



COPPE/UFRJ

REDES ACÚSTICAS SUBAQUÁTICAS NA MONITORAÇÃO DE
CORRENTES MARÍTIMAS

Diorgenes Penteado

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Aloysio de Castro Pinto
Pedroza
Luís Henrique Maciel
Kosmalski Costa

Rio de Janeiro
Março de 2010

REDES ACÚSTICAS SUBAQUÁTICAS NA MONITORAÇÃO DE
CORRENTES MARÍTIMAS

Diogenes Penteado

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Aloysio de Castro Pinto Pedroza, Dr.

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa, Dr.

Prof. Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte, Dr.Ing.

Prof. Marcelo Gonçalves Rubinstein, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2010

Penteado, Diorgenes

Redes Acústicas Subaquáticas na Monitoração de Correntes Marítimas/Diorgenes Penteado. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XII, 70 p.: il.; 29,7cm.

Orientadores: Aloysio de Castro Pinto Pedroza

Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 63 – 70.

1. Redes Subaquáticas. 2. Sincronismo. 3. Correntes Marítimas. 4. Maré. I. Pedroza, Aloysio de Castro Pinto *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*Dedico este trabalho a minha
família, da qual me afastei um
pouco durante este período, e em
particular a Maria Sinêida
(Flor), pelo seu incessante e
alentador incetivo.*

Agradecimentos

Agradeço aos colegas do Grupo de Teleinformática e Automação pelas ajudas recebidas e aos professores desse grupo, em particular ao Prof. Otto Carlos Muniz Bandeira Duarte, de cuja cadeira surgiu o objeto desta dissertação, e aos Profs. Aloysio de Castro Pinto Pedroza e Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa, meus orientadores neste trabalho, pela sua paciente atenção e ajuda.

Agradeço também à Petroleo Brasileiro SA, por me proporcionar a oportunidade deste aprimoramento e o acesso a parte de informações de seus bancos de dados, usados nesta dissertação.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

REDES ACÚSTICAS SUBAQUÁTICAS NA MONITORAÇÃO DE CORRENTES MARÍTIMAS

Diorgenes Penteado

Março/2010

Orientadores: Aloysio de Castro Pinto Pedroza

Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa

Programa: Engenharia Elétrica

Há um crescente interesse por dados oceanográficos, devido à importância dos oceanos para o ser humano. Navegação, pesca, ecologia, prevenção de catástrofes, influência nos climas e exploração de petróleo são alguns exemplos dessa importância. Entretanto, embora cobrindo mais de 70% da superfície da Terra, os oceanos ainda não são bem conhecidos, devido às suas dimensões, às dificuldades na coleta de dados e aos elevados custos dos equipamentos e operações marítimas. A abordagem tradicional de aquisição de dados oceanográficos, baseada no lançamento de sondas com sensores operados por baterias, para registro das informações durante um tempo programado e posterior resgate, tem diversas desvantagens que podem ser contornadas com o uso de Redes Acústicas de Sensores Subaquáticos. Este trabalho discute as limitações do canal acústico e apresenta a viabilidade do emprego dessa classe de redes na monitoração de correntes marítimas. Propõe também um método para sincronismo de redes subaquáticas baseado nas variações das marés.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

UNDERWATER ACOUSTIC NETWORKS ON MARITIME CURRENTS MONITORING

Diorgenes Penteado

March/2010

Advisors: Aloysio de Castro Pinto Pedroza

Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa

Department: Electrical Engineering

There is an increasing interest in oceanographic data due to the oceans importance to human being. Navigation, fishing, ecology, catastrophes prevention, weather influence, and petroleum exploration are some of the examples of this importance. Nevertheless, although covering more than 70% of the Earth surface, the oceans are not yet well known due to its dimensions, difficulties of data acquisition and the high costs of maritime equipments and operations. The traditional approach of oceanographic data acquisition, based on the deployment of battery operated stations with sensors, for data recording during some programmed time and later recovery, has several drawbacks that may be overcome with Underwater Acoustic Sensor Networks. This work discusses the acoustic channel limitations and presents the feasibility of this class of network on ocean currents monitoring. Also, it proposes a method for underwater network synchronization based on tide variations.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Organização da Dissertação	4
2 Conceitos gerais sobre RASSAs	6
2.1 Principais características das RASSAs	6
2.2 Potenciais aplicações	8
2.3 Comunicação subaquática	10
2.3.1 Propagação de sinais na água	11
2.4 O canal acústico subaquático	12
2.4.1 Velocidade de propagação	12
2.4.2 Trajetórias de propagação	14
2.4.3 Perdas de transmissão e Banda Passante	15
2.4.4 Potência de transmissão	19
2.5 Protocolos de controle de acesso ao meio e de rede	20
2.5.1 Introdução	20
2.5.2 Métodos de acesso múltiplo ao meio	21
2.5.3 Protocolos MAC	23
2.5.4 Protocolos de roteamento	28
2.6 Simulação para RASSAs	30
2.7 Centros de Pesquisa	32
2.8 Conclusões do Capítulo	34
3 Requisitos para aplicações em RASSA	36
3.1 Monitoração de reservatórios de petróleo	39
3.2 Conclusões do Capítulo	42

