



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Felipe Duarte dos Santos

**Análise da viabilidade de aplicações de monitoramento e controle
utilizando redes acústicas submarinas**

Rio de Janeiro

2012

Felipe Duarte dos Santos

**Análise da viabilidade de aplicações de monitoramento e controle utilizando
redes acústicas submarinas**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Redes de Telecomunicações.



Orientador: Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Rubinstein

Rio de Janeiro

2012

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

| | |
|------|--|
| S237 | <p>Santos, Felipe Duarte dos. Análise da viabilidade de aplicações de monitoramento e controle utilizando redes acústicas submarinas. / Felipe Duarte dos Santos - 2012. 56f. : il.</p> <p>Orientador: Marcelo Gonçalves Rubinstein Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.</p> <p>1. Engenharia Eletrônica. 2. Acústica submarina - Dissertações. I. Rubinstein, Marcelo Gonçalves. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.</p> <p>CDU 551.463.2</p> |
|------|--|

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Felipe Duarte dos Santos

**Análise da viabilidade de aplicações de monitoramento e controle utilizando
redes acústicas submarinas**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Redes de Telecomunicações.

Aprovada em 24 de abril de 2012:

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Gonçalves Rubinstein (Orientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Alexandre Sztajnberg
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Aloysio de Castro Pinto Pedroza
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ / COPPE

Rio de Janeiro

2012

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, professores e incentivadores.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, minha família e a minha namorada pela compreensão durante os momentos de ausência necessários para a dedicação a este trabalho.

Quero agradecer também ao meu orientador Marcelo Gonçalves Rubinstein por todo o suporte, ao meu amigo e companheiro de mestrado Alcyr da Silva Junior pela parceria constante, ao CMG (EN) Antonio da Silva Castro Sobrinho e ao CF Victor Buarque da Marinha do Brasil pela motivação e pelo incentivo e aos meus gestores na Infraero: Marcelo Rezende Manhães da Silva e Mario Pan Moreira pelo apoio.

RESUMO

SANTOS, Felipe Duarte dos. *Análise da viabilidade de aplicações de monitoramento e controle utilizando redes acústicas submarinas*. 2012. 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

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 propostas e utilizadas três topologias básicas para redes acústicas submarinas: linha, quadro e cubo e dois protocolos MAC: Broadcast e R-MAC. Em nossas análises comparamos esses dois protocolos em relação ao consumo total de energia e o atraso total na rede. 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. O objetivo deste estudo não foi determinar qual a melhor topologia ou o melhor tipo de protocolo de acesso ao meio, mais sim determinar qual a configuração de rede mais indicada para determinada aplicação levando em consideração as características da cada uma delas.

Palavras-chave: Transmissão acústica; Redes e monitoramento.

ABSTRACT

Underwater acoustics has been studied for decades, but underwater networks with acoustic transmission and protocols 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. Are proposed and used three basic topologies for underwater acoustic networks: line, frame and hub and two MAC protocols: Broadcast and R-MAC. In our analysis we compare these two protocols in relation to the total energy consumption and total delay in the network. The results show that topologies associated with the MAC protocols meet the needs and peculiarities of most monitoring and control applications that use underwater acoustic networks. The objective of this study did not determine the best topology or the best type of MAC protocol, but rather determine which network configuration best suited to particular application taking into account the characteristics of each.

Keywords: Acoustic transmission; Network and monitoring.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1 - TEMPERATURA, SALINIDADE E VELOCIDADE DO SOM EM RELAÇÃO À PROFUNDIDADE..... | 17 |
| FIGURA 2 - SNR (DB) X FREQUÊNCIA EM RELAÇÃO À DISTÂNCIA ENTRE O TRANSMISSOR E O RECEPTOR | 20 |
| FIGURA 3 - POTÊNCIA DE TRANSMISSÃO X DISTÂNCIA ENTRE OS NÓS COM SNR DE 20 DB NO RECEPTOR | 22 |
| FIGURA 4 - ALCANCES E TAXAS DE TRANSMISSÃO DE MODENS COMERCIAIS E EXPERIMENTAIS | 23 |
| FIGURA 5 - TOPOLOGIAS BÁSICAS PARA REDES ACÚSTICAS SUBMARINAS. | 35 |
| FIGURA 6 - ATRASO LINHA. | 37 |
| FIGURA 7 - ATRASO QUADRO..... | 38 |
| FIGURA 8 - ATRASO CUBO. | 38 |
| FIGURA 9 - CONSUMO DE ENERGIA LINHA. | 40 |
| FIGURA 10 - CONSUMO DE ENERGIA QUADRO..... | 40 |
| FIGURA 11 - CONSUMO DE ENERGIA CUBO..... | 41 |
| FIGURA 12 - EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DO CANAL..... | 43 |
| FIGURA 13 – PROTOCOLOS X MÉTRICAS ANALISADAS | 46 |
| FIGURA 14 - DIAGRAMA DE CLASSES DO AQUA-SIM | 54 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 1 - BANDA X DISTÂNCIA TRANSMISSOR RECEPTOR | 21 |
| TABELA 2 - ESPECIFICAÇÕES DOS MODENS LINK-QUEST. | 32 |
| TABELA 3 - DADOS REGISTRADOS POR UM SENSOR SUBMARINO ADCP..... | 33 |
| TABELA 4 - APLICAÇÕES X TOPOLOGIAS. | 45 |

SUMÁRIO

| | | |
|-----|---|----|
| | INTRODUÇÃO | 10 |
| 1 | CONCEITOS BÁSICOS | 13 |
| 1.1 | Características das Redes Submarinas | 13 |
| 1.2 | Comunicação Submarina | 14 |
| 2 | CANAL ACÚSTICO SUBMARINO | 16 |
| 2.1 | Velocidade de Propagação do Som na Água | 16 |
| 2.2 | Atenuação e Ruído | 17 |
| 2.3 | Interferência Multicaminhos | 20 |
| 2.4 | Largura de Banda | 21 |
| 2.5 | Potência de Transmissão | 21 |
| 3 | CAMADAS FÍSICA, ENLACE E REDE | 23 |
| 3.1 | Camada Física | 23 |
| 3.2 | Protocolos de Controle de Acesso | 24 |
| 3.3 | Protocolos de Roteamento | 29 |
| 4 | REQUISITOS BÁSICOS PARA A VIABILIDADE DAS APLICAÇÕES | 31 |
| 5 | AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES | 34 |
| 5.1 | Atraso total na rede | 36 |
| 5.2 | Consumo de energia na rede | 39 |
| 5.3 | Eficiência do canal acústico | 41 |
| 5.4 | Aplicações x Topologias | 43 |
| 5.5 | Trabalhos Relacionados | 46 |
| 6 | CONCLUSÕES | 48 |
| | REFERÊNCIAS | 50 |
| | ANEXO I | 54 |

INTRODUÇÃO

As redes submarinas com transmissão acústica ou simplesmente redes acústicas submarinas começaram a ser estudadas recentemente com a motivação do desenvolvimento de novas aplicações para a exploração, o estudo e a proteção dos oceanos. Um dos primeiros estudos realizados é apresentado em (AKYILDIZ, 2005). Devido às características do meio, a comunicação via rádio não pode ser aplicada já que as ondas eletromagnéticas são absorvidas pela água. Por outro lado, com a comunicação ótica só se consegue transmissões a curtas distâncias, menores que dez metros, não atendendo as necessidades das aplicações submarinas. A transmissão acústica torna-se então 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 principais implementações em redes acústicas submarinas são as redes de sensores submarinos utilizadas em aplicações de monitoramento. Estas redes 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, 2010).

Para que seja possível a transmissão através do canal acústico, 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 acústicas submarinas.

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. Nos tópicos a seguir são apresentadas algumas aplicações que podem ser implementadas através das redes acústicas submarinas:

- monitoramento ambiental: monitoramento de poluição química, biológica ou nuclear com capacidade de detecção do problema em um curto intervalo de tempo garantindo a redução nos danos e a resolução mais rápida do problema (ZHANG, 2004);

- monitoramento de dados oceanográficos: existe um grande interesse por dados oceanográficos, tanto por pesquisadores quanto pelas empresas. Dados de temperatura, salinidade, condutividade, correntes marítimas, pressão, ondas, marés e emissão de poluentes são algumas informações que podem ser monitoradas através de uma rede de sensores submarinos;
- exploração submarina: detecção de reservas de petróleo e/ou auxílio na exploração. As operações de extração de petróleo *offshore* exigem uma série de informações, tais como velocidade e direção das correntes marinhas que são de grande importância para a segurança das operações;
- controle de robôs ou de veículos submarinos: rede para controle e localização de robôs e veículos submarinos utilizados na exploração submarina, possibilitando a substituição dos cabos utilizados atualmente;
- 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*. Alarmes podem ser emitidos para regiões costeiras (SOREIDE, 2004);
- aplicações militares: as redes podem ser instaladas em determinadas áreas de interesse militar para a detecção de mergulhadores, submarinos ou navios inimigos. Estas informações podem ser enviadas para centrais de gerenciamento em terra, ou diretamente para aeronaves e navios de ataque e contramedida (CAYIRCI, 2006);
- monitoramento de reservatórios de água potável: utilização de uma rede de sensores para o monitoramento e o controle de reservatórios de água potável, monitorando, por exemplo, as alterações do pH (YANG, 2002).

Este trabalho tem como objetivo avaliar 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. Além disso, diferentes tipos protocolos MAC são empregados.

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 os desenvolvedores de aplicações que utilizam redes submarinas (SANTOS, 2012).

Organização do texto

A dissertação está organizada da seguinte forma: No Capítulo 1 são apresentados os conceitos básicos relacionados às redes acústicas submarinas, tais como as características das redes e da comunicação submarina. No Capítulo 2 discutimos as características do canal acústico e a influência da velocidade de propagação do som na água, da atenuação, do ruído, da interferência multicaminhos, da largura de banda e da potência de transmissão na transmissão acústica. O Capítulo 3 descreve o funcionamento dos principais protocolos de controle de acesso ao meio e de roteamento em redes acústicas submarinas. No Capítulo 4 apresentamos os requisitos básicos para a viabilidade das redes acústicas, ou seja, as condições mínimas que determinada rede deve atender para que a comunicação acústica seja viável. No Capítulo 5 avaliamos o desempenho e a viabilidade das topologias linha, quadro e cubo utilizando os protocolos de acesso ao meio Broadcast-MAC e R-MAC e o protocolo de roteamento VBF. Analisamos os parâmetros atraso total, consumo de energia, eficiência do canal e vazão para as três topologias propostas. No Capítulo 6 concluímos o trabalho e apresentamos propostas para trabalhos futuros.

1 CONCEITOS BÁSICOS

Este capítulo aborda conceitos básicos relacionados às redes acústicas submarinas no que diz respeito às suas principais características e ao tipo de transmissão que viabiliza a transmissão acústica.

