pages 1–5. IEEE.

- Campagnaro, F., Favaro, F., Guerra, F., Calzado, V. S., Zorzi, M., and Casari, P. (2015). Simulation of multimodal optical and acoustic communications in underwater networks. In *OCEANS 2015-Genova*, pages 1–7. IEEE.
- Coutinho, R. W., Boukerche, A., Vieira, L. F., and Loureiro, A. A. (2014). GEDAR: geographic and opportunistic routing protocol with depth adjustment for mobile underwater sensor networks. In *Communications (ICC), 2014 IEEE International Conference on*, pages 251–256. IEEE.
- 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. (2007). 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.
- EvoLogics (2014). Evologics S2CR 18/34 product information. Accessed: Nov. 2017 [Online]. Available: http://www.evologics.de/files/DataSheets/EvoLogics_S2CR_1834_Product_Information.pdf.
- Farr, N., Bowen, A., Ware, J., Pontbriand, C., and Tivey, M. (2010). An integrated, underwater optical/acoustic communications system. In *OCEANS 2010 IEEE-Sydney*, pages 1–6. IEEE.
- Farr, N., Chave, A., Freitag, L., Preisig, J., White, S., Yoerger, D., and Sonnichsen, F. (2006). Optical modem technology for seafloor observatories. In *OCEANS 2006*, pages 1–6. IEEE.
- Farr, N., Chave, A., Freitag, L., Preisig, J., White, S., Yoerger, D., and Titterton, P. (2005). Optical modem technology for seafloor observatories. In *OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE*, pages 928–934. IEEE.
- Goyal, N., Dave, M., and Verma, A. K. (2017). Data aggregation in underwater wireless sensor network: Recent approaches and issues. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*.
- Han, S., Noh, Y., Liang, R., Chen, R., Cheng, Y.-J., and Gerla, M. (2014). Evaluation of underwater optical-acoustic hybrid network. *China Communications*, 11(5):49–59.
- Hu, T. and Fei, Y. (2012). MURAO: A multi-level routing protocol for acoustic-optical hybrid underwater wireless sensor networks. In *Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), 2012 9th Annual IEEE Communications Society Conference on*, pages 218–226. IEEE.
- Júnior, E. P., Vieira, L. F., and Vieira, M. A. (2017). Escalonamento de nós em redes aquáticas estratificadas utilizando voronoi. *XXXV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, Belém, PA, Brasil*.
- Kong, J., Cui, J.-h., Wu, D., and Gerla, M. (2005). Building underwater ad-hoc networks and sensor networks for large scale real-time aquatic applications. In *Military Communications Conference, 2005. MILCOM 2005. IEEE*, pages 1535–1541. IEEE.

- Manjula, R. and Manvi, S. S. (2012). Cluster based data aggregation in underwater acoustic sensor networks. In *India Conference (INDICON), 2012 Annual IEEE*, pages 104–109. IEEE.
- Mhatre, V. and Rosenberg, C. (2004). Homogeneous vs heterogeneous clustered sensor networks: a comparative study. In *Communications, 2004 IEEE International Conference on*, volume 6, pages 3646–3651. IEEE.
- Moriconi, C., Cupertino, G., Betti, S., and Tabacchiera, M. (2015). Hybrid acoustic/optic communications in underwater swarms. In *OCEANS 2015-Genova*, pages 1–9. IEEE.
- Othman, A.-K., Adams, A., and Tsimenidis, C. C. (2006). Node discovery protocol and localization for distributed underwater acoustic networks. In *Telecommunications, 2006. AICT-ICIW'06. International Conference on Internet and Web Applications and Services/Advanced International Conference on*, pages 93–93. IEEE.
- Pompili, D. and Akyildiz, I. F. (2009). Overview of networking protocols for underwater wireless communications. *IEEE Communications Magazine*, 47(1):97–102.
- Shakir, M., Khan, M. A., Malik, S. A., and ul Haq, I. (2012). Design of underwater sensor networks for water quality monitoring. In *World Applied Sciences Journal*, vol.17,no.11, page 1441–1444.
- Sonardyne (2016). Datasheet BlueComm 200 - optical communications system. Accessed: Nov. 2017 [Online]. Available: http://www.sonardyne.com/app/uploads/2016/06/Sonardyne_8361_BlueComm_200.pdf.
- 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., Vieira, M. A., 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 *Proceedings of the Seventh ACM International Conference on Underwater Networks and Systems*, page 43. ACM.
- Vieira, L. F. M., Lee, U., Noh, Y., and Gerla, M. (2009). LPS: Laser positioning system for underwater networks. In *ACM International Workshop on Underwater Networks, WUWNet'09*.
- Vieira, L. F. M., Vieira, M. A. M., Nacif, J. A., and Vieira, A. B. (Jan. 2018). Autonomous wireless lake monitoring. In *Computing in Science & Engineering (Print)*.
- Wang, J., Shi, W., Xu, L., Zhou, L., Niu, Q., et al. (2017). Design of optical-acoustic hybrid underwater wireless sensor network. *Journal of Network and Computer Applications*.
- Zhou, Z., Cui, J.-H., and Zhou, S. (2007). Localization for large-scale underwater sensor networks. *Networking 2007. Ad hoc and sensor networks, wireless networks, next generation internet*, pages 108–119.