4	RASSA na monitoração de correntes marítimas	43
4.1	ADCP na medição de correntes marítimas	43
4.2	Características e dados típicos da aplicação	45
4.3	Comprovações e resultados	46
4.3.1	Comprovações com simulações no NS-2	47
4.3.2	Comprovações com resultados analíticos	49
4.4	Conclusões do Capítulo	51
5	Sincronismo em RASSA	53
5.1	O problema do sincronismo em RASSA	53
5.2	Proposta de solução	54
5.3	Apresentação de dados reais	55
5.4	Avaliação de resultados dos dados reais	57
5.5	Conclusões do Capítulo	58
6	Conclusões e trabalhos futuros	60
	Referências Bibliográficas	63

Lista de Figuras

1.1	Aquisição de dados tradicional (a), e com opção de ligação a estação terrestre via rádio (b).	2
1.2	Rede Acústica Subaquática: configuração típica.	3
2.1	Taludes íngremes no leito oceânico do litoral do Rio de Janeiro. As profundidades dos pontos S1 e S3 são de aproximadamente 200 m e 2000 m, respectivamente.	9
2.2	Variação típica da velocidade do som no mar (a) e canal SOFAR (b) .	13
2.3	Refração do som entre dois meios com velocidades distintas (a), e em meio com variação gradativa de velocidade (b).	14
2.4	Zonas de sombra e de convergência.	15
2.5	Reverberação do sinal acústico na superfície e no fundo do mar. . . .	15
2.6	Relação S/R em função da frequência e distâncias transmissor-receptor.	17
2.7	Alcances e taxas de transmissão de modems comerciais e experimentais.	18
2.8	Potência de transmissão x alcance para obter relação S/R de 20 dB no receptor.	20
2.9	Representação temporal do método de acesso TDMA.	22
2.10	Problema dos nós exposto e oculto.	23
2.11	Esquemas de RTS x CTS x ACK.	24
2.12	Teste de potências durante troca de RTS e CTS.	25
2.13	Solicitação automática de repetição seletiva múltipla.	26
2.14	Funcionamento do protocolo VBF.	30
2.15	Modelo do canal e da camada física no NS-2.	31
3.1	Aquisição de dados sísmicos marítimos.	40
3.2	Aquisição de dados sísmicos com sensores no leito oceânico (OBC). . .	41
4.1	ADCP instalado no leito oceânico.	44
4.2	Cenário para avaliação.	47
4.3	Estrutura da simulação no NS-2.	47
4.4	Bandas em função da distância transmissor-receptor.	48

4.5	Limitação das taxas de transmissão em função da distância transmissor-receptor.	49
5.1	Localização dos pontos de medição de marés.	56
5.2	Sincronismo de marés na baía de Campos.	56
5.3	Registro de marés em pontos distintos, separados de 1 km, com amostragem a cada 150 segundos.	57
5.4	Método para verificação de sincronismo (a) e histograma com resultados (b).	58

Lista de Tabelas

2.1	Banda em função da distância transmissor-receptor.	18
2.2	Comparações de potências (mW).	21
3.1	Principais especificações do modem acústico UWM4000.	37
4.1	Dados típicos registrados por um ADCP.	45
4.2	Resumo da avaliação analítica da taxa de ocupação do canal para a aplicação proposta	52
6.1	Efeitos da distância transmissor-receptor na banda do canal acústico (valores aproximados, obtidos do gráfico da Figura 4.4).	60
6.2	Efeitos da distância transmissor-receptor na máxima taxa de transmissão (valores obtidos do gráfico da Figura 4.5).	61

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Os oceanos cobrem mais de 70% da superfície da Terra e têm grande importância para a vida em nosso planeta. Dentre seus aspectos mais relevantes podemos citar que: influenciam os climas dos continentes, devido às correntes marítimas; são importantes fontes de alimentos e atividade econômica proporcionados pela pesca; proporcionam a navegação para as trocas da maior parte do comércio internacional; têm sido cada vez mais fonte de petróleo e gás nas explorações *offshore*, haja vista as recentes descobertas no litoral do Brasil; têm sido objeto de crescente interesse ecológico, na preservação de espécies e no estudo do aquecimento global; são estratégicos em termos de segurança nacional e defesa militar; e podem ser fontes de catástrofes, como os tsunamis.