1.1 Características das Redes Submarinas

De acordo com alguns autores tais como (ALKILDIZ, 2005) e (HEIDEMANN, 2006) as redes acústicas submarinas podem ser descritas através de diversos critérios sendo os mais comuns:

Mobilidade. Uma rede acústica submarina pode ser composta exclusivamente por nós fixos, móveis, ou por uma composição de dos dois tipos. Devido às características e as limitações da comunicação acústica, as redes com nós fixos são mais fáceis de serem implementadas. Apesar disso a mobilidade e a flexibilidade proporcionada pelos nós móveis são cada vez mais atrativas no desenvolvimento de aplicações. Um exemplo é o desenvolvimento de AUVs (*Autonomous Underwater Vehicles*), utilizados em uma rede como nós móveis para a coleta de informações e resgate de dados em nós fixos;

Arquitetura. Em relação à arquitetura a rede acústica pode ser classificada em centralizada ou distribuída. A arquitetura centralizada caracteriza-se pela presença da hierarquia entre os nós da rede. Existe um nó concentrador ou sorvedouro para onde os nós sensores encaminham seus dados e de onde recebem comandos de controle. O nó concentrador realiza a comunicação com a estação terrestre, encaminhando os dados e recebendo comandos de configuração da rede. A arquitetura distribuída pode ser empregada em redes acústicas com nós móveis entre os quais não há hierarquia. Os nós móveis podem navegar independentemente com o auxílio de referências acústicas submersas, coletando dados de forma colaborativa;

Distribuição espacial. As redes acústicas são classificadas em 2D, quando todos os nós são fixos no leito oceânico ou 3D, quando os nós ficam submersos, flutuando em diferentes profundidades, atados ao fundo do mar por cabos com diferentes comprimentos;

Operação. Classificada em contínua, quando os nós da rede estão constantemente em comunicação ou intermitente, quando os nós alternam curtos períodos de operação com

longos períodos de hibernação com o objetivo de economizar energia. As redes com operação intermitente aplicam-se adequadamente ao levantamento de dados de longa duração, que toleram amostragens lentas;

Canal de comunicação. A utilização do canal é classificada em comum ou clusterizada. Na utilização comum o canal é compartilhado por todos os nós da rede ao mesmo tempo, sendo necessário um protocolo de controle de acesso ao meio para organizar a utilização do canal. No modelo clusterizado a rede é organizada em clusters, dentro dos quais o nós se submetem a um controle interno de acesso ao meio, conforme descrito em (DOUKKALI, 2005) e (MA, 2009). A clusterização permite o reaproveitamento do canal de comunicação em células distantes que não apresentem interferência mútua.

1.2 Comunicação Submarina

Atualmente a utilização de cabos de fibra ótica submarinos para a comunicação entre nós fixos de uma rede submarina é amplamente difundida. Apesar disso as redes cabeadas só podem ser utilizadas em aplicações específicas e restritas que apresentam uma topologia com nós fixos, onde não se prevê mudanças ao longo do tempo.

A necessidade de informações mais confiáveis sobre as características oceanográficas, necessárias para o melhor gerenciamento, controle e monitoramento das atividades de exploração e proteção oceanográfica passaram, nos últimos anos, a demandar novas soluções de comunicação submarina.

A transmissão acústica aparece como uma solução viável para a comunicação submarina sem fio proporcionando dinamismo, mobilidade e contornando as limitações das comunicações subaquáticas. Estas características atendem as necessidades demandadas pelas potenciais aplicações submarinas.

A comunicação submarina sem fio pode ser realizada através de transmissões eletromagnéticas, ópticas e acústicas. As transmissões eletromagnéticas e ópticas apresentam limitações extremas que tornam a utilização quase que inviável ou limitada a aplicações muito específicas e de curto alcance. As características destes três tipos de transmissão são apresentadas a seguir:

Transmissão Eletromagnética. A transmissão eletromagnética na água sofre uma grande atenuação causada pela absorção do meio. A atenuação é diretamente proporcional à

frequência o que limita a transmissão eletromagnética. Para a transmissão em baixas frequências seriam necessárias grandes antenas e uma potência de transmissão elevada o que inviabiliza a utilização da transmissão eletromagnética em redes sem fio submarinas;

Transmissão Ótica. As transmissões óticas na água do mar se propagam somente a curtas distâncias devido à absorção e ao espalhamento. A luz é absorvida pela água e as partículas em suspensão geram um grande espalhamento, dificultando a comunicação e limitando sua aplicação a distâncias muito pequenas. Essa distância pode variar de alguns centímetros a alguns metros dependendo do nível de turbidez da água. Quanto mais turbida menor a distância que se consegue alcançar. Além disso, é necessário garantir um alinhamento estável, que é difícil devido à dinâmica do ambiente marinho, entre o transmissor e o receptor para que a comunicação seja eficiente;

Transmissão Acústica. A transmissão acústica é a que apresenta as menores limitações tornando-se viável a sua utilização em redes submarinas. Entretanto o canal acústico também possui limitações tais como baixa velocidade de propagação, alta atenuação, ruído, interferência, largura de banda limitada e potência de transmissão.

No Capítulo 2 serão apresentadas as principais características do canal acústico segundo (AKYILDIZ, 2005).

2 CANAL ACÚSTICO SUBMARINO

Segundo (AKYILDIZ, 2005), o canal acústico submarino é diferente em relação aos meios de transmissão terrestres em vários aspectos, apresentando características específicas no que diz respeito à velocidade de propagação do som na água, à atenuação, ao ruído, à interferência multicaminhos, à largura de banda e à potência de transmissão.

Os simuladores e as análises realizadas em redes acústicas submarinas devem levar em consideração todas estas características do canal acústico submarino para que os resultados dos estudos apresentem o máximo de fidelidade.

2.1 Velocidade de Propagação do Som na Água

O som se propaga mecanicamente e consiste na alternância regular de pressão em um meio, ou seja, uma sucessão de compressões e rarefações que se propagam como uma onda. Na água o som é transmitido de forma muito mais eficiente do que em qualquer outro meio.

A velocidade de propagação do som na água é de aproximadamente 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 (0,67 s/km ou 1 segundo a cada 1500 metros). Esse é um dos maiores problemas do canal acústico, que gera implicações nos processos de localização e sincronização dos nós na rede.

A velocidade de propagação do som na água é variável, dependendo da profundidade, da temperatura e da salinidade, sendo que a temperatura e a salinidade também dependem da profundidade. Esta última é habitualmente medida em partes por mil (ppm). A velocidade do som aumenta com a temperatura cerca de 4 m/s por cada grau, com a salinidade cerca de 1 m/s por cada unidade ppm e com a profundidade 1,7 m/s a cada 100 metros. Os fatores que mais influenciam a velocidade do som na água são a temperatura e a profundidade. Nos primeiros 1000 metros de profundidade a temperatura, de modo geral, decresce tornando-se a partir daí praticamente constante. A profundidade irá influenciar a todo o momento já que ocorrem variações na velocidade a cada 100 metros. Os gráficos da Figura 1 mostram a variação da temperatura, salinidade e velocidade do som em relação à profundidade dos oceanos.

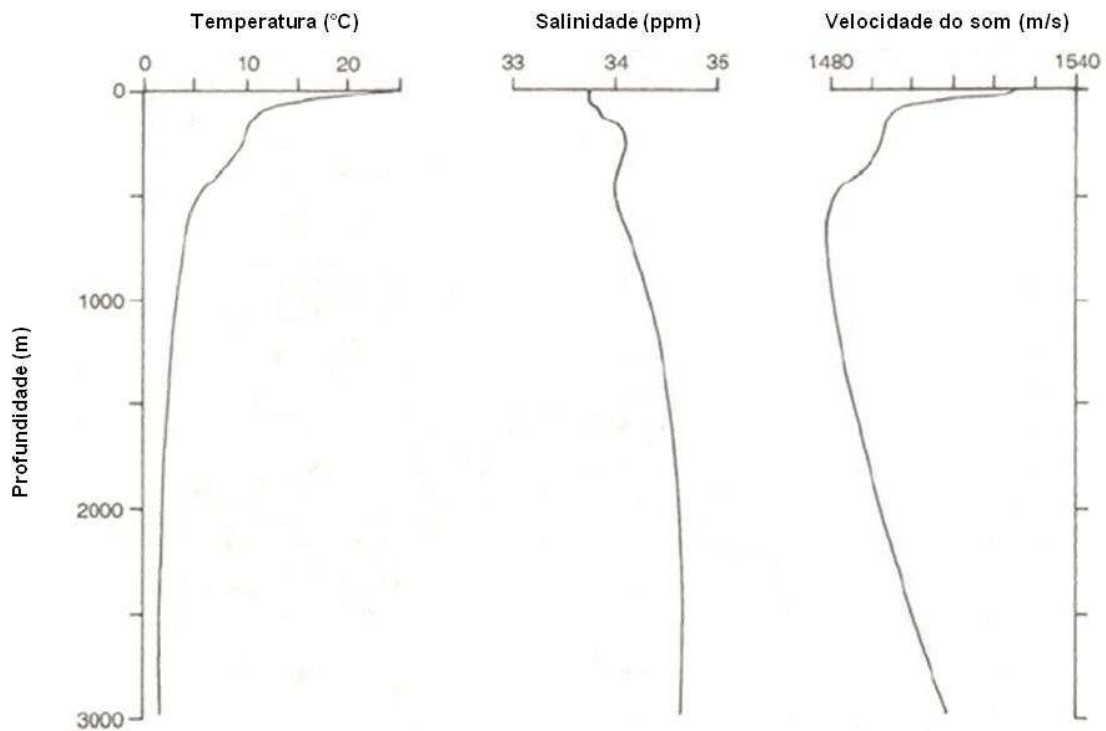


Figura 1 - Temperatura, salinidade e velocidade do som em relação à profundidade, adaptada de (URICK, 1983).

Existem cinco zonas nas quais a mudança de temperatura nos oceanos pode ser considerada linear em relação à profundidade, segundo (HARRIS, 2007). Nestas zonas, a equação da velocidade do som na água do mar descrita em (WILSON, 1960) é dada por:

$$c = 1449,05 + 45,7t - 5,21t^2 + 0,23 t^3 + (1,333 - 0,126t + 0,009 t^2).(S-35) + 16,3z + 0,18z^2 \quad (2.1)$$

onde c é a velocidade em m/s, t a temperatura da água em graus Celsius (varia de 2 a 22 graus Celsius), z a profundidade em metros e S a salinidade, em partes por mil (varia de 32 a 37, sendo 35 um valor típico).

2.2 Atenuação e Ruído

A atenuação total no canal acústico é calculada com base na perda por espalhamento proposta em (URIK, 1983) e pela aproximação de Thorp (BREKHOVSKIKH, 1991) para perdas por absorção. Para calcular a relação sinal ruído (SNR) no receptor e a faixa de

interferência devem ser considerados a atenuação total do sinal acústico na água e o ruído ambiente. A aproximação de Thorp utilizada para o cálculo da perda por absorção a uma determinada frequência é dada pela seguinte equação:

$$10 \log a(f) = \begin{cases} 0.11 \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \frac{f^2}{4100+f} + 2.75 \cdot 10^{-4} f^2 + 0.003, & f \geq 0.4 \\ 0.002 + 0.11 \left(\frac{f}{1+f} \right) + 0.011f, & f < 0.4, \end{cases} \quad (2.2)$$

onde $a(f)$ é dado em dB/Km e f em kHz para comunicações submarinas. A aproximação de Thorp para perdas por absorção divide as frequências em dois grupos, as menores que 400 kHz e as maiores que 400 kHz. A unidade típica para a medida da potência do sinal em comunicações acústicas é dB re μ Pa.

De acordo com (URICK, 1983) combinando os efeitos de absorção e as perdas por espalhamento, a atenuação total é a seguinte:

$$10 \log A(l, f) = k \cdot 10 \log l + l \cdot 10 \log a(f) \quad (2.3)$$

onde $A(l, f)$ é a atenuação em função da distância l e da frequência f , k é o coeficiente de espalhamento que define a geometria da propagação e $10 \log a(f)$ é a perda por absorção. O primeiro termo da equação representa a perda por espalhamento e o segundo termo a perda por absorção. Segundo URICK, o valor de k varia entre 1 e 2. Para $k=1$ o espalhamento é cilíndrico, para $k=2$ o espalhamento é esférico e $k=1,5$ é o valor adotado em termos práticos.

Adicionalmente o desvanecimento do sinal é afetado pela orientação, horizontal ou vertical, do enlace no canal acústico.

O ruído no canal acústico submarino é calculado através de quatro componentes principais: a turbulência da água, o ruído de embarcações, o vento e o ruído térmico. A densidade espectral de potência de cada um desses componentes do ruído em dB re μ Pa em função da frequência em kHz é dada por:

$$10 \log N_t(f) = 17 - 30 \log f \quad (2.4)$$

$$10 \log N_s(f) = 40 + 20 \left(s - \frac{1}{2} \right) + 26 \log f - 60 \log(f + 0,03) \quad (2.5)$$

$$10 \log N_w(f) = 50 + 7,5w^{1/2} + 20 \log f - 40 \log(f + 0,4) \quad (2.6)$$

$$10 \log N_{th}(f) = -15 + 20 \log f \quad (2.7)$$

O ruído total $N(f)$ será a soma destas quatro componentes representados pela equação:

$$N(f) = N_t(f) + N_s(f) + N_w(f) + N_{th}(f) \quad (2.8)$$

onde N_t é a componente da turbulência da água, N_s é a componente do ruído de embarcações, N_w é a componente do ruído gerado pelo vento e N_{th} é a componente do ruído térmico.

Cada uma das componentes influencia o ruído total de forma diferente em diferentes frequências. Por exemplo, para uma distância maior que 10 metros entre o transmissor e o receptor, onde a transmissão é realizada com uma frequência de aproximadamente 100 kHz, as componentes turbulências da água e a componente ruído de embarcações terão uma pequena influência sobre o sinal. Já o ruído gerado pelo vento e o ruído térmico influenciam significativamente.

Os valores encontrados para a atenuação e para o ruído são utilizados para calcular a relação sinal ruído (SNR) no receptor. A SNR é dada pela seguinte equação

$$SNR = \frac{P_T}{A(l, f)N(f)} \quad (2.9)$$

onde, P_T é o valor dado para a potência de transmissão, $A(l, f)$ é a atenuação total e $N(f)$ é o ruído total.

A composição dos efeitos da atenuação, provocados pelo espalhamento e pela absorção, Equação 2.3, mais o ruído, Equação 2.8, determina as curvas da relação sinal ruído (S/N) versus a frequência em relação à distância entre transmissor e receptor conforme mostrado na Figura 2, adaptada de (STOJANOVIC, 1999).

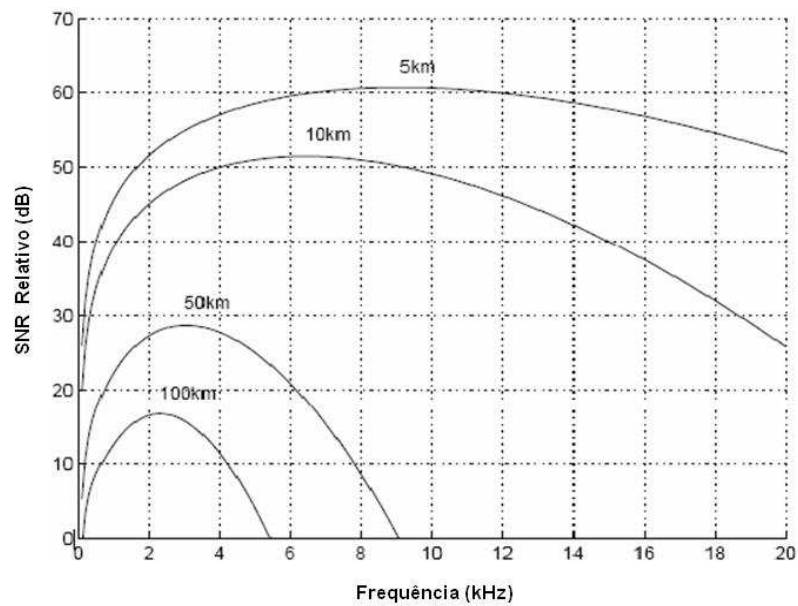


Figura 2 - SNR (dB) x frequência em relação à distância entre o transmissor e o receptor, adaptada de (STOJANOVIC, 1999).

Da análise das curvas concluímos o seguinte: a frequência de transmissão ideal para uma determinada transmissão submarina irá depender da distância entre o transmissor e o receptor. A banda disponível é inversamente proporcional à distância.

A banda disponível no canal acústico possui a característica singular de variar a sua faixa de frequências em função da distância.

2.3 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 no mar pode se propagar em trajetórias curvilíneas e, em alguns casos, 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.

Em águas rasas ocorre o fenômeno da reverberação causado por múltiplas reflexões do sinal transmitido no fundo e na superfície do oceano. A reverberação também causa a interferência intersímbolos já que os sinais oriundos da mesma fonte chegam ao receptor com trajetórias distintas e em diferentes intervalos de tempo.

2.4 Largura de Banda

A largura de banda é extremamente limitada e varia em relação à distância e à frequência, conforme mostrado na Tabela 1, adaptada de (AKYILDIZ, 2006). Um sistema de curto alcance, operando a uma distância de algumas dezenas de metros entre o transmissor e o receptor terá uma largura de banda disponível de centenas de kHz. Um sistema de médio alcance operando a uma distância de alguns quilômetros entre o transmissor e o receptor terá uma largura de banda disponível de dezenas de kHz. Consequentemente um sistema longo operando a uma distância de alguns quilômetros entre o transmissor e o receptor terá uma largura de banda disponível de alguns kHz.

Tabela 1 - Banda x distância transmissor receptor, adaptada de (AKYILDIZ, 2006).

| 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 |

Segundo (VIEIRA, 2010), devido à limitação de banda, a maioria dos equipamentos de transmissão acústica opera em uma faixa de frequência de aproximadamente 30 kHz. Como a banda é estreita a taxa de transmissão de dados chega somente a dezenas de kbps.

2.5 Potência de Transmissão

As potências envolvidas nas transmissões acústicas são muito maiores do que as potências 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.

Em acústica submarina emprega-se o decibel (dB), que é uma medida de comparação entre grandezas como intensidade e energia. A equação da intensidade da potência acústica é dada por:

$$N_{\text{dB}} = 10 \log \left(\frac{I_1}{I_0} \right) \quad (2.10)$$

onde, I_0 é a intensidade de referência para a transmissão acústica submarina e vale $6,51 \times 10^{-19} \text{ W/m}^2$, com pressão de referência de $1 \mu\text{Pa}^2$. A intensidade de referência para notação em dB vem acompanhada da informação da distância em que essa intensidade foi medida.

A Figura 3, adaptada de (HARRIS, 2007), apresenta o gráfico da potência de transmissão acústica versus o alcance considerando uma relação sinal ruído de 20 dB no receptor.

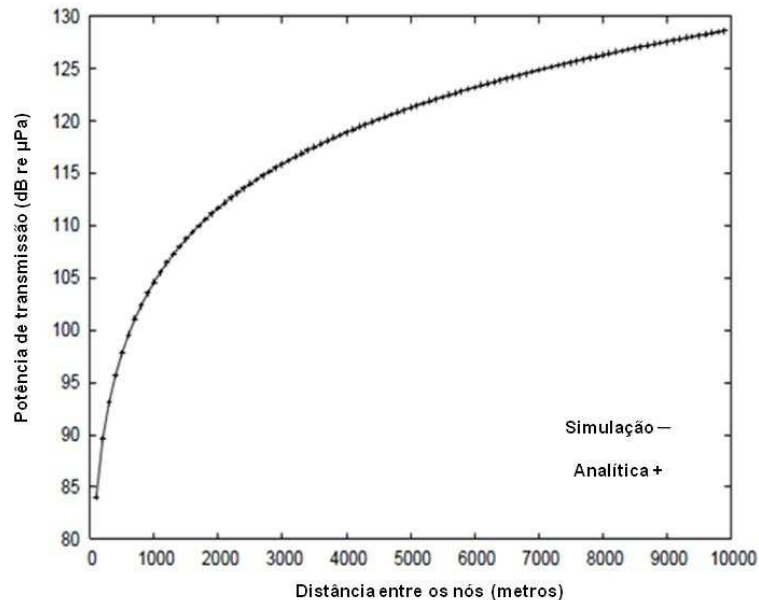


Figura 3 - Potência de transmissão x distância entre os nós com SNR de 20 dB no receptor, adaptada de (HARRIS, 2007).

3 CAMADAS FÍSICA, ENLACE E REDE

Os protocolos utilizados nas redes acústicas submarinas devem ser robustos o suficiente para suportar os elevados níveis de interferência, a limitação na largura de banda e o ruído no meio. Nos tópicos abaixo discutimos a modulação na camada física e os protocolos de acesso ao meio e de rede que podem viabilizar a operação de redes acústicas submarinas.

3.1 Camada Física

Em (KILFOYLE, 2000) é realizada uma revisão minuciosa a respeito da evolução das técnicas de modulação para transmissões acústicas submarinas nas décadas de 80 e 90. O estudo relata experiências e apresenta dados referentes aos alcances e taxas de transmissão obtidas com diversos tipos de modulação: FSK (*Frequency Shift Keying*), DPSK (*Differential Phase Shift Keying*), BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), 8PSK (*Phase Shift Keying*, com constelação de 8 símbolos), 8QAM e 16QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*, com constelação de 8 e 16 símbolos, respectivamente). O artigo aborda o aumento das taxas de transmissão nessa evolução e resume a relação “distância x taxa de dados” conforme mostrado no gráfico da Figura 4, adaptado de (KILFOYLE, 2000).

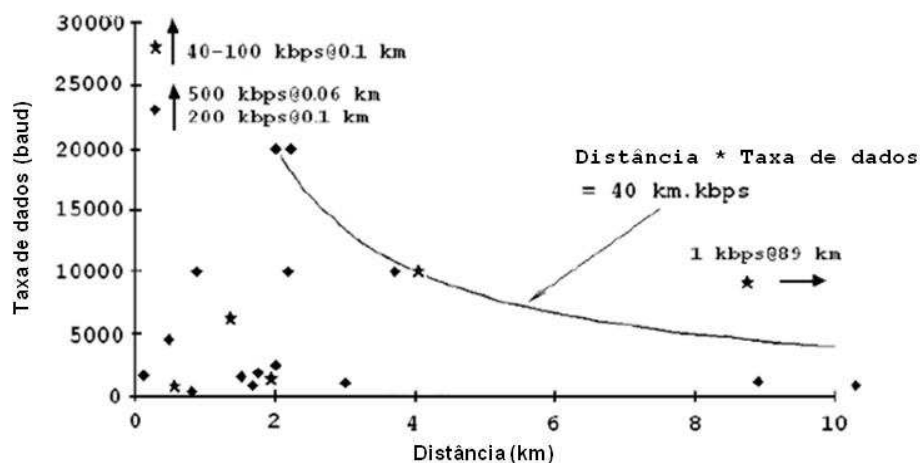


Figura 4 - Alcances e taxas de transmissão de modems comerciais e experimentais, adaptada de (KILFOYLE, 2000).

Na Figura 4, alguns dados são referentes a modems experimentais (representados por estrelas) e outros referentes a modems comerciais (representados por losangos). As maiores taxas e distâncias indicadas são de experiências realizadas em canais verticais em águas profundas. Na prática, o que se conclui analisando-se o gráfico é que a relação “alcance x taxa de transmissão” para transmissões acústicas submarinas é extremamente limitada, se comparada às transmissões eletromagnéticas terrestres. Os dados analisados em (KILFOYE, 2000) são das décadas de 80 e 90, mas de lá para cá as taxas de transmissão (link acústico) dos modems acústicos comerciais continuaram limitadas, tipicamente menores que 10 kbps para distâncias acima de 5000 metros entre os nós.

O BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) e o OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) são os esquemas de modulação mais recomendados, em (VIEIRA, 2010) e (AKYILDIZ, 2006) respectivamente para a transmissão através do canal acústico. O BPSK apresenta uma imunidade maior à interferência intersímbolos e cada bit é representado por um símbolo, ou seja, para uma frequência de transmissão de 10 kHz, teremos uma taxa de transmissão de 10 kbps. O OFDM é baseado na multiplexação por divisão de frequências e a cada nó é associada uma frequência para transmissão. Além disso, esse protocolo também implementa codificação de canal para a correção de erro. O OFDM é uma técnica de transmissão que divide o espectro em múltiplas sub-bandas (canais) de frequências bem estreitas, enviando alguns dos bits em cada sub-banda.

3.2 Protocolos de Controle de Acesso ao Meio

Neste subitem apresentamos os principais protocolos de controle de acesso para redes acústicas submarinas, alguns deles comparados em (DOUKKALI, 2005). Determinados protocolos sofreram modificações com objetivo de otimizar a operação e reduzir os efeitos do meio acústico na comunicação (YEO, 2001).

O mais simples dos protocolos é o ALOHA apresentado em (SOZER, 2000) e (PROAKIS, 2001) que se baseia na transmissão assim que o meio estiver disponível. No ALOHA quando um nó tem quadros para enviar, envia diretamente sem escutar o canal. A partir daí o transmissor inicia um temporizador e aguarda a resposta do receptor. Se o receptor recebe o pacote corretamente ele envia um ACK para o transmissor. Se o transmissor recebe o ACK do pacote enviado antes do término do temporizador a entrega é confirmada e é iniciada a transmissão do próximo pacote, caso contrário o pacote será reenviado.

O *Slotted ALOHA* é um aperfeiçoamento do ALOHA que consiste na introdução de *slots* de tempo para disciplinar as transmissões. Com essa adaptação conseguiu-se uma redução significativa das colisões e um aumento significativo na vazão.

O protocolo MACA (*Multiple Access with Collision Avoidance*) (KARN, 1990), (SOZER, 2000) e (PROAKIS, 2001), utiliza quadros de sinalização RTS (*Request to Send*) e CTS (*Clear to Send*) para minimizar o problema do terminal escondido. Quando um nó A deseja enviar um quadro ao nó B, inicia o protocolo com o envio de um RTS ao nó B. O RTS é um quadro curto que contém o comprimento (duração) do quadro de dados que eventualmente será enviado em seguida. O nó B, ao receber o RTS, responde com um CTS. O CTS também contém o comprimento (duração) do quadro de dados a ser enviado. O nó A ao receber o CTS inicia a transmissão dos dados. Ao escutarem o RTS, todos os nós que se encontram no alcance do nó A irão adiar as suas transmissões pelo tempo necessário para o recebimento do CTS. Já os nós vizinhos de B ao escutarem o CTS devem adiar suas transmissões até o fim da transmissão do quadro de dados. Portanto, o meio é reservado para a transmissão do quadro de dados, evitando colisões.

O MACAW (*MACA for Wireless*), proposto em (BHARGHAVAN, 1994), é um aprimoramento do protocolo MACA com a transmissão de um quadro ACK (*Acknowledgement*) após cada recepção bem sucedida, o que possibilita à origem retransmitir pacotes que não tenham sido corretamente recebidos pelo destino antes do estouro de temporizadores de maior ordem de grandeza de camadas superiores. A não recepção de CTS em resposta a um RTS leva o requisitante a repetir o RTS por um número de vezes pré-determinado, após o que, sem sucesso, desiste da comunicação. Esse esquema é inconveniente, pois desperdiça energia quando o nó destino, apesar de ativo, estiver temporariamente impossibilitado de responder. Para contornar esse problema em (DOUKKALI, 2005) é proposto o acréscimo de um pacote de WAIT a ser usado pelo destino quando estiver temporariamente impossibilitado de atender a um RTS.

O protocolo FAMA (*Floor Acquisition Multiple Access*) (FULLMER, 1995) estende a duração dos pacotes de RTS e CTS para além do tempo máximo de propagação da rede para prevenir suas colisões com pacotes de dados. A ausência de colisões é garantida se a duração do RTS for maior que o maior atraso de propagação e se a duração do CTS for maior que a duração do RTS, mais duas vezes o maior atraso de propagação mais o atraso na comutação do *hardware* entre TX e RX (MOLINS, 2006). Embora esse esquema garanta ausência de

colisões, no caso das redes acústicas submarinas causam um grande desperdício de energia devido aos elevados atrasos de propagação.

O *Slotted FAMA* proposto por (MOLINS, 2006) faz uma adaptação ao FAMA original para melhorar a desempenho do protocolo em redes acústicas submarinas. Neste caso são acrescentados *slots* de tempo com o objetivo limitar o impacto dos longos atrasos de propagação do canal acústico. As transmissões só ocorrem dentro desses *slots* de tempo, caso o canal esteja livre. Ao enviar um RTS sem receber o respectivo CTS no *slot* de tempo seguinte, o emissor assume que houve uma colisão e emite novamente um RTS após um período aleatório de *backoff*.

O UW-MAC proposto em (POMPILI, 2007) é um protocolo desenvolvido exclusivamente para redes acústicas submarinas que usa como método de acesso o CDMA (XIE, 2000) em portadora única. No UW-MAC o transmissor utiliza um algoritmo de controle para adequar a potência visando minimizar o efeito perto-longe (*near-far*). Esse problema ocorre quando um nó se comunica com outros dois nós, sendo um próximo e o outro distante. A comunicação com o nó distante ficará prejudicada na presença da comunicação com o nó próximo (supondo todos os nós com as mesmas potências de transmissão). O UW-MAC proporciona baixa retransmissão de pacotes e, conseqüentemente, aumento da eficiência energética e autonomia de operação.

O UWAN-MAC (*Underwater Acoustic Network MAC*) apresentado em (PARK, 2007) é um protocolo MAC baseado em CSMA que visa à eficiência no uso de energia. O protocolo poupa energia baseado em um esquema de longos períodos de hibernação e curtos períodos de atividade. Ao despertar, cada nó divulga o tempo em que permanecerá hibernando até o próximo despertar. Cada nó que deseje se comunicar com ele pode, então, programar seu despertar para coincidir com o dele e estabelecer a comunicação.

O T-Lohi apresentado em (SYED, 2008) também é um protocolo baseado em contenção, no qual os nós disputam o meio para transmissão de seus dados. Neste protocolo a energia pode ser poupada através de duas formas: na alocação do canal para evitar colisões no campo de dados ou no uso de receptor de baixo consumo para identificar o tom de despertar. Os nós passam a maior parte do tempo em repouso, apenas ouvindo o meio com um receptor de baixo consumo. A alocação do canal é obtida durante um *Período de Reserva* (PR) composto por *Períodos de Disputa* pelo meio (PD), tantos quantos necessários para eleger o transmissor da vez. Durante os PDs os nós enviam curtos tons de disputa pelo meio. A não

recepção de outros tons de disputa até o final do PD em curso indica que o nó ganhou o meio, pode encerrar o PR e iniciar sua transmissão. Se no PD houver tons de disputa de outros candidatos, todos os nós desistem da transmissão e executam individualmente um procedimento de *backoff* aleatório baseado no número de candidatos à transmissão naquele momento (contados pelo número de tons recebidos) e tentam novamente no PD adiante, indicado pelo procedimento automático de *backoff*. O nó que ganha o canal emite um tom de despertar e todos os nós despertam para verificar, pelo preâmbulo, se o quadro no meio é a ele destinado, processando-o se for o caso, ou voltando ao estado de repouso, caso contrário. Ao nó que ganhou o meio e que acabou de transmitir seus dados é suprimida temporariamente a chance de nova transmissão, visando tornar o protocolo mais justo.

O Broadcast MAC (HARRIS, 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 executa um algoritmo de *backoff* antes de realizar a próxima tentativa de transmissão. Os quadros serão descartados se o número de *backoffs* 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 roteamento tais como o VBF (*Vector Based Forwarding*) (XIE, 2006).

O protocolo R-MAC (*Reservation Based MAC*) proposto para redes acústicas submarinas em (XIE, 2007) visa a economia de energia, extremamente necessária para as redes de sensores submarinos. 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.

Em nossas análises comparamos os protocolos Broadcast-MAC e R-MAC em relação ao consumo total de energia e o atraso total na rede. Optamos por estes dois protocolos devido as diferenças de operação entre eles. O primeiro é um protocolo simples que implementa um algoritmo de backoff para regular a escuta do canal, não conserva energia e apresenta um baixo atraso. O segundo é um protocolo confiável baseado em reserva de canal desenvolvido especificamente para redes acústicas submarinas que conserva energia, porém com maior atraso.

A escolha de protocolos tão distintos para a realização das simulações e análises teve como objetivo mostrar que a definição do protocolo mais apropriado irá depender do tipo de aplicação que se deseja implementar independente da complexidade de cada um. Uma determinada aplicação de controle de veículos submarinos, por exemplo, demanda um protocolo de controle de acesso ao meio mais simples como o Broadcast-MAC devido à baixa

tolerância ao atraso, característica que não será atendida pelo protocolo R-MAC. Além disso estes foram os protocolos, dentre os disponíveis nos simulador Aqua-Sim que melhor atenderam às necessidades do nosso estudo.

No Capítulo 5 analisamos os resultados das simulações e discutimos detalhadamente o comportamento dos protocolos Broadcast-MAC e R-MAC considerando três topologias diferentes.

3.3 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 à sua profundidade são os mais indicados para redes de sensores submarinos. 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, 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 bóia na superfície, estabelece a referência geográfica da rede através de GPS.

O protocolo VBF (XIE, 2006) opera de forma escalável, 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 pré definido 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 REQUISITOS BÁSICOS PARA VIABILIDADE DAS APLICAÇÕES

Devido às limitações do canal acústico, alguns requisitos devem ser observados na implementação de aplicações baseadas em redes de sensores submarinos 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 banda de 7,5 a 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 banda de operação de 26,77 a 44,62 kHz e uma distância de 350 metros;

- modems 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, 2005) foi desenvolvido especificamente para estudo e simulações das redes acústicas submarinas. Em paralelo, empresas como a Link-quest (LINKQUEST, 2012) e a Benthos Teledyne (BENTHOS, 2012) 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 | 4000 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*.

- 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 ADCP.

| 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.

5 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO ATRAVÉS DE 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 aplicação.

Para a realização das simulações foi utilizado o simulador Aqua-Sim (XIE, 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 (NS-2, 2011). As características funcionais do Aqua-Sim são detalhadas no ANEXO I.

Neste estudo são utilizadas as topologias linha, quadro e cubo, propostas como topologias básicas para as redes acústicas submarinas, conforme mostrado na Figura 5. 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.

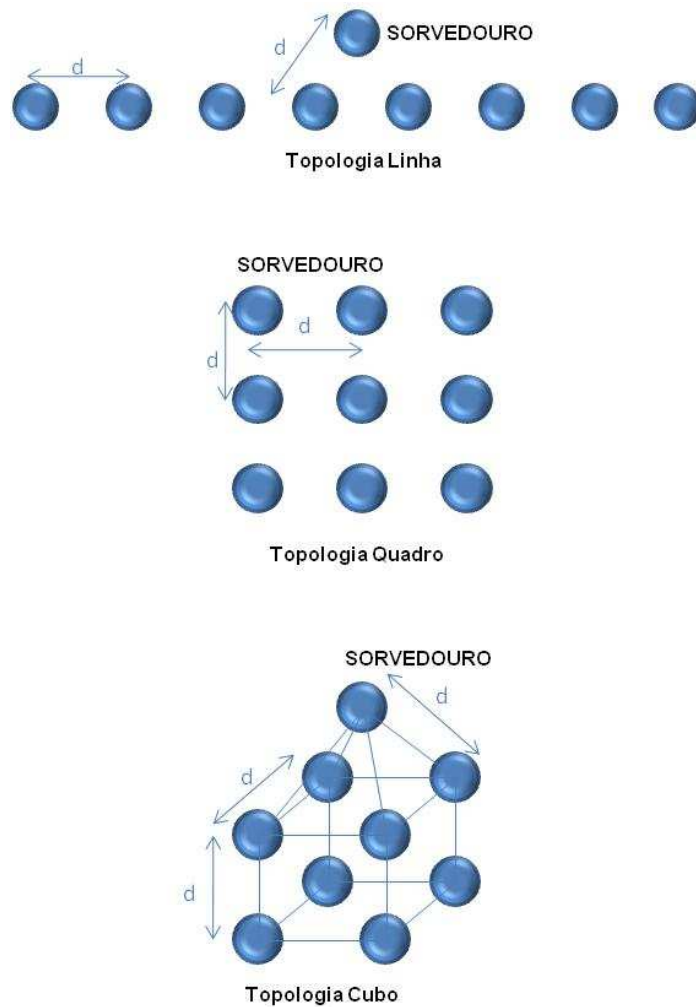


Figura 5 - Topologias básicas para redes acústicas submarinas.

As análises se basearam em simulações realizadas nas três topologias propostas. Para o roteamento foi utilizado o protocolo VBF e para o controle de acesso ao meio foram avaliados os protocolos Broadcast MAC e R-MAC todos implementados pelo simulador Aqua-Sim. Os sensores foram configurados para transmitir pacotes de 1000 bytes considerados suficientes para a transmissão das informações coletadas em diversas aplicações, de acordo com o apresentado na Tabela 3. 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.

Em todas as simulações 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. 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, considerando um nível de significância de 0,05.

Para cada uma das topologias propostas foram elaborados códigos em linguagem tcl padrão para o Aqua-Sim, levando em consideração as variáveis descritas acima. O código tcl foi parametrizado para fornecer o atraso total na rede, o consumo total de energia na rede, a quantidade total de pacotes transmitida por cada um dos nós e a quantidade total de pacotes recebida pelo nó sorvedouro como dados de saída. A partir da consolidação destes dados elaboramos os gráficos e realizamos as análises apresentadas nas Seções 5.1, 5.2 e 5.3.

5.1 Atraso total na rede

Os gráficos das Figuras 6, 7 e 8 mostram o atraso total médio em relação ao aumento da taxa de aplicação, ou seja a quantidade de informação em bits por segundo gerada pela 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 Broadcast e R-MAC em cada uma das figuras.

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 na Figura 7. Neste caso, o atraso total da rede utilizando o protocolo R-MAC a uma taxa de 0,00166 pps é de aproximadamente 100 segundos e a uma taxa de 0,05 pps é de aproximadamente 1300 segundos. Observamos que para as mesmas taxas utilizando o Broadcast MAC 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.

Todas as topologias apresentam um perfil de atraso total semelhante na implementação com Broadcast-MAC. O atraso total máximo se compreende no intervalo de 0 a 200 segundos para as taxas de aplicação variando de 0,00166 a 0,05 pps. Já na implementação com o R-MAC foi verificado que a partir de uma taxa de aplicação de 0,0083

pps, onde o atraso total varia em torno de 200 segundos para todas as topologias, a topologia quadro passa a apresentar um perfil de atraso maior que as demais chegando a ser 73% maior em relação à topologia linha e 100% maior em relação à topologia cubo a uma taxa de aplicação de 0,05 pps.

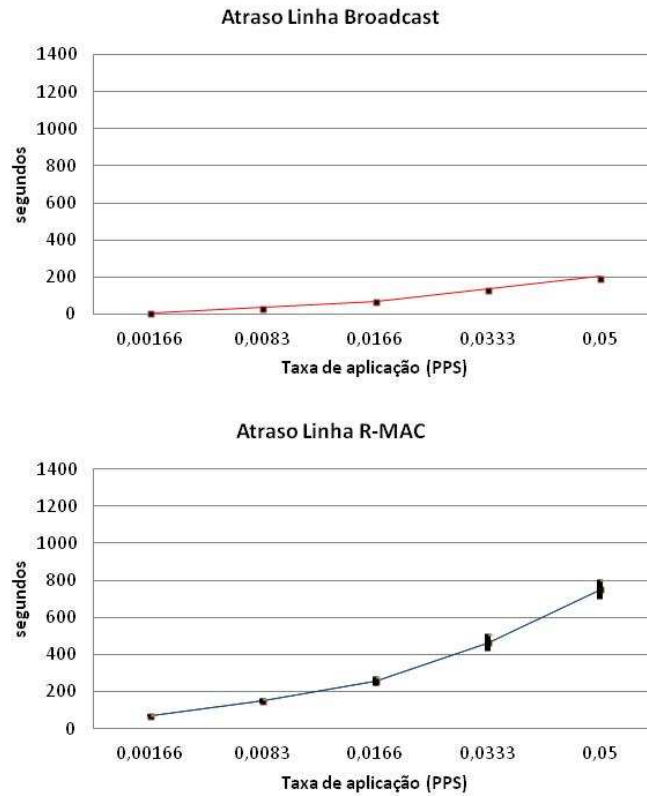


Figura 6 - Atraso Linha.

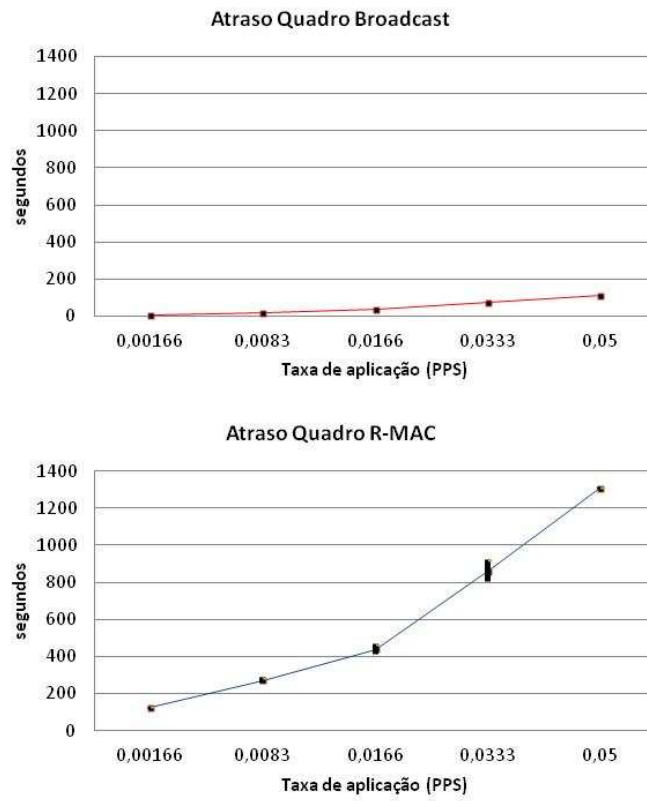


Figura 7 - Atraso Quadro.

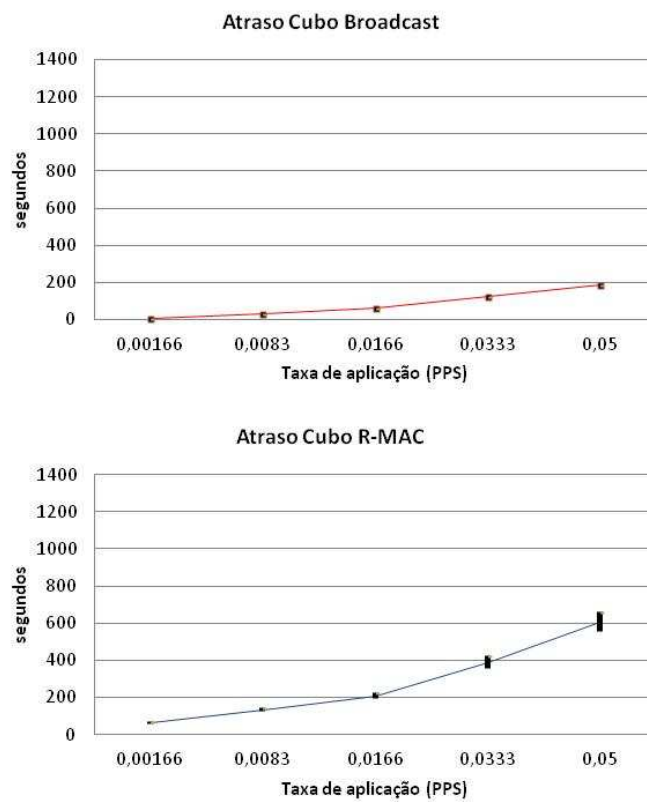


Figura 8 - Atraso Cubo.

5.2 Consumo de energia na rede

Nos gráficos das Figuras 9, 10 e 11 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 propostas para taxas de aplicação acima de 0,0166 pps verificamos que a topologia quadro apresenta um perfil de consumo um pouco mais elevado do que as outras duas topologias que apresentam perfis semelhantes. Na implementação com o Broadcast-MAC a topologia quadro apresenta um consumo de energia 30% maior do que a topologia linha e 12% maior do que a topologia cubo. Na implementação com R-MAC a variação é menor, sendo 20% maior em relação à topologia linha e 10% maior em relação à topologia cubo.

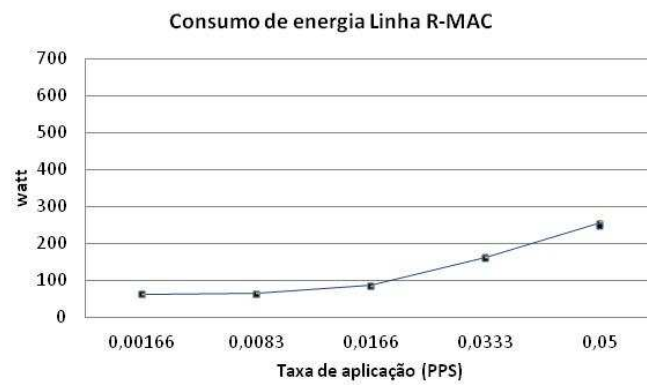
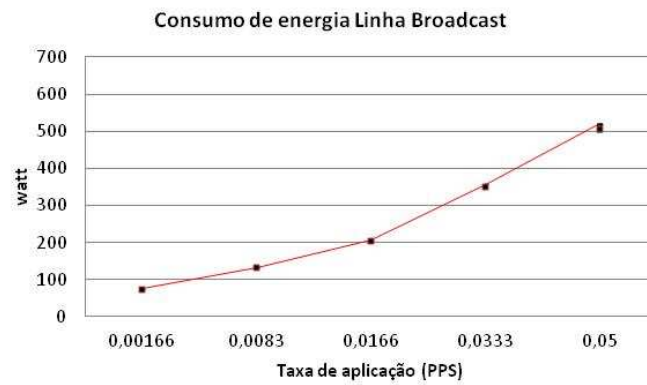


Figura 9 - Consumo de energia Linha.

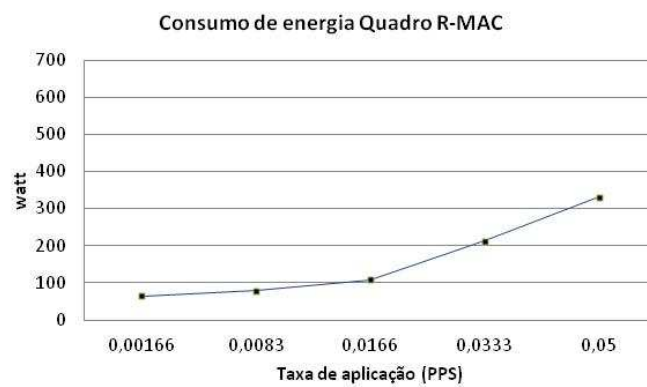
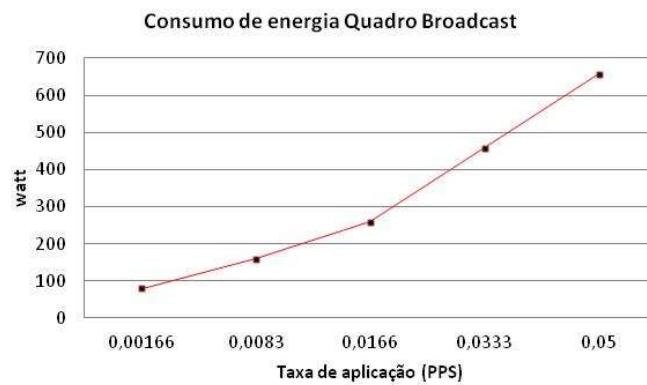


Figura 10 - Consumo de energia Quadro.

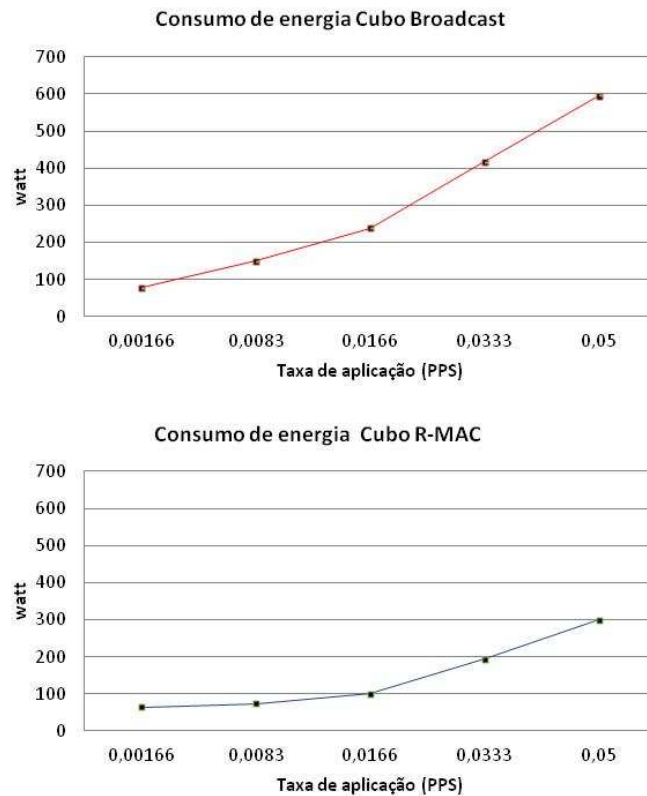


Figura 11 - Consumo de energia Cubo.

Também foi observado que o consumo de energia não sofre alterações significativas para uma taxa de aplicação de até 0,00166 pps, independente do protocolo de acesso ao meio utilizado. Para a taxa de 0,00166 pps, o consumo de energia varia somente entre 50 e 100 watts. Concluímos que para baixas taxas de aplicação o tipo de topologia e os protocolos de acesso ao meio não tem grande influência, já para taxas maiores o crescimento é exponencial.

5.3 Eficiência do canal acústico

Outra métrica avaliada foi a eficiência do canal η (POMPILI, 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 (no caso do R-MAC) sejam corretamente recebidos e L_p^d o tamanho do campo de dados de um quadro.

A Figura 12 mostra a eficiência do canal para cada uma das topologias em relação aos protocolos Broadcast-MAC e R-MAC. A análise da eficiência do canal considera que 100%

dos pacotes transmitidos foram recebidos pelo nó sorvedouro nas três topologias analisadas, fato comprovado nas simulações. Esta taxa de entrega foi possível devido às baixas taxas de aplicação consideradas nas simulações, que variaram de 1,66 bps a 50 bps. 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.

A topologia quadro apresenta uma eficiência de utilização do canal de aproximadamente 40% contra aproximadamente 20% das topologias linha e cubo para a rede implementando o Broadcast-MAC. Para as implementações com R-MAC a eficiência do canal é bem semelhante para todas as topologias.

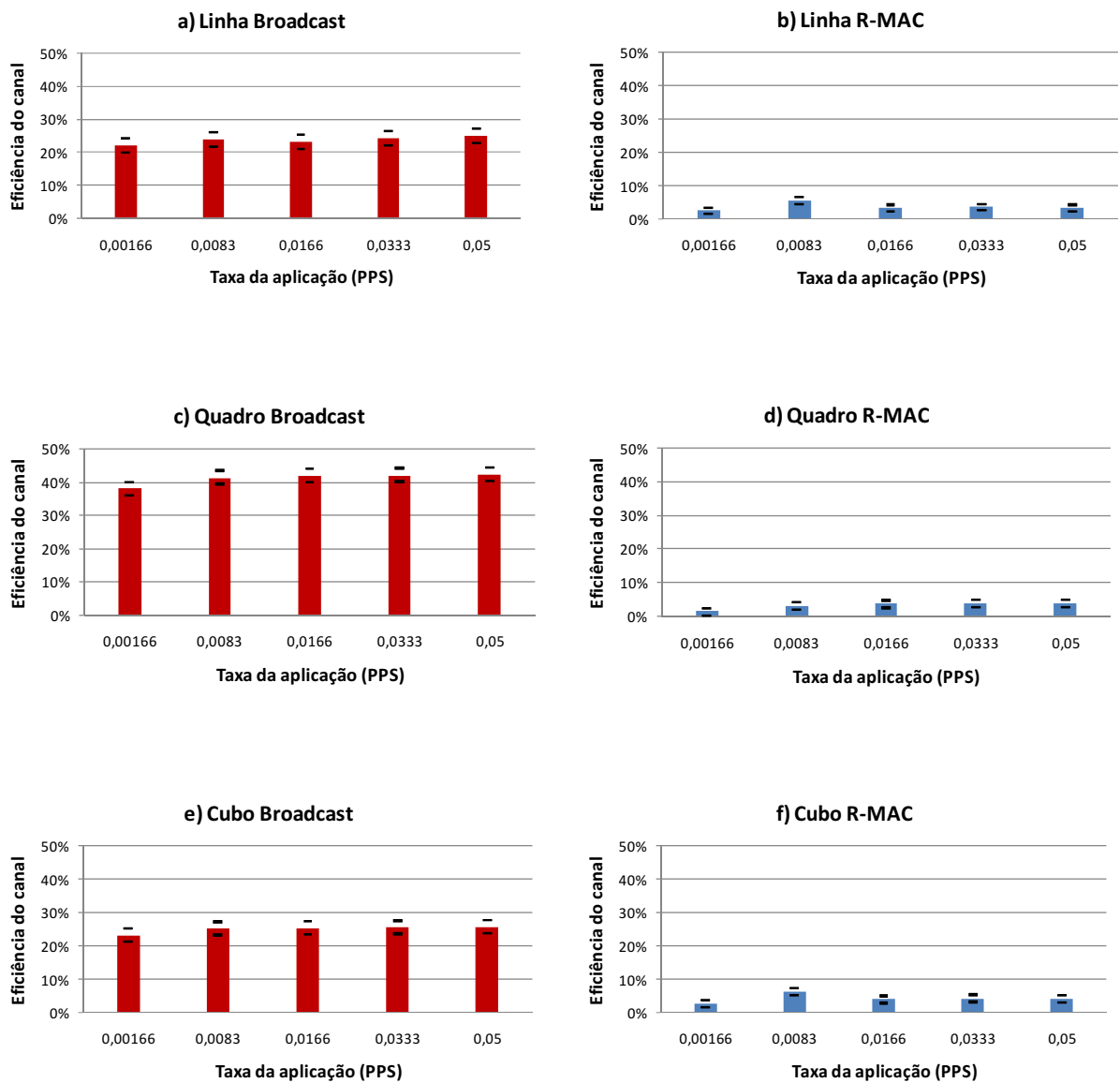


Figura 12 - Eficiência de utilização do canal.

5.4 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 à 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 gera 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 | Alta | 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 |

Para facilitar os desenvolvedores na definição do protocolo de acesso ao meio mais apropriado para o desenvolvimento de suas aplicações elaboramos um método de análise simples que é apresentado na Figura 13.

O eixo x do gráfico considera a autonomia de energia e o eixo y a tolerância ao atraso com cada um dos eixos variando entre 0 e 1. Essa variação representa o peso ou a influência que cada uma das métricas analisadas tem sobre a aplicação. O protocolo de controle de

acesso mais apropriado será definido de acordo com a posição de cada aplicação no gráfico.

Para as aplicações classificadas no 1º ou 2º quadrantes o protocolo de acesso ao meio mais indicado é o R-MAC, já para as classificadas no 3º ou 4º quadrantes o mais indicado é o Broadcast-MAC. Todas as aplicações listadas na Tabela 5 estão representadas na Figura 13. Como exemplo prático podemos citar a aplicação de exploração submarina que deve possuir uma alta autonomia de energia e apresenta uma alta tolerância ao atraso. Estes parâmetros posicionam a aplicação no 2º quadrante indicando o protocolo R-MAC como o mais apropriado.

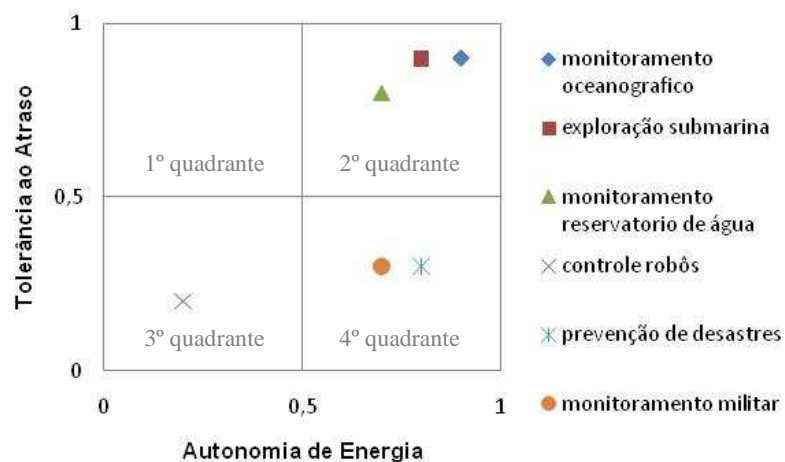


Figura 13 – Protocolos x Métricas analisadas

5.5 Trabalhos relacionados

Apesar de o trabalho ter se baseado em várias publicações três delas tiveram uma maior contribuição para o seu desenvolvimento e na definição das simulações e análises realizadas.

Na primeira delas (AKYILDIZ, 2005), os autores apresentam os aspectos fundamentais relacionados às redes acústicas submarinas, às arquiteturas de rede e às características do canal acústico submarino. São discutidos os principais desafios para o desenvolvimento de soluções eficientes em redes acústicas submarinas e o desenvolvimento de protocolos de controle de acesso e de rede específicos.

Na segunda (AKYILDIZ, 2006), os autores apresentam as características básicas das redes acústicas submarinas, as potenciais aplicações e a operação das redes com topologias 2D e 3D. Além disso, discutem-se os fatores que influenciam no funcionamento e no desenvolvimento de protocolos específicos para redes acústicas submarinas. Apresenta uma

visão geral das camadas de rede e propõe o uso de alguns protocolos tais como o CSMA e o CDMA para o controle de acesso ao meio e os protocolos OLSR, AODV e VBF para a realização do roteamento.

A terceira publicação (XIE,2009) apresenta o simulador Aqua-Sim baseado no NS-2 e desenvolvido especificamente para a simulação de redes acústicas submarinas. O simulador tem como objetivo facilitar a pesquisa em redes acústicas submarinas simplificando o desenvolvimento de aplicações específicas. O simulador pode ser utilizado, tal como neste trabalho, para comparar diferentes topologias, algoritmos e protocolos. O funcionamento do simulador está detalhado no Anexo I.

Em (XIE, 2009) é realizada uma comparação de protocolos de acesso ao meio, dentre eles o Broadcast-MAC e o R-MAC. Nas simulações é utilizada uma topologia estrela composta por 5 nós sendo um deles o nó sorvedouro, são transmitidos pacotes de 64 bytes a uma taxa de transmissão de 10 kbps e a taxa de aplicação é variada de 0,01 a 0,05 pps. O consumo de energia por pacote e o atraso por pacote foram às principais métricas analisadas, assim como em nosso trabalho.

A partir da comparação dos dois protocolos MAC analisados (XIE, 2009) conclui que o R-MAC é mais apropriado para sistemas com alta demanda de eficiência energética e sem exigência de atraso mínimo por pacote. Já o Broadcast-MAC é recomendado para aplicações que demandam baixo atraso.

Comparando os resultados obtidos em (XIE, 2009) com os obtidos em nosso trabalho verificamos que existe uma grande aderência entre eles. Apesar das diferenças nas topologias, taxas de aplicação e no tamanho dos pacotes, concluimos que as análises das topologias em relação aos protocolos realizadas neste trabalho se mostram consistentes se comparadas com as análises realizadas em (XIE, 2009).

6 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi definir através de simulações e análises a topologia de rede e o tipo de protocolo MAC mais apropriado para aplicação em redes acústicas submarinas.

Através do Aqua-Sim foi simulado o comportamento das topologias linha, quadro e cubo propostas como básicas para aplicações em redes acústicas submarinas. O simulador se mostrou muito flexível rodando sem maiores problemas todos os códigos parametrizados utilizando o VBF para o roteamento e dois diferentes protocolos de acesso ao meio. O primeiro deles o Broadcast-MAC bem convencional que utiliza transmissão broadcast e não realiza nenhum tipo de controle de entrega de pacotes ou reserva de canal e o segundo o R-MAC, um protocolo mais complexo que utiliza reserva de canal e quadros de controle.

A partir dos gráficos apresentados nas Figuras 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12 foi possível analisar o atraso total, o consumo de energia e a eficiência de utilização do canal acústico em relação às topologias e protocolos de acesso ao meio. De acordo com as análises realizadas nos subitens 5.1 e 5.2 concluímos que as maiores variações em relação ao atraso total e ao consumo de energia realmente são causadas pelo tipo de protocolo MAC utilizado e suas características de operação. Verificamos que as topologias linha e cubo se comportaram de maneira semelhante em todas as análises apresentando variações muito pequenas em relação a esses dois parâmetros. Já a topologia quadro se comportou de maneira diferente principalmente quando foram aplicadas taxas de aplicação mais altas. Os desenvolvedores devem atentar para as características diferenciadas da topologia quadro em seus projetos que necessitem de taxas de aplicação mais elevadas principalmente em relação ao atraso total.

O objetivo deste estudo não foi determinar qual a melhor topologia ou o melhor tipo de protocolo de acesso ao meio para as redes acústicas submarinas, mais sim qual a configuração de rede mais indicada para determinada aplicação, levando em consideração as características da cada uma delas tais como: tolerância ao atraso, autonomia de energia, topologia, taxa de amostragem, tempo de operação dos sensores e taxa de aplicação.

A partir das análises apresentadas no Capítulo 5 conclui-se que as aplicações de monitoramento e controle, baseadas em redes acústicas submarinas, podem ser consideradas viáveis em aplicações práticas. Os desenvolvedores das aplicações devem atentar principalmente para o tipo de protocolo e a topologia que melhor se adéquam 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 de controle de acesso e de roteamento em redes acústicas submarinas associados às topologias linha, quadro e cubo. Implementaremos também uma relação mais técnica entre aplicação, topologia e protocolo através da elaboração de uma função utilidade. Com a realização de simulações e análises complementares teremos condições de elaborar um guia de referência mais completo e detalhado para que os desenvolvedores das aplicações submarinas possam contar com uma referência básica para iniciar os seus projetos.

REFERÊNCIAS

AKYILDIZ, I, F.; POMPILI, D.; MELODIA, T. Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges. *Ad Hoc Net*, vol. 3, pp. 257–79, 2005.

AKYILDIZ, I, F.; POMPILI, D.; MELODIA, T. State of the Art in Protocol Research for Underwater Acoustic Sensor Networks. *ACM International Workshop on UnderWater Networks (WUWNet)*, Los Angeles, CA, EUA, 2006.

BENTHOS TELEDYNE. Disponível em: <<http://www.benthos.com/acoustic-teleonar-modem-product-comparison.asp/>>. Acesso em: janeiro de 2012.

BHARGHAVAN, V.; DEMERS, A.; SHENKER, S.; MACAW: a Media Access Protocol for Wireless LAN's , *SIGCOMM Comput. Commun. Rev*, vol. 24, n. 4, pp. 212–225, 1994.

BREKHOVSKIKH, L, M.; LYSANOV, Y, P. *Fundamentals of Ocean Acoustics*. Springer-Verlag, 1991.

CAYIRCI, E.; TEZCAN, H.; DOGAN, Y.; COSKUN, V. Wireless sensor networks for underwater surveillance systems, *Ad Hoc Networks*, vol. 4, no. 4, pp. 409-23, 2004.

DOUKKALI, H.; NUAYMI, L. Analysis of MAC Protocols for Underwater Acoustic Data Networks, *IEEE Vehicular Technology Conference, VTC-Spring*, vol. 2, pp. 1307–1311, junho de 2005.

FREITAG, L.; GRUND, M.; SINGH, S. The WHOI Micro-modem: an Acoustic Communications and Navigation System for Multiple Platforms, *OCEANS 2005. Proceedings of MTS/IEEE*.

FULLMER, C. L.; GARCIA-LUNA-ACEVES, J. J. Floor acquisition multiple access (FAMA) for packet-radio networks. In: *SIGCOMM '95: Proceedings of the conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication*, pp. 262–273, New York, NY, USA, 1995.

HARRIS, A, F.; ZORZI, M. 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, 2007.

HEIDEMANN, J.; YE, W.; WILLS, J.; SYED, A.; LI, Y. Research challenges and applications for underwater sensor networking. In *Proceedings of the IEEE wireless communications and networking conference*, pp. 228–235. Las Vegas, Nevada, USA, 2006.

KARN, P. MACA, A New Channel Access Method for Packet Radio. ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conf., 1990.

KILFOYLE, D.; BAGGEROER, A. The State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry, *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, v. 25, n. 1, pp. 4–27, janeiro de 2000.

LINKQUEST. Disponível em: <<http://www.link-quest.com/html/models1.htm/>>. Acesso em: fevereiro de 2012.

MA, Y.; GUO, Z.; FENG, Y. C-MAC: A TDMA-Based MAC Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks. In: *NSWCTC '09: Proceedings of the 2009 International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing*, pp. 728–731, Washington, DC, USA, 2009.

MOLINS, M.; STOJANOVIC, M. Slotted FAMA: a MAC Protocol for Underwater Acoustic Networks, *OCEANS 2006 - Asia Pacific*, pp. 1–7, maio de 2006.

NS-2. Disponível em: <<http://isi.edu/nsnam/ns/>>. Acesso em dezembro de 2011.

PARK, M, K.; RODOPLU, V. UWAN-MAC: An Energy-Efficient MAC Protocol for Underwater Acoustic Wireless Sensor Networks, *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, v. 32, n. 3, pp. 710–720, julho de 2007.

POMPILI, D.; MELODIA, T.; AKYILDIZ, I, F.; Routing algorithms for delay-insensitive and delay-sensitive applications in underwater sensor networks. *MobiCom'06*, pages 298–309, Los Angeles, CA, EUA, 2006.

POMPILI, D.; MELODIA, T.; AKYILDIZ, I. F. A Distributed CDMA Medium Access Control in Underwater Acoustic Sensor Networks. In: *Proceedings of Med-Hoc-Net*, Corfu, Greece, June 2007.

PROAKIS, J.; SOZER, E.; RICE, J. Shallow Water Acoustic Networks, *Communications Magazine, IEEE*, v. 39, n. 11, pp. 114–119, novembro de 2001.

SANTOS, F. D.; RUBINSTEIN, M. G. Análise da Viabilidade de Aplicações de Monitoramento e Controle Utilizando Redes Acústicas Submarinas, XXX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, 2012.

SOREIDE, N, N.; WOODY, C, E.; HOLT, S, M. 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, 2004.

SOZER, E.; STOJANOVIC, M.; PROAKIS, J. Underwater Acoustic Networks, *Oceanic Engineering*, IEEE Journal of, v. 25, n. 1, pp. 72–83, janeiro de 2000.

STOJANOVIC, M. “Underwater Acoustic Communication”. In: *Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, v. 22, pp. 688–698, John Wiley and Sons, 1999.

SYED, A.; YE, W.; HEIDEMANN, J. T-Lohi: A New Class of MAC Protocols for Underwater Acoustic Sensor Networks, *INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE*, pp. 231–235, abril de 2008.

URICK, R, J. *Principles of Underwater Sound*. McGraw-Hill 1983.

VIEIRA, L.; LOUREIRO, A.; FERNANDES, A.; CAMPOS, M. Redes de Sensores Aquáticas, XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, Gramado, RS, Brasil, 24 a 28 de maio de 2010.

WILSON, W. D. “Speed of Sound in Sea Water as a Function of Temperature, Pressure, and Salinity”, *Journal of the Acoustic Society of America*, v. 32, n. 6, pp. 641–644, 1960.

XIE, G.; GIBSON, J. A Networking Protocol For Underwater Acoustic Network, SCS Department, Naval Postgraduate School, dezembro de 2000.

XIE, P.; CUI, J, H. R-MAC: An Energy-Efficient MAC Protocol for Underwater Sensor Networks, International Conference on Wireless Algorithms, Systems and Applications, 2007.

XIE, P.; CUI, J, H.; LAO, L. VBF: Vector-Based Forwarding Protocol for Underwater Sensor Networks IFIP Networking, Coimbra. Portugal, 2006.

XIE, P.; ZHOU, Z.; ZHENG PENG, H, Y.; HU, T.; CUI, J, H.; SHI, Z.; FEI, Y.; ZHOU, S. Aqua-Sim: A NS-2 based simulator for underwater sensor networks. *OCEANS MTS/IEEE*, 2009.

YAN, H.; SHI, Z, J.; CUI, J, H.; DBR: Depth-Based Routing for Underwater Sensor Networks, Industrial Mechatronics and Automation (ICIMA), 2nd International Conference, 2010.

YANG, X.; ONG, K, G.; DRESCHER, W, R.; ZENG, K.; MUNGLE, C, S.; GRIMES, C, A. Design of a wireless sensor network for long-term, in-situ monitoring of an aqueous environment, vol. 2, pp. 455–472. Sensors 2002.

YEO, J. K.; LIM, Y. K.; LEE, H. H. Modified MAC (Media Access Control) Protocol Design for the Acoustic-based Underwater Digital Data Communication, Industrial Electronics, 2001. Proceedings. ISIE 2001. IEEE International Symposium on, v. 1, pp. 364–368 vol.1, 2001.

ZHANG, B.; SUKHATME, G, S.; REQUICHA, A, A. Adaptive sampling for marine microorganism monitoring”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004.

ANEXO I

Simulador Aqua-Sim

O simulador Aqua-Sim tem como objetivo facilitar a pesquisa em redes de sensores submarinos para o desenvolvimento de aplicações demandadas para a exploração dos oceanos. A ideia do autor foi implementar um simulador padrão para a comparação de diferentes topologias, algoritmos e protocolos em redes acústicas submarinas.

O Aqua-Sim é um módulo independente desenvolvido para rodar no NS-2. Este módulo é dividido em quatro blocos: uw_common, uw_mac, uw_routing e uw_tcl. Os códigos de simulação para os nós e para os tipos de tráfego são agrupados no bloco uw_common, os códigos de simulação do canal acústico e dos protocolos MAC são agrupados no bloco uw_mac. O bloco uw_routing armazena os protocolos de roteamento e o bloco uw_tcl inclui todos os scripts otcl para validar o Aqua-Sim.

O Aqua-Sim também é dividido nas seguintes classes:

Classe das entidades de rede: Esta classe representa as entidades concretas da rede (nós físicos). Um nó físico é representado como um objeto “UnderwaterPhy” e o protocolo MAC de broadcast é representado pelo objeto “Broadcast-MAC”.

Classe de interface pura: Especificam interfaces comuns entre protocolos.

Classes de funções comuns: Fornecem funções a outras classes.

A Figura 14 mostra o diagrama de blocos das classes do Aqua-Sim.

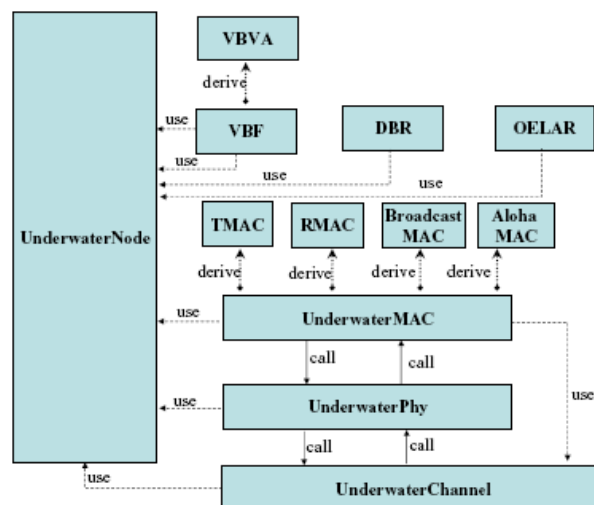


Figura 14 - Diagrama de classes do Aqua-Sim, extraído de (XIE, 2009).

O objeto “Underwater Channel” representa o canal acústico. Ele fornece interface para as camadas superiores facilitando o reconhecimento das propriedades do canal por parte dos objetos.

Todas as entidades da rede são representadas pelos seus respectivos objetos que interagem entre si conforme especificado na pilha de protocolos. Por exemplo, se o nó A quer transmitir um pacote de controle MAC para o nó B ele irá repassar diretamente o pacote para o seu objeto “Underwaterphy” que representa a sua camada física. Este pacote será então repassado para o objeto “Underwater Channel” que irá colocar o pacote em uma fila FIFO e calcular o atraso de propagação e a atenuação. Em seguida este pacote será repassado ao objeto “Underwaterphy” do nó B e posteriormente a camada MAC do nó B.

O Aqua-Sim implementa em suas camadas de rede protocolos específicos para a simulação de redes acústicas. Estes protocolos foram definidos e implementados considerando as peculiaridades do canal acústico submarino. As camadas física, MAC e de roteamento do Aqua-Sim possuem as seguintes características:

Camada Física :

Modelo de atenuação: Quando um nó envia um pacote o Aqua-Sim localiza todos os nós no intervalo de transmissão e em seguida calcula o tempo de entrega do pacote para cada um deles. Este tempo será considerado pelo simulador como o atraso de propagação.

Modelo de colisão: O Aqua-Sim pode simular a colisão de pacotes em cada um dos nós. Devido ao grande atraso de propagação presente no canal acústico subaquático, diferentes nós verão diferentes condições da rede. Pacotes que colidem em um nó podem não colidir em outro e poderão chegar em diferentes ordens em diferentes nós. Para a simulação de colisões o Aqua-Sim implementa o objeto “IncomingChannel”. Os pacotes que chegam através do canal serão copiados para o “Incoming Channel” do nó onde serão reordenados de acordo com sua hora de chegada e encaminhados para a camada física. No “Underwaterphy” os pacotes serão analisados e as colisões serão detectadas. Como o “Incoming Channel” de cada nó realiza uma cópia da sequência de pacotes, as colisões são confinadas aos nós locais não afetando as informações armazenadas em outros nós. Este é o modelo ideal para redes de sensores submarinos.

Camada MAC (uw_mac):

Na camada MAC o Aqua-Sim implementa alguns protocolos, tais como Broadcast MAC, RMAC e Aloha que apresentam boa performance em redes submarinas com transmissão acústica, possibilitando a obtenção de dados confiáveis.

Camada de roteamento (uw_routing):

Utiliza principalmente os protocolos VBF (Vector-Based Forwarding) e DBR (Depth-Based Routing)