

Análise da Viabilidade de Aplicações de Monitoramento e Controle Utilizando Redes Acústicas Submarinas

Felipe Duarte dos Santos^{1,2}, Marcelo Gonçalves Rubinstein¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica - Faculdade de Engenharia
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) - Rio de Janeiro - RJ - Brasil

² Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária – INFRAERO
Rio de Janeiro - Brasil

felipe.duartesantos@gmail.com, rubi@uerj.br

Resumo. A acústica submarina vem sendo estudada por décadas, mas redes submarinas com transmissão acústica e protocolos específicos para a comunicação neste meio são campos de pesquisa que estão iniciando. Recentemente alguns simuladores, baseados no NS-2, foram desenvolvidos para o estudo destas redes. Este trabalho avalia através de simulações a viabilidade de aplicações genéricas de monitoramento e controle em redes acústicas submarinas. São usadas três topologias básicas como padrão para as redes submarinas: linha, quadro e cubo e dois protocolos MAC: Broadcast e R-MAC. Os resultados mostram que essas topologias associadas aos protocolos MAC atendem as necessidades e as peculiaridades da grande maioria das aplicações de monitoramento e controle que utilizam redes acústicas submarinas.

Abstract. Underwater acoustics has been studied for decades, but underwater networks with acoustic transmission and protocol designed for this environment are just beginning as a research field. Recently some simulators, based on NS-2 have been developed to study these networks. This study evaluates the feasibility through simulations of generic applications for monitoring and control in underwater acoustic networks. Three basic topologies are used as standard for underwater networks: line, square, and cube. Two MAC protocols are employed: Broadcast e R-MAC. Results show that these topologies associated with MAC protocols meet the needs and peculiarities of most monitoring and control applications that use underwater acoustic networks.

1. Introdução

As redes submarinas de sensores com transmissão acústica começaram a ser estudadas recentemente com a motivação do desenvolvimento de novas aplicações para a exploração, estudo e a proteção dos oceanos. Um dos primeiros estudos realizados foi apresentado em [Akyildiz, Pompilli e Melodia 2005]. Devido às restrições da comunicação via rádio e da comunicação ótica no meio aquático a transmissão acústica tornou-se a alternativa mais viável, mesmo com as restrições impostas pelo canal: largura de banda reduzida, desvanecimento (*fading*), alta atenuação, alta latência e

interferência multicaminhos; características que influenciam todas as camadas de protocolos, a arquitetura do sistema e o desenvolvimento das aplicações.

As redes submarinas de sensores apresentam diversas diferenças em relação às redes de sensores terrestres, sendo as principais o maior consumo de energia necessário para a transmissão, a necessidade de uma maior capacidade de memória e o custo dos sensores [Vieira, Loureiro, Fernandes e Campos 2010].

Para que seja possível a transmissão através do canal acústico os protocolos MAC e de rede devem ser capazes de operar nas adversidades impostas pelo meio, principalmente com o alto grau de interferência e com o longo atraso de propagação. A análise das características do canal acústico é fundamental para a definição de quais protocolos serão utilizados com o objetivo de determinar a viabilidade de uma aplicação. Além disso, estas informações podem auxiliar muito no desenvolvimento de novos protocolos, específicos para redes submarinas com transmissão acústica.

O estudo e o desenvolvimento de uma tecnologia de transmissão acústica e de topologias de rede que superem as limitações do meio aquático são essenciais para a viabilidade das aplicações. Listamos abaixo algumas aplicações que podem ser implementadas através de uma rede acústica submarina:

- monitoramento ambiental: monitoramento de poluição química, biológica ou nuclear [Zhang, Sukhatme e Requicha 2004];
- monitoramento de dados oceanográficos: monitoramento da temperatura, salinidade, condutividade, correntes marítimas, pressão, ondas, marés e emissão de poluentes;
- exploração submarina: detecção de reservas de petróleo e/ou auxílio na exploração;
- controle de robôs ou veículos submarinos: rede para controle e localização de robôs e veículos submarinos utilizados na exploração submarina;
- prevenção de desastres: sensores instalados no leito oceânico podem medir variações sísmicas com o objetivo de se analisar os efeitos de terremotos submarinos e detectar a formação de tsunamis [Soreide, Woody e Holt 2004];
- aplicações militares: as redes podem ser instaladas em determinadas áreas de interesse militar para a detecção de mergulhadores, submarinos ou navios inimigos. [Cayirci, Tezcan, Dogan e Coskun 2006];
- monitoramento de reservatórios de água potável: utilização de uma rede de sensores para o monitoramento e o controle de reservatórios de água potável [Yang, Ong, Dreschel, Zeng, Mungle e Grimes 2002].

A principal contribuição deste trabalho é a análise do comportamento das redes acústicas submarinas utilizando-se diferentes topologias e diferentes protocolos MAC com o objetivo de auxiliar o desenvolvimento de aplicações baseadas neste tipo de rede.

Este trabalho avalia através de simulações a viabilidade de aplicações de monitoramento e controle utilizando as redes acústicas submarinas. São usadas três topologias apresentadas como básicas para as redes submarinas: linha, quadro e cubo. Em relação aos protocolos MAC, propomos o Broadcast e o R-MAC. Os resultados mostram que as topologias associadas aos protocolos MAC atendem as necessidades e as peculiaridades da grande maioria das aplicações de monitoramento e controle utilizando redes acústicas submarinas.

O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta as principais características do canal acústico e as dificuldades de transmissão no meio. A Seção 3 apresenta os protocolos MAC e os protocolos de rede para as redes acústicas submarinas. A Seção 4 trata das características da camada física e especifica os modelos de modems acústicos mais utilizados. Já a Seção 5 lista os requisitos básicos necessários para a viabilidade das aplicações. A Seção 6 descreve o cenário de simulação e apresenta os resultados obtidos. Na Seção 7 o trabalho é concluído.

2. Características do canal acústico submarino

De acordo com [Harris e Zorzi 2007], o canal acústico submarino é diferente em relação aos meios de transmissão terrestres em vários aspectos, apresentando as seguintes características:

- velocidade de propagação: a velocidade de propagação do som na água é de 1500 m/s, cinco ordens de grandeza menor do que a velocidade de propagação eletromagnética no ar que é de 3×10^8 m/s. Essa baixa velocidade gera uma grande latência nas transmissões acústicas subaquáticas (aproximadamente 0,67 s/km ou 1 segundo a cada 1500 m). Esse é um dos maiores problemas do canal acústico, que gera implicações nos processos de localização e sincronização dos nós na rede. Além disso, a velocidade de propagação do som na água é variável, dependendo da profundidade, da temperatura e da salinidade. A velocidade aumenta com a temperatura cerca de 4 m/s a cada grau celsius, com a salinidade cerca de 1 m/s por cada unidade ppm e 1,7 m/s a cada 100 metros de profundidade;

- atenuação e ruído: a atenuação total no canal acústico é calculada com base na perda de propagação proposta em [Urlick 1983] e pela aproximação de Thorp, apresentada em [Brekhovskikh e Lysanov 1991], para perdas por espalhamento. Estas informações são utilizadas para calcular a relação sinal ruído (SNR) no receptor;

- interferência multicaminhos: a interferência multicaminhos é causada pela reflexão do sinal acústico no fundo, na superfície ou em algum objeto no oceano, causando a interferência intersímbolos. A interferência intersímbolos no canal acústico é de dezenas a centenas de intervalos, já nas transmissões eletromagnéticas terrestres esta interferência é de alguns intervalos. O som na água pode se propagar em trajetórias curvilíneas e, em alguns casos, pode não atingir determinadas regiões denominadas zonas de sombra, que são locais inalcançáveis por transmissões acústicas. O mesmo fenômeno é responsável pela formação de zonas de convergência, locais onde transmissões provenientes de trajetórias diferentes convergem em tempos diferentes. Nas transmissões digitais esse fenômeno causa o aumento da interferência intersímbolos. O fenômeno da convergência ocorre mais intensamente em águas profundas;

- largura de banda: a largura de banda é extremamente limitada e varia em relação à distância e à frequência, conforme mostrado na Tabela 1, reproduzida de [Akyildiz, Pompili e Melodia 2006];

Tabela 1 – Banda x distância transmissor receptor.

Sistema	Distância (km)	Banda (kHz)
Muito Longo	1000	< 1
Longo	10 - 100	2 - 5
Médio	1 - 10	≈ 10
Curto	0.1 - 1	20 - 50
Muito Curto	< 0.1	> 100

• potência de transmissão: as potências envolvidas nas transmissões acústicas são muito maiores do que as potências necessárias para as transmissões eletromagnéticas. Essa diferença se explica pelo fato de o sinal acústico ser gerado por vibrações mecânicas das moléculas do meio. Esses movimentos se traduzem em mudanças de pressão e, como a fonte é oscilatória, ocorrem regiões de compressão e de rarefação que se propagam como ondas pelo meio. Por isso as grandezas acústicas são derivadas da pressão e a potência acústica é a energia sonora emitida por unidade de tempo.

3. Protocolos de comunicação

Os protocolos utilizados nas redes acústicas submarinas devem ser robustos o suficiente para suportar os elevados níveis de interferência e ruído do meio. Alguns protocolos MAC tais como o Broadcast MAC e o R-MAC podem ser utilizados tanto em redes terrestres quanto em redes submarinas devido principalmente a simplicidade e eficiência de ambos. Nas seções seguintes apresentamos alguns protocolos que vêm sendo utilizados em redes acústicas submarinas.

3.1 Protocolos de controle de acesso

O Broadcast MAC [Harris e Zorzi 2007] é um dos protocolos de controle de acesso mais convencionais da subcamada MAC e seu funcionamento consiste no seguinte: quando um nó tem quadros para enviar ele inicialmente escuta o canal para verificar se transmissões estão sendo realizadas. Se o canal estiver livre os pacotes são transmitidos, senão o protocolo roda um algoritmo de *back-off* antes de realizar a próxima tentativa de transmissão. Os quadros serão descartados se o número de *back-off* exceder um determinado limite que usualmente é de três tentativas. Quando o receptor recebe o quadro ele não envia um reconhecimento positivo (ACK) para o transmissor, que irá iniciar uma nova transmissão independentemente da entrega do último quadro enviado. O Broadcast MAC é um protocolo simples, mas eficiente em redes com baixo tráfego que tira vantagens da natureza da transmissão do canal acústico, sendo indicado para a utilização com protocolos de geo-roteamento tais como o VBF (*Vector Based Forwarding*) [Xie, Cui e Lao 2006].

O protocolo R-MAC (*Reservation Based MAC*) [Xie e Cui 2007] visa à economia de energia, extremamente necessária para as redes de sensores. Seu diferencial é a operação dos nós em modo escutar/hibernar reduzindo a energia gasta em estados ociosos. O tempo de duração entre o escutar e o hibernar é o mesmo para todos os nós e cada um deles seleciona aleatoriamente o seu escalonamento de tal forma que se consiga justiça de acesso ao meio e economia de energia. No R-MAC não são necessários escalonamentos centralizados pois se não houver tráfego, os nós

simplesmente escutam e hibernam periodicamente. Quando um nó quer transmitir para outro nó, o R-MAC utiliza uma abordagem baseada em reserva de canal para sincronizar, de forma distribuída, as transmissões evitando colisões.

A operação do R-MAC se divide em três fases: detecção de latência, anúncio do período e operação periódica. Na fase de detecção de latência todos os nós estão ativos e escolhem um tempo aleatório para a transmissão em difusão de um quadro de controle denominado quadro de descoberta de vizinho (*Neighbor Discovery* - ND). Nesta fase, um nó A envia um quadro ND para um nó B e grava o tempo da transmissão. Quando o nó B recebe o quadro ND ele seleciona um tempo aleatório para a transmissão de um quadro ACK-ND para A, de mesmo tamanho de ND, informando a identificação do pacote ND recebido, a sua identificação e o tempo da transmissão. Quando A recebe este pacote, calcula o intervalo de tempo total, entre a transmissão do pacote ND e a chegada do pacote ACK-ND. A partir do tempo total o nó A obtém a latência subtraindo o tempo aleatório informado por B no quadro ACK-ND e depois dividindo o resultado por dois. Na fase de anúncio de período cada nó escolhe aleatoriamente seu período para escutar/hibernar e propaga esta informação para os nós da rede. Levando em consideração a latência, um nó possui informação dos escalonamentos dos outros nós. Finalmente, na fase de operação periódica os dados são transmitidos de forma controlada através da troca de informações entre os nós. Quando um nó possui dados para transmitir ele envia um quadro REV (de reserva de intervalo de tempo) para o receptor. Se o receptor estiver disponível ele notifica o transmissor solicitante e os seus vizinhos com um quadro ACK-REV. A partir daí somente o transmissor solicitante transmite (quadros DATA) e todos os outros nós permanecem em silêncio. Ao final da rajada de dados, o receptor envia um quadro ACK-DATA informando ao transmissor a correta recepção dos quadros e liberando o meio.

3.2 Protocolos de Roteamento

Os protocolos de roteamento utilizados nas redes acústicas submarinas devem ser robustos, escaláveis e utilizar energia com eficiência. Estes requisitos são imprescindíveis para o funcionamento das redes. Protocolos de roteamento proativos e reativos, utilizados nas redes terrestres, não devem ser utilizados nas redes acústicas submarinas. Isto porque o primeiro tipo de protocolo de roteamento realiza atualizações constantes das rotas consumindo muita energia e o segundo tipo, devido ao atraso de propagação do meio, leva muito tempo para encontrar as rotas. Protocolos de roteamento geográfico que associam a localização geográfica do sensor a sua profundidade são os mais indicados para redes de sensores subaquáticas. Um nó sorvedouro, localizado na superfície ou a uma determinada profundidade, é a referência geográfica de toda a rede e todos os demais nós atualizam suas posições em relação a ele através da troca periódica de pacotes e do cálculo das distâncias a partir do atraso de propagação.

O DBR (*Depth Based Routing*) [Yan, Shi and Cui 2010], assim como a maioria dos protocolos de roteamento acústico, considera a arquitetura geral de uma rede submarina de sensores, composta por um nó sorvedouro (*sink*) localizado na superfície e por nós submersos. Baseando-se nas informações de profundidade de cada um dos nós sensores, o DBR realiza o encaminhamento dos pacotes enviados pelos nós submersos até o nó sorvedouro. O pacote de dados do DBR possui um campo que registra as informações de profundidade do último transmissor do pacote, que são atualizadas a

cada salto. Quando um nó recebe um pacote ele o encaminha se a profundidade do próprio nó for menor do que a profundidade registrada no pacote, caso contrário o pacote é descartado. Os nós localizados em maiores profundidades enviam para os nós localizados em menores profundidades até que as informações cheguem ao nó sorvedouro. Para a determinação das distâncias entre os nós utiliza-se o protocolo TOA (*Time of Arrival*), que calcula, através de algoritmos, a distância entre os nós considerando o atraso de propagação. O nó sorvedouro, localizado em uma boia na superfície, estabelece a referência geográfica da rede através de GPS.

O protocolo VBF [Xie, Cui e Lao 2006] opera de forma escalável e com eficiência energética e apresenta bons resultados em redes acústicas submarinas. No VBF cada pacote carrega as informações do nó fonte (*source*), do nó destino (*target / sink*) e do nó transmissor (*forwarder*). Uma rota de transmissão é estabelecida pelo vetor de roteamento entre o nó fonte e o nó de destino considerando a localização de cada um dos nós. Ao receber um pacote um nó calcula sua posição relativa ao transmissor medindo a distância e o ângulo de chegada do sinal. Se o nó verifica que está suficientemente próximo do vetor de roteamento predefinido ele inclui suas próprias informações de localização no pacote e o encaminha, passando a fazer parte da rota de roteamento para aquele destinatário, caso contrário simplesmente descarta o pacote. Pode-se considerar que o caminho de transmissão, estabelecido pelo vetor de roteamento, forma um tubo virtual de roteamento que vai do nó fonte ao destino. Os nós sensores localizados dentro da área do tubo são utilizados para realizar a transmissão, já os nós fora do tubo não transmitem.

4. Modems e sensores submarinos

Os modems acústicos conectados aos sensores submarinos realizam a transmissão acústica dos dados coletados, possibilitando o monitoramento das informações em tempo real. Um mesmo sensor submarino pode operar com diferentes tipos de modems dependendo das especificações exigidas pela aplicação que se deseja implementar.

O micro-modem experimental WHOI [Freitag, Grund e Singh 2005] foi desenvolvido especificamente para estudo e simulações das redes acústicas submarinas. Em paralelo, empresas como a Link-quest (www.link-quest.com) e a Benthos Teledyne (www.benthos.com) desenvolveram modems acústicos em escala comercial com o objetivo de atender às necessidades das empresas petrolíferas. Como exemplo, pode-se citar os modelos UWM 1000 da Link-quest e o modelo ATM-887 da Benthos. A Tabela 2 apresenta as especificações dos modems UWM 1000, UWM 4000 e UWM 10000 da Link-quest.

Tabela 2 – Especificações dos modems Link-quest.

Modelo	UWM 1000	UWM 4000	UWM 10000
Parâmetro	Valor	Valor	Valor
Link acústico	17800 bps	8000 bps	5000 bps
Taxa útil máxima (<i>payload</i>)	7000 bps	3200 bps	2000 bps
Distância máxima de operação	350 m	4000 m	7000 m
Taxa de erro de bits	$\sim 10^{-9}$	$\sim 10^{-9}$	$\sim 10^{-9}$
Profundidade máxima	200 m	3.000 m	4.000 m
Consumo em TX	1 Watt	7 Watt	40 Watt
Consumo em RX	0,75 Watt	0,8 Watt	0,9 Watt
Consumo em repouso	8 mW	8 mW	9 mW
Frequência de operação	26,77 a 44,62 kHz	12,75 a 21,25 kHz	7,5 a 12,5 kHz

Em relação aos sensores acústicos, a Teledyne RD Instruments (www.rdinstruments.com) fabrica sensores com capacidade para operar a grandes profundidades e que são utilizados para coletar dados sobre a velocidade das marés, os tipos de partículas em suspensão na água, os tipos de sedimentos no solo, dentre outros. Alguns dos sensores fabricados pela Teledyne RD são o *Workhorse Long Ranger* e o *Workhorse Waves Array*.

5. Requisitos básicos para a viabilidade das aplicações

Devido às limitações do canal acústico, alguns requisitos devem ser observados na implementação de aplicações baseadas em redes de sensores com transmissão acústica. Os principais são os seguintes:

- taxa de transmissão: a taxa de transmissão na comunicação acústica é limitada pelas características de propagação no meio. Na prática não se deve considerar taxas acima de 10 kbps, que é a taxa útil máxima que se consegue alcançar com os atuais modems acústicos submarinos;
- distância entre os nós: no canal acústico a banda disponível é inversamente proporcional à distância, conforme a Tabela 1. Por exemplo, o modem UWM 10000 da Link-quest especificado na Tabela 2 opera em uma frequência máxima de 12,5 kHz e tem um alcance máximo de 7 km. Utilizando a modulação BPSK pode ser obtida uma taxa teórica de 5 kbps. Devido às perdas no meio a taxa útil máxima alcançada é de apenas 2 kbps de acordo com as especificações apresentadas. Para modems com alcance menor que 1 km, como é o caso do UWM 1000, os equipamentos conseguem alcançar taxas úteis um pouco maiores, mas não superiores a 10 kbps. O UWM 1000, por exemplo, apresenta uma taxa útil máxima de 7 kbps para uma frequência máxima de operação de 44,62 kHz e uma distância de 350 metros;
- volume e periodicidade da geração dos dados: como as taxas de transmissão do canal acústico são reduzidas, as aplicações não devem gerar um grande volume de dados já que muitas transmissões ocupariam muito tempo do canal acústico, limitando a escalabilidade da rede em relação ao número de nós. Os dados devem ser transmitidos em pacotes pequenos, que apresentam maior probabilidade de sucesso na recepção acústica por serem menos suscetíveis às interferências do meio. A Tabela 3 mostra o tamanho do pacote utilizado por alguns modelos de ADCPs (*Acoustic Doppler Current*

Profilers) da Teledyne RD Instruments que são sensores utilizados na medição de correntes marítimas. Embora existam diferenças entre fabricantes, tipos de sensores, modelos, configurações e aplicações, a quantidade de bytes fixos por pacote não varia muito. Com isso pode-se considerar que um pacote de dados com 1000 bytes comportará todas as informações necessárias para diversos tipos de aplicações.

Tabela 3 – Dados registrados por um sensor submarino.

bytes	Conteúdo
20	Cabeçalho geral
53	Cabeçalho de configuração
65	Cabeçalho de dados
242	Dados de velocidade
122	Dados de correlação de amplitude
122	Intensidade dos ecos
122	Percentual de dados válidos
81	<i>Bottom track</i>
2	Reservado
2	<i>Checksum</i>
831	bytes

- autonomia dos equipamentos: os sensores e os modems são alimentados por baterias que não podem ser recarregadas ou substituídas sem a retirada dos equipamentos de operação. Os protocolos utilizados devem levar em consideração esta característica da rede acústica;

- mobilidade e sincronismo: a utilização de nós móveis ainda é um fator complicador para a transmissão acústica. As aplicações com nós fixos são, atualmente, as mais viáveis para a implementação em redes submarinas com transmissão acústica. Os nós fixos facilitam muito a determinação dos atrasos de transmissão e a adaptação e o desenvolvimento de protocolos específicos de acesso ao meio.

6. Simulações

Nesta seção será analisada a viabilidade de aplicações genéricas utilizando redes acústicas submarinas. O desempenho de protocolos MAC em três topologias básicas foi avaliado utilizando-se como métricas o atraso total, o consumo de energia e a eficiência de utilização do canal acústico. O objetivo principal foi definir a topologia de rede e o tipo de protocolo MAC mais apropriado para cada tipo de aplicação.

Para a realização das simulações foi utilizado o simulador Aqua-sim [Xie, Zhou, Peng, Cui e Shi 2009], que efetivamente simula a atenuação no canal acústico subaquático, os atrasos e as colisões na rede. Além disso possui a capacidade de simular redes em duas ou três dimensões, reproduzindo a transmissão no meio subaquático com uma boa fidelidade. O Aqua-sim é um módulo independente desenvolvido para rodar no NS-2 (<http://isi.edu/nsnam/ns/>).

Neste estudo são utilizadas as topologias linha, quadro e cubo, propostas como topologias básicas para as redes acústicas submarinas, conforme mostrado na Figura 1.

Cada topologia é composta por nove nós, sendo oito nós transmissores/receptores e um nó sorvedouro (sink), que realiza a concentração dos pacotes, a interface e o encaminhamento das informações para uma rede na superfície. Nas simulações consideramos que a conexão do nó sorvedouro com a superfície é realizada através de um cabo. O nó sorvedouro está localizado a uma profundidade de 50 metros em relação à superfície e a distância (d) entre nós adjacentes é de 50 metros.

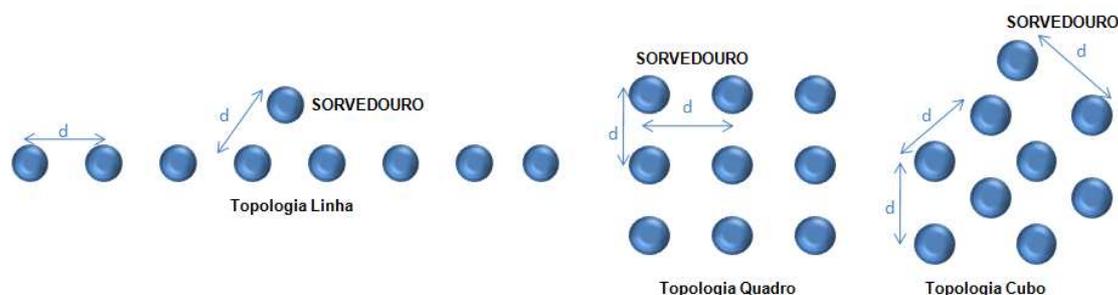


Figura 1 – Topologias básicas para redes acústicas submarinas.

As análises se basearam em simulações realizadas nas três topologias propostas. Para o roteamento foi utilizado o protocolo VBF e para acesso ao meio foram avaliados os protocolos Broadcast MAC e R-MAC. Os sensores foram configurados para transmitir pacotes de 1000 bytes considerados suficientes para a transmissão das informações coletadas em diversas aplicações. A taxa física foi configurada em 5 kbps e o tipo de tráfego utilizado foi o CBR (*Constant Bit Rate*). Os parâmetros escolhidos para a realização das simulações tais como consumo de energia na transmissão, consumo de energia na recepção, taxa útil, distância de operação se basearam nas especificações do modem UWM 1000, descritas na Tabela 2.

Nas simulações todas as fontes permaneceram ligadas durante 600 segundos e a taxa de aplicação (CBR) foi variada entre 0,00166 pacotes/segundo e 0,05 pacotes/segundo que correspondem a 1,66 bps e 50 bps respectivamente.

6.1 Consumo de energia, atraso total e eficiência de utilização do canal acústico

Para a realização das simulações, as fontes dos oito nós sensores foram configuradas para iniciar as transmissões aleatoriamente, entre 0 e 14 segundos. Cada simulação foi repetida dez vezes e a partir dos dados obtidos foram calculados os intervalos de confiança para o consumo total de energia e para o atraso total das redes. Para a obtenção do intervalo de confiança foi considerado um nível de significância de 0,05.

Os gráficos a e b das Figuras 2, 3 e 4 mostram o atraso total médio em relação ao aumento da taxa de aplicação para cada uma das topologias. Como esperado, ao aumentar a taxa da aplicação o atraso total médio também cresce. Além disso, este atraso é muito menor quando se utiliza o Broadcast MAC ao invés do R-MAC. Isto ocorre devido ao tempo adicional utilizado para a transmissão dos quadros de controle (REV/ACK) utilizados pelo R-MAC para a reserva do canal e confirmação de recebimento dos pacotes. Essa variação pode ser claramente percebida quando comparamos os gráficos a e b das Figuras 2, 3 e 4.

Apesar de todas as topologias apresentarem uma grande variação no atraso em relação ao protocolo MAC utilizado, a maior delas foi verificada para a topologia quadro no gráfico 3b. Neste caso o atraso da rede utilizando o protocolo R-MAC a uma taxa de 0,00166 pps é de aproximadamente 200 segundos e a uma taxa de 0,05 pps é de

aproximadamente 1300 segundos. No gráfico 3a observamos que para as mesmas taxas obtemos atrasos de 0 e 100 segundos respectivamente. Neste caso para a rede utilizando R-MAC o atraso a uma taxa de 0,00166 pps já é maior do que o atraso para uma rede utilizando o Broadcast a uma taxa de 0,05 pps.

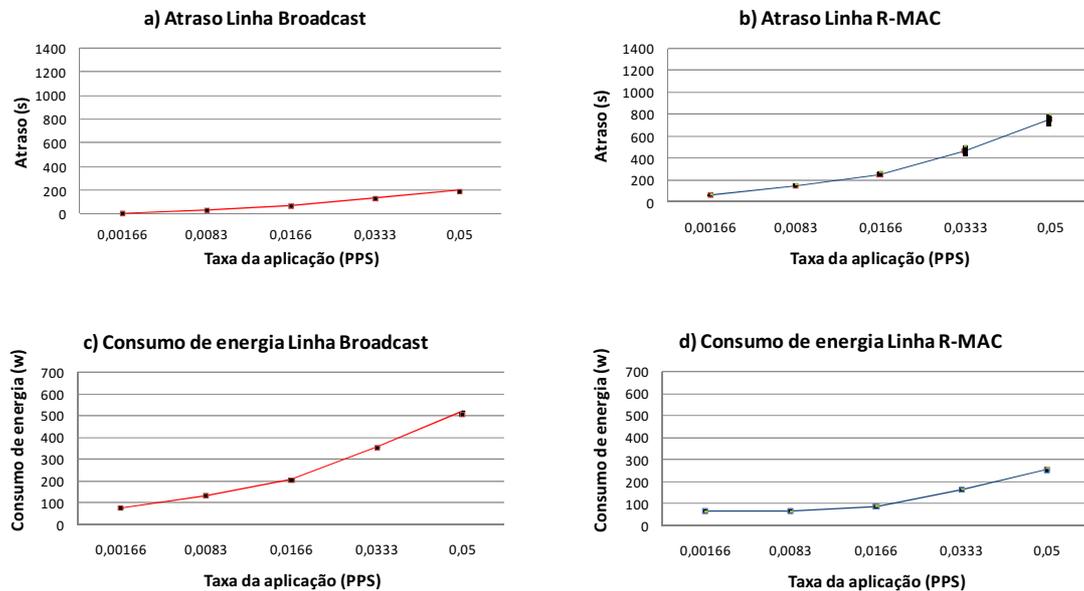


Figura 2 – Atraso e consumo de energia na topologia Linha.

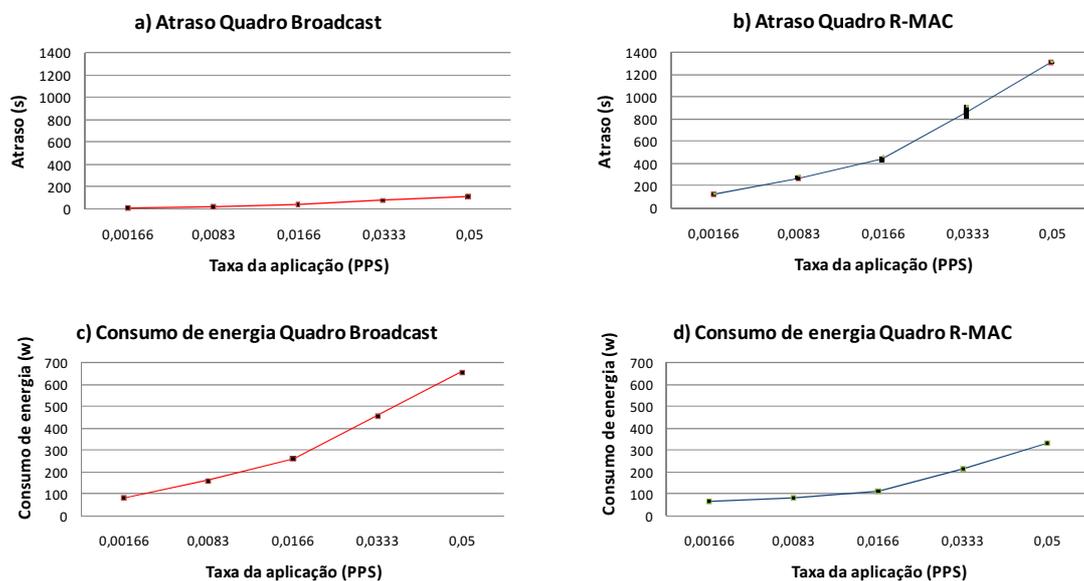


Figura 3 – Atraso e consumo de energia na topologia Quadro.

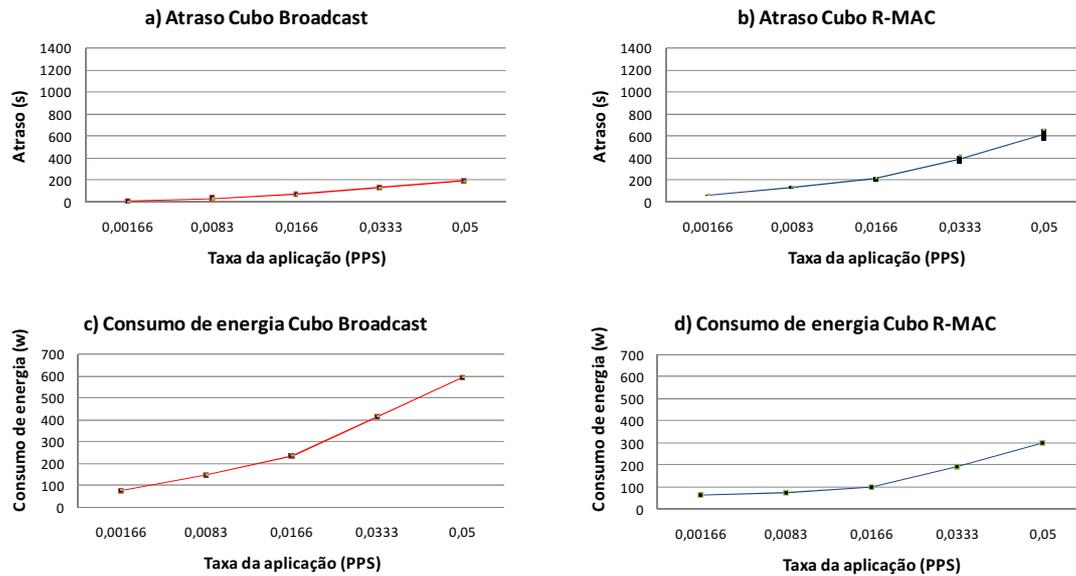


Figura 4 – Atraso e consumo de energia na topologia Cubo.

Nos gráficos c e d das Figuras 2, 3 e 4 observam-se diferenças significativas no consumo de energia quando se utiliza o Broadcast MAC e o R-MAC. Quando o Broadcast MAC é utilizado há um grande aumento no consumo conforme a taxa da aplicação cresce, diferentemente dos casos com o R-MAC, onde o consumo também cresce, mas a uma taxa bem menor. Esse comportamento é justificado pelo modelo de operação escutar/hibernar do R-MAC, onde os nós escutam periodicamente o meio para verificar se existe tráfego. Se o canal estiver livre e houver pacotes a transmitir, o transmissor enviará um pacote solicitando ao receptor a reserva do canal. Este processo reduz consideravelmente as colisões no meio e o consumo de energia. Já no Broadcast os nós não hibernam, consomem muita energia escutando o meio frequentemente e simplesmente transmitem se o meio estiver livre. Comparando o consumo de energia entre as topologias utilizando o mesmo protocolo MAC verificamos que a variação é muito pequena. Concluímos que a maior influência vem mesmo do tipo de protocolo MAC utilizado.

Outra métrica avaliada foi a eficiência do canal η [Pompili, Melodia e Akyildiz 2006] definida como:

$$\eta = \frac{1}{r} \frac{L_p^d}{T_p \times N^{TX}}$$

onde r é a taxa de transmissão, N^{TX} a média do número de transmissões necessárias para o quadro ser recebido, T_p o tempo total para que o quadro e sua confirmação sejam corretamente recebidos e L_p^d o tamanho do campo de dados de um quadro.

A Figura 5 mostra a eficiência do canal para cada uma das topologias em relação aos protocolos Broadcast-MAC e R-MAC. Verifica-se que a eficiência de utilização do canal é maior quando se utiliza o Broadcast MAC e menor quando se utiliza o R-MAC em todas as topologias. A diferença se explica pelos pacotes de controle utilizados pelo R-MAC que aumentam o tempo total para que um quadro de dados e seu respectivo ACK sejam recebidos.

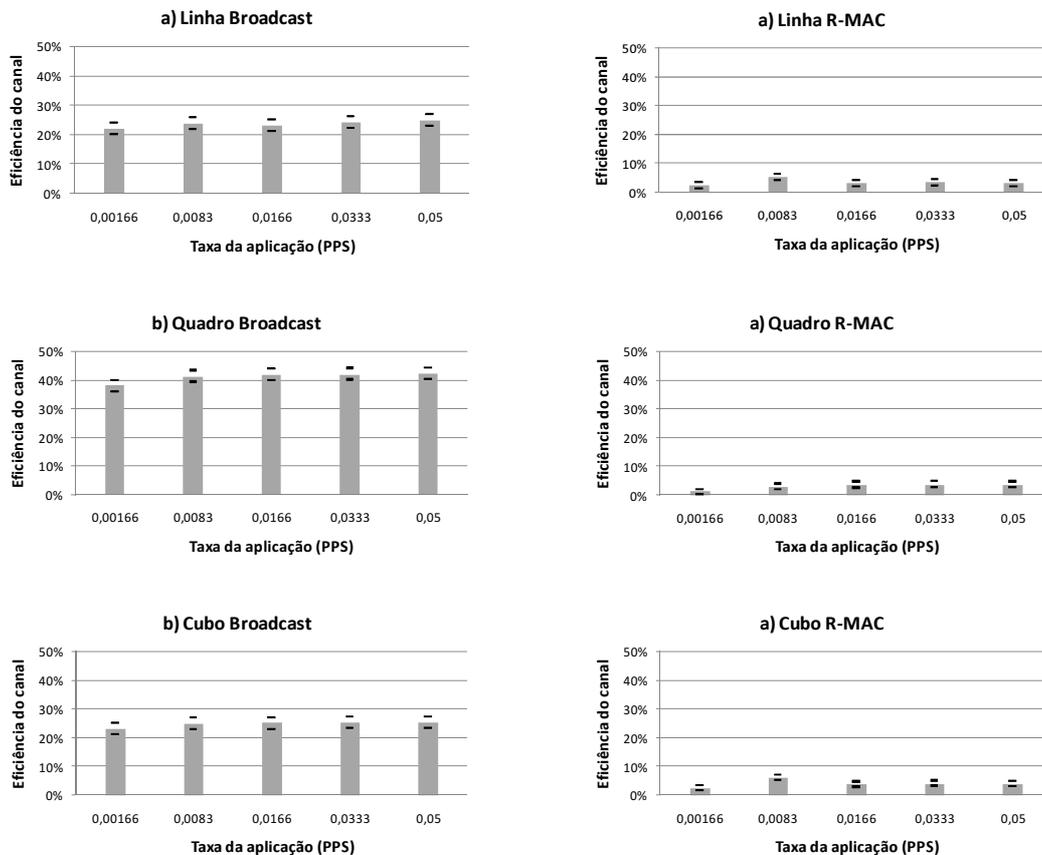


Figura 5 – Eficiência de utilização do canal.

6.2 Aplicações x topologias

Na Tabela 4 as aplicações são associadas a uma das três topologias básicas propostas e a um dos protocolos MAC analisados com o objetivo de auxiliar os desenvolvedores das aplicações. A definição da melhor topologia de rede para uma determinada aplicação se baseou na área de cobertura necessária e na necessidade da implementação em duas ou três dimensões. Em uma aplicação de controle de robôs e veículos submarinos, por exemplo, a topologia mais indicada é a cubo que possibilita o controle dos dispositivos em uma determinada área e em três dimensões. Já para a aplicação de monitoramento de desastres (tsunamis), a topologia mais indicada é a linha devido a necessidade de se monitorar grandes distâncias a uma determinada profundidade, caracterizando uma topologia em duas dimensões. Já a topologia quadro é indicada para aplicações de monitoramento militar que necessitam monitorar grandes distâncias e diferentes profundidades.

O tipo de protocolo MAC, a autonomia em termos de consumo de energia e a tolerância ao atraso foram definidos de acordo com as características e os tipos de dados gerados por cada aplicação. As aplicações de monitoramento oceanográfico e ambiental e de exploração submarina, por exemplo, não geram informações constantemente já que os parâmetros oceanográficos monitorados não variam com muita rapidez, podendo levar dias ou horas. Apesar disso as informações coletadas devem ser transmitidas de forma confiável e os sensores devem ter uma grande autonomia de energia. Por isso neste caso o protocolo mais indicado é o R-MAC. Já o Broadcast MAC é indicado para

aplicações com baixa tolerância ao atraso onde as informações precisam ser recebidas rapidamente. A maioria destas aplicações realiza controle remoto ou geram alarmes, como as de controle de robôs submarinos e as de monitoramento militar respectivamente.

Tabela 4 – Aplicações x topologias.

Aplicação	Características dos dados	Topologia	Protocolo MAC	Autonomia de energia	Tolerância ao atraso
Monitoramento oceanográfico e ambiental	Os parâmetros monitorados não variam com muita rapidez. Os dados precisam ser confiáveis	Quadro ou Linha	R-MAC	Alta	Alta
Exploração submarina	Os parâmetros monitorados não variam com muita rapidez. Os dados precisam ser confiáveis	Cubo	R-MAC	Alta	Alta
Monitoramento de reservatórios de água	Os parâmetros monitorados variam após longos intervalos de tempo. Os dados precisam ser confiáveis	Linha	R-MAC	Baixa	Alta
Controle de robôs e veículos submarinos	A transmissão deve contar com o menor atraso possível para evitar falhas e erros na interpretação dos comandos	Cubo	Broadcast MAC	Baixa	Baixa
Prevenção de desastres	Devem ser recebidos rapidamente para a tomada de ações de emergência	Linha ou Quadro	Broadcast MAC	Alta	Baixa
Monitoramento militar	Devem ser recebidos rapidamente para a tomada de ações de contramedida	Quadro	Broadcast MAC	Alta	Baixa

7. Conclusões

A partir da análise das simulações realizadas neste estudo conclui-se que as aplicações de monitoramento e controle, baseadas em redes acústicas submarinas, são consideradas viáveis para aplicações práticas. Os desenvolvedores das aplicações devem atentar principalmente para o tipo de protocolo e a topologia que melhor se adequam a aplicação, ou seja, que irão proporcionar um melhor desempenho da rede e uma maior confiabilidade dos dados. Este estudo pode ser considerado um guia inicial para auxiliar os desenvolvedores na definição destes parâmetros básicos, mas fundamentais ao sucesso de uma aplicação em redes acústicas submarinas. Como trabalho futuro pretende-se avaliar outros protocolos MAC e de roteamento associados às topologias linha, quadro e cubo. Com isso será possível a elaboração de um guia de referência mais completo para os desenvolvedores.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio da Marinha do Brasil, da Gerência de TI da Infraero no Rio de Janeiro, da Faperj e do CNPq.

Referências

Akyildiz, I., F., Pompili, D. e Melodia, T. (2005) “Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges,” *Ad Hoc Net.*, vol. 3, pp. 257–79.

- Vieira, L., Loureiro, A., Fernandes, A. e Campos M. (2010) “Redes de Sensores Aquáticas”, XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, Gramado, RS, Brasil, 24 a 28 de maio.
- Zhang, B, Sukhatme, G.S. e Requicha, A.A. (2004) “Adaptive sampling for marine microorganism monitoring”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems.
- Soreide, N.N., Woody, C.E. e Holt, S.M. (2004) “Overview of ocean based buoys and drifters: Present applications and future needs”, 16th International Conference on Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology.
- Cayirci, E., Tezcan, H., Dogan, Y. e Coskun, V. (2004) “Wireless sensor networks for underwater surveillance systems”, Ad Hoc Networks vol. 4, no. 4, pp. 409-23.
- Yang, X., Ong, K.G , Dreschel, W.R , Zeng, K., Mungle, C.S e Grimes, C.A. (2002) “Design of a wireless sensor network for long-term, in-situ monitoring of an aqueous environment”, Sensors, vol. 2, pp. 455–472.
- Harris, A., F. e Zorzi, M. (2007) “Modeling the Underwater Acoustic Channel in ns2”, ValueTools '07: Proceedings of the 2nd International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools, pp. 1–8, ICST, Bélgica.
- Urick, R. J. (1983) “Principles of Underwater Sound”. McGraw-Hill.
- Brekhovskikh, L. M. e Lysanov, Y. P. (1991) Fundamentals of Ocean Acoustics. Springer-Verlag.
- Akyildiz, I., F., Pompili, D. e Melodia, T. (2006) “State of the Art in Protocol Research for Underwater Acoustic Sensor Networks” ACM International Workshop on UnderWater Networks (WUWNet), Los Angeles, CA, EUA.
- Xie, P., Cui, J. H. e Lao, L. (2006) “VBF: Vector-Based Forwarding Protocol for Underwater Sensor Networks” IFIP Networking, Coimbra. Portugal.
- Xie, P. and Cui, J. H. (2007) “R-MAC: An Energy-Efficient MAC Protocol for Underwater Sensor Networks”, International Conference on Wireless Algorithms, Systems and Applications.
- Yan, H., Shi, Z. J. e Cui, J. H. (2010). “DBR: Depth-Based Routing for Underwater Sensor Networks”, Industrial Mechatronics and Automation (ICIMA), 2010 2nd International Conference.
- Freitag, L., Grund, M. e Singh, S. (2005) “The WHOI Micro-modem: an Acoustic Communications and Navigation System for Multiple Platforms”, *OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE*.
- Xie, P., Zhou, Z., Zheng Peng, H. Y., Hu, T., Cui, J.-H., Shi, Z., Fei, Y. e Zhou, S. (2009) “Aqua-Sim: A NS-2 based simulator for underwater sensor networks”. *OCEANS MTS/IEEE*.
- Pompili, D., Melodia, T. e Akyildiz, I. F. (2006) “Routing algorithms for delay-insensitive and delay-sensitive applications in underwater sensor networks”. *MobiCom'06*, pages 298–309, Los Angeles, CA, EUA.