Embora com toda essa relevância, os oceanos ainda não são bem conhecidos devido às suas dimensões, aos custos dos equipamentos e embarcações, à agressividade do ambiente marinho e às dificuldades operacionais na aquisição de seus dados.

A tradicional coleta de dados oceanográficos é feita com o emprego de sondas fixas equipadas com diversos sensores, operados por baterias. Essas sondas são fixadas no leito oceânico, nos locais de interesse, ou ficam submersas a determinada profundidade, atadas a âncoras através de cabos. Em ambos os casos essas sondas são programadas para adquirir dados durante um período pré-definido, após o que são resgatadas para recuperação dos dados registrados, para posterior processamento e análise.

Embora seja a fonte da maior parte dos dados oceanográficos hoje disponíveis, essa maneira de aquisição de dados tem diversos inconvenientes: não permite monitoração dos dados em tempo real; é limitada a amostragem de um ponto por vez; tem limitada capacidade de armazenamento e autonomia de operação; não permite a identificação de defeitos em sensores durante a operação, sendo esses apenas consta-

tados ao final da missão, com prejuízo irre recuperável à campanha; e as configurações da aquisição têm que ser feitas no início das campanhas, permanecendo inalteráveis até o final das missões.

Há experiências conectando essas sondas através de cabos a bóias com interface de rádio, para enviar em tempo real os dados dos sensores a estações terrestres. Nesse caso a estação terrestre consegue monitorar a qualidade dos dados e controlar a configuração da aquisição remotamente. Todavia, essa ainda é uma solução limitada a amostragens pontuais e em águas rasas, pois nem sempre é possível conectar a sonda submersa a uma bóia na superfície através de cabos, seja por limitações operacionais, como o tráfego de embarcações e vandalismos, seja pela profundidade em que certas sondas precisam ser instaladas.

A Figura 1.1 mostra o arranjo para aquisição convencional com sonda submersa (a), e com sonda submersa conectada via cabo a bóia flutuante com interface de rádio (b).

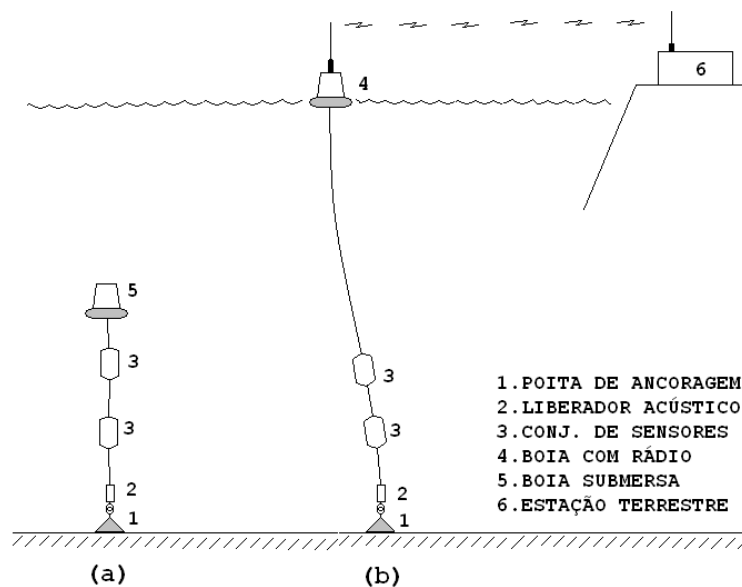


Figura 1.1: Aquisição de dados tradicional (a), e com opção de ligação a estação terrestre via rádio (b).

O emprego de Rede Acústica de Sensores Subaquáticos¹ pode contornar essas limitações. As RASSAs são compostas por nós equipados com sensores e algum recurso de comunicação. Os nós se comunicam para troca de dados e comandos, visando encaminhar suas informações a um nó sorvedouro, de onde possam ser recuperados da terra [1–3]. Uma típica configuração desse tipo de rede é apresentada na Figura 1.2. Neste exemplo os nós sensores encaminham seus dados através de múltiplos saltos a um nó sorvedouro, que tem também comunicação acústica num

¹Daqui para frente referenciada apenas como RASSA, de Rede Acústica de Sensores Subaquáticos

canal vertical com uma bóia, que por sua vez possui conexão com uma estação terrestre, via rádio.

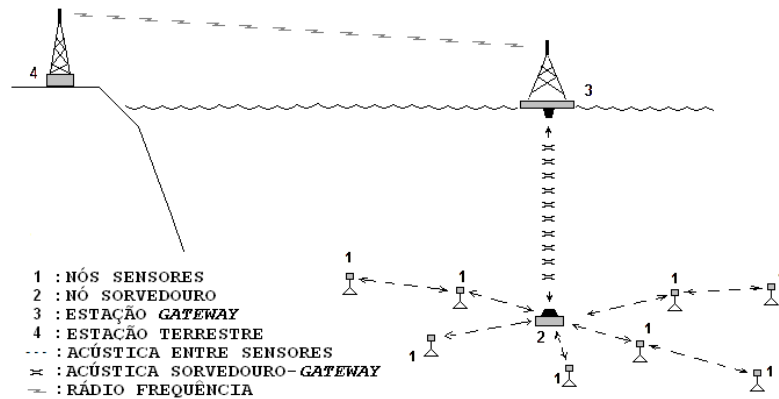


Figura 1.2: Rede Acústica Subaquática: configuração típica.

As RASSAs são potencialmente úteis em diversas aplicações, porém para sua efetiva utilização em cenários reais é necessário considerar os diversos desafios e limitações impostos pelo ambiente subaquático [4–7].

Dos dados oceanográficos mais relevantes, os referentes às correntes marítimas são da maior importância. As correntes marítimas têm influência na definição dos climas dos continentes e contribuem para a migração e dispersão de espécies marinhas. As correntes superficiais têm grande importância para a navegação, devido à redução de custos com combustível que podem proporcionar com o planejamento de rotas para o trânsito das embarcações. O conhecimento e monitoração da intensidade e direção dessas correntes abaixo da camada superficial e próximo ao leito oceânico também é vital para as atividades de exploração de petróleo *offshore*, tais como lançamento de oleodutos, operação de ROVs (*Remotely Operated Underwater Vehicles*) e de AUVs (*Autonomous Underwater Vehicles*), orientação de mergulhadores, fixação de estruturas submarinas e operações de perfuração e produção. O conhecimento prévio dos dados históricos dessas correntes é importante para o planejamento e projeto de instalações, mas sua monitoração durante as operações descritas acima é de vital importância para aquelas atividades [8, 9].

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é o de apresentar resultados de estudo sobre os requisitos necessários para que uma aplicação seja implementável com emprego de RASSA diante das dificuldades de comunicação no ambiente subaquático. Para isso o trabalho discorre sobre as limitações do canal acústico e as particularidades do ambiente subaquático quanto à propagação, tais como banda, atenuações, interferências e

energia. Identificados aqueles requisitos o trabalho demonstra a viabilidade de uso de RASSA na monitoração de correntes marítimas. Para isso apresenta a tecnologia empregada na aquisição desse dado oceanográfico e sua dinâmica de aquisição, identificando o volume e periodicidade típicos dessa aplicação. Para a finalidade de monitoração desse dado oceanográfico o trabalho propõe uma arquitetura centralizada, o método de acesso ao meio em TDMA (*Time Division Multiple Access*) e um roteamento estático, justificando essas escolhas a partir das características da aplicação.

Um dos requisitos para a implementação de RASSA é dispor de um mínimo de sincronismo para organizar o controle de acesso ao meio. A necessidade de poupar energia nas RASSAs é mais crítica do que nas redes de sensores terrestres. Daí a importância em se evitar os desperdícios decorrentes das colisões devido a falhas de sincronismo. O sincronismo em RASSA é um grande desafio devido às características do canal acústico e tem sido objeto de diversos estudos [10–13]. Este trabalho apresenta uma proposta de sincronismo baseado nas variações das marés, apresentando dados medidos na bacia de Campos no litoral do Rio de Janeiro para corroborar a viabilidade da proposta. O movimento das marés é cíclico e perceptível simultaneamente numa área extensa o suficiente para servir como referência de tempo para RASSAs.

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira:

- Capítulo 2 – apresenta os principais conceitos sobre RASSAs, abordando aspectos de sua classificação, as possíveis aplicações, a comunicação subaquática, as características do canal acústico, os esforços no desenvolvimento de protocolos MAC (*Medium Access Control*) e de rede, e modelagem da comunicação acústica para simulações com o NS-2 (*Network Simulator*). O Capítulo indica as principais publicações de cada um desses segmentos e os principais centros de pesquisa com trabalhos em cada área;
- Capítulo 3 – com base nos conceitos apresentados do Capítulo 2 este Capítulo identifica e justifica os requisitos necessários para implementação de aplicações em RASSA, baseado nas limitações da comunicação subaquática; descreve a importância da observação desses requisitos e exemplifica discutindo sobre a dificuldade em tornar viável a proposta de monitoração remota da evolução de campos de petróleo;
- Capítulo 4 – apresenta a monitoração de correntes marítimas como uma aplicação com características que atendem aos requisitos descritos no Capítulo

3. Descreve a viabilidade de uso de RASSA para essa aplicação, apresentando a tecnologia empregada na aquisição desse dado oceanográfico, detalhando a dinâmica de aquisição e o volume/periodicidade de dados gerados pela aplicação. Propõe uma arquitetura centralizada, o método de acesso em TDMA, múltiplos saltos com roteamento estático, apresentando os cálculos que evidenciam a viabilidade da proposta;
- Capítulo 5 – descreve a proposta de viabilidade de sincronismo através das variações das marés, apresentando dados da bacia de Campos no litoral do Rio de Janeiro;
 - Capítulo 6 – apresenta conclusões e indica trabalhos futuros.

Capítulo 2

Conceitos gerais sobre RASSAs

Este Capítulo apresenta conceitos essenciais e revisão bibliográfica sobre RASSAs, em seus diversos segmentos: suas principais características; as potenciais aplicações; a comunicação subaquática; o canal acústico com suas particularidades, tais como latência, banda, alcance, ruídos e consumo de energia. Apresenta também as implicações dessas características no desenvolvimento de protocolos de controle de acesso ao meio (MAC), e seus efeitos no sincronismo da rede e localização dos nós. Uma seção é destinada à descrição da modelagem do canal acústico, com vistas ao desenvolvimento de simulações no NS-2 (*Network Simulator*); o Capítulo é encerrado apresentando as principais instituições de pesquisa e suas respectivas áreas.

2.1 Principais características das RASSAs

Como forma de introduzir a descrição de RASSAs os autores costumam descrever essas redes segundo diversos critérios [3–5], sendo os mais comuns os seguintes:

- **Mobilidade:** uma RASSA pode ser composta exclusivamente por nós fixos, móveis, ou por uma mistura de ambos os tipos. Devido às limitações da comunicação subaquática, as com nós fixos são mais fáceis de implementar, mas a flexibilidade que os nós móveis proporcionam é um atrativo cada vez mais considerado na configuração de RASSAs [4]. Um fator que vem contribuindo para isso é o desenvolvimento dos AUVs (*Autonomous Underwater Vehicles*), que operam como nós móveis, tanto para coleta de informações com sensores próprios, quanto para resgate de dados dos nós fixos, numa operação baseada em RTAIs (*Redes Tolerantes a Atrasos e Interrupções*). As RASSAs com apenas nós móveis são úteis em aplicações do tipo “varredura”, para localização de objetos ou para campanhas temporárias de levantamento de dados de determinada região;

- **Arquitetura:** podem ser centralizadas ou distribuídas. A centralizada é associada a redes com nós fixos ao redor de um nó sorvedouro, para o qual os nós da rede encaminham seus dados e dele recebem comandos. Esse nó sorvedouro necessita de um canal de comunicação com estação terrestre para encaminhar os dados da rede e dela receber comandos para configuração dos nós sensores. A arquitetura distribuída pode ser empregada em RASSAs com nós móveis, entre os quais não há hierarquia. Os nós móveis podem navegar independentemente com auxílio de referências acústicas submersas, coletando dados de forma colaborativa, e emergir de tempos em tempos para recarga de baterias com luz solar, verificação de localização com auxílio de receptor GPS (*Global Positioning System*) e para transmitir dados e receber comandos de estações terrestres;
- **Distribuição espacial:** podem ser 2D, quando todos os nós ficam fixados no leito oceânico, conforme ilustrado na Figura 1.2, ou 3D, quando os nós ficam submersos, flutuando em diferentes profundidades, atados ao fundo do mar por cabos com comprimentos variados;
- **Forma de operação:** contínua, quando os nós da rede estão constantemente em comunicação, como nas aplicações de vigilância, ou intermitente, quando os nós alternam curtos períodos de operação com longos períodos de hibernação, visando economia de energia. As intermitentes aplicam-se adequadamente ao levantamento de dados de longa duração, que tolerem amostragens lentas;
- **Utilização do canal de comunicação:** a depender da densidade de nós e da extensão geográfica, a utilização do canal de comunicação pode ser comum ou “clusterizada”. Na utilização comum o canal é partilhado por todos os nós da rede ao mesmo tempo, sendo necessário protocolo de controle de acesso ao meio para organizar a utilização do canal. Na forma “clusterizada” a arquitetura prevê “clusters”, dentro dos quais os nós se submetem a controle interno de acesso ao meio, conforme descrevem DOUKKALI *et al.* [14] e MA *et al.* [15]. Essa “clusterização” visa permitir o reaproveitamento do canal de comunicação em células cujo afastamento impeça a mútua interferência de transmissões simultâneas.

Nas RASSAs é possível encontrar combinações dessas características, em função de suas especificidades e objetivos.

2.2 Potenciais aplicações

O desenvolvimento da acústica subaquática teve grande impulso na segunda guerra mundial, devido à necessidade militar de identificação de embarcações inimigas e à necessidade de comunicação com submarinos. Entretanto, a teoria de comunicação acústica subaquática apenas desenvolveu-se nas décadas seguintes, com trabalhos como os de WILSON [16](1960), URICK *et al.*[17](1983), COATES [18] (1989) e BERKHOVSKIKH *et al.* [19](1991). Paralelamente, o desenvolvimento das técnicas de comunicação digital de sinais e os avanços da microeletrônica, com os DSPs (*Digital Signal Processors*), permitiu a fabricação de modems acústicos compactos, de baixo consumo e com grande poder de processamento, permitindo implementação de esquemas de modulação e codificação para transmissão digital de sinais acústicos que proporcionam boa taxa de transmissão em comunicação confiável [20]. Esse desenvolvimento vem suscitando estudos e propostas de implantação de redes acústicas subaquáticas para diversas aplicações. A seguir são listadas as aplicações mais comumente descritas na literatura:

- **Monitoração de dados oceanográficos:** há demanda e interesse crescentes por dados oceanográficos, partindo tanto de áreas de pesquisas científicas como de áreas comerciais. Os dados oceanográficos podem auxiliar nas previsões climáticas e na antecipação de catástrofes. As RASSAs podem proporcionar meio adequado e eficiente para coleta dessas informações, bem como para sua monitoração em tempo real. Dentre os dados de interesse para a oceanografia e passíveis de monitoração e registro com emprego de RASSAs pode-se citar: temperatura, salinidade, condutividade, correntes marítimas (superficiais, intermediárias e profundas), pressão, ondas e marés, nível de clorofila, penetração e distribuição de luz na água do mar, turbidez, concentração de produtos químicos, poluentes etc;
- **Vigilância submarina:** essa aplicação impulsionou a pesquisa em comunicação subaquática durante a segunda guerra mundial, visando detecção de inimigos e comunicação com submarinos. O emprego de RASSA para essa finalidade tem o potencial de incrementar a eficiência desses sistemas de defesa, ampliando sua área de cobertura e melhorando sua resolução. Uma rede autônoma para essa finalidade pode ser composta por nós fixos e móveis, o que proporciona flexibilidade e agilidade da detecção de intrusos;
- **Apoio a operações de exploração de petróleo *offshore*:** as operações de exploração de petróleo *offshore* requerem uma série de dados que, se puderem ser monitorados durante as operações de perfuração e produção, são de grande importância, tais como a direção e velocidade das correntes marítimas [8, 9].

Uma RASSA para essa finalidade pode proporcionar a vantagem de facilidade operacional, por dispensar cabos e conexões físicas subaquáticas;

- **Monitoração da estabilidade geológica do leito oceânico:** o leito oceânico é complexo e no caso do litoral do Rio de Janeiro apresenta “taludes” íngremes com possibilidade de desmoronamentos e instabilidades que podem comprometer a segurança das instalações nesses locais. A Figura 2.1 mostra o “mergulho” do leito oceânico que ocorre a aproximadamente 150 km do litoral fluminense, no qual em alguns lugares a profundidade passa abruptamente de cerca de 200 metros para mais de 2000 metros em menos de 30 km de extensão.

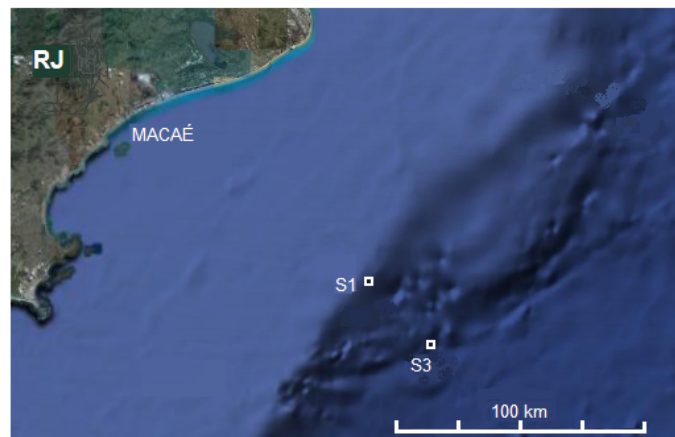


Figura 2.1: Taludes íngremes no leito oceânico do litoral do Rio de Janeiro. As profundidades dos pontos S1 e S3 são de aproximadamente 200 m e 2000 m, respectivamente.

Uma parte expressiva dos campos de petróleo em exploração da bacia de Campos está nessa região. Daí a importância de se monitorar continuamente sua estabilidade geológica, tanto para poder planejar a instalação de novos equipamentos e trajetos de novos oleodutos, como para monitorar a segurança das instalações já existentes. Uma RASSA com sensores sísmicos pode ser empregada para essa finalidade, fornecendo dados em tempo real para a monitoração e estudo dessa estabilidade;

- **Auxílio à navegação de robôs submarinos:** das áreas de engenharia submarina que mais têm se desenvolvido ultimamente, a de AUVs certamente é das mais promissoras e úteis. Atualmente boa parte das intervenções subaquáticas são feitas com ROVs, comandados remotamente através de cabos umbilicais. Embora essa técnica seja bem desenvolvida, apresenta limitações de mobilidade e alcance para certas aplicações que os AUVs vêm contornando. Uma das dificuldades nas operações com AUVs é a localização, já que no ambi-

ente subaquático não há um sistema de localização universal, como o GPS para instalações terrestres. Uma RASSA pode auxiliar a navegação e localização desses dispositivos através da emissão de sinais acústicos para referências de localização. Além disso, os nós dessas RASSAs também podem adquirir dados do ambiente e transmiti-los aos AUVs que se aproximarem, num esquema de RTAIs, conforme descrito por VASILESCU *et al.* em [13];

- **Monitoração de poluição:** aplicações voltadas para monitoração de poluição ambiental têm se tornado cada vez mais necessárias e de interesse dos órgãos fiscalizadores. As RASSAs têm flexibilidade e potencial para implementar um sistema de monitoração em tempo real que efetivamente identifique fontes poluidoras com a agilidade necessária para minimizar seus efeitos;
- **Antecipação de informações sobre catástrofes:** uma RASSA com sensores apropriados pode ser empregada para antecipar informações sobre possíveis catástrofes originadas nos oceanos, como os tsunamis. Isso permite a criação de um sistema de segurança para alertar as populações sobre a geração desses eventos, visando minimizar seus efeitos.

A possibilidade de monitorar remota e continuamente a evolução de reservatórios de petróleo através de uma rede de sensores subaquáticos fixos seria de grande interesse para a indústria do petróleo [5], pois os métodos hoje utilizados para essa finalidade deixam a desejar quanto à precisão, disponibilidade dos dados e custos, diante das crescentes necessidades dessa atividade. Entretanto, no Capítulo 4 demonstra-se a dificuldade de implementação dessa aplicação com RASSAs, em virtude do volume e da dinâmica de aquisição de dados.

2.3 Comunicação subaquática

Embora o lançamento de cabos elétricos ou de fibras ópticas no leito oceânico seja uma operação viável, esses meios físicos para comunicação entre nós de uma rede subaquática são restritos a aplicações muito específicas. A agressividade do ambiente marinho dificulta a viabilidade de conexões eficientes, estanques e confiáveis. Além disso, o uso de cabos “engessa” a arquitetura e restringe a aplicação a redes estáticas, praticamente imutáveis, apenas com nós fixos ao leito oceânico. A criação de redes subaquáticas cabeadas pode ser útil apenas para aplicações restritas, onde não se espera mudança de cenário ao longo do tempo, ou como parte de infra-estrutura de apoio na implantação de redes mistas [21]. Entretanto, em termos práticos, uma rede subaquática deve dispor de meio de comunicação sem fios entre os nós. A comunicação sem fios subaquática proporciona mobilidade, dinamismo na composição

da rede (inclusão e exclusão de nós) e contorna os inconvenientes das limitações das conexões subaquáticas (estanqueidade, resistência a corrosão, resistência a pressões elevadas etc).

2.3.1 Propagação de sinais na água

A comunicação subaquática sem fios pode ser feita através de transmissões eletromagnéticas, ópticas ou acústicas. Entretanto, embora possíveis, as comunicações subaquáticas através de transmissões ópticas ou eletromagnéticas apresentam limitações tão severas que as tornam inadequadas para implementação de RASSAs. LANBO *et al.* [22] organizaram uma boa descrição e comparação das comunicações subaquáticas empregando essas três tecnologias.

Transmissão Eletromagnética

A principal desvantagem das transmissões eletromagnéticas na água do mar é sua atenuação devido à absorção do meio. Essa absorção aumenta com a frequência, o que condiciona o uso de transmissões eletromagnéticas ao emprego de baixas frequências para obtenção de alcances úteis. A comunicação a baixas frequências requer grandes antenas, o que torna a comunicação eletromagnética inadequada para implementação de RASSAs [4, 5, 22]. Além disso, mesmo em baixas frequências, a propagação a alcances úteis requer potências elevadas, o que também é um fator limitante para seu emprego em RASSAs, já que os nós dessas redes são alimentados por baterias.

Transmissão Óptica

Embora proporcione altas taxas de transmissão com um consumo de energia muito pequeno, as transmissões ópticas na água do mar têm a desvantagem de se propagar apenas a curtas distâncias, devido à absorção e ao espalhamento. A luz é fortemente absorvida pela água do mar e sofre grande espalhamento devido às partículas em suspensão, dificultando a comunicação e limitando sua aplicação a distâncias muito pequenas. Dependendo da turbidez da água, essa distância pode ser tão pequena quanto alguns centímetros e, mesmo em água cristalina, o alcance prático para essas transmissões não excede alguns metros. O espalhamento da luz na água é tanto maior quanto maior for sua turbidez, que no caso da água do mar pode variar de poucas dezenas a alguns milhares de NTUs (*Nephelometric Turbidity Unit*). Além disso, mesmo para comunicação a pequenas distâncias, é necessário garantir alinhamento estável entre transmissor e receptor durante a transmissão para garantir a eficiência da comunicação, o que no caso da dinâmica do ambiente marinho é difícil obter [4].

Um emprego possível para comunicação óptica em RASSA é descrito por VASILESCU *et al.* em [13]. Neste trabalho os autores descrevem uma RASSA baseada em RTAIs. Nós fixos adquirem dados de forma autônoma e os transferem a um AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*), que periodicamente visita os nós da rede para resgatar seus dados. Os nós dispõem de sinalizadores acústicos para auxiliar a orientação da navegação e aproximação do AUV. Uma vez localizado o nó, o AUV, através de um sistema automático de controle, se aproxima do nó e se acopla a ele através de um sistema de encaixe para estabelecer a comunicação óptica.

Embora útil para essa classe de RASSA, a limitação de alcance das transmissões ópticas as tornam inadequadas para aplicação generalizada em RASSAs.

Transmissão Acústica

Apesar de suas limitações, a transmissão acústica é a mais versátil e a que é efetivamente empregada para comunicação no ambiente subaquático, devido principalmente às limitações das transmissões eletromagnéticas e ópticas.

Entretanto, o canal acústico tem características que restringem sua aplicabilidade em RASSA, tais como baixa e variável velocidade de propagação, banda estreita e dependente da distância transmissor-receptor e grande consumo de energia, necessária às transmissões [23].

2.4 O canal acústico subaquático

2.4.1 Velocidade de propagação

A velocidade de propagação do som na água é de aproximadamente 1500 m/s. Isso é mais de 4 vezes a velocidade de propagação do som no ar, mas é cinco ordens de grandeza menor que a propagação eletromagnética no ar. Essa baixa velocidade acarreta grande latência nas transmissões acústicas subaquáticas (~ 0.67 s/km, ou 1 segundo a cada 1.500 metros), o que é um dos maiores empecilhos ao desenvolvimento de RASSA, pois dificulta controle de acesso ao meio, localização e sincronismo. Além de baixa, a velocidade de propagação do som na água é variável, dependendo da profundidade, da temperatura e da salinidade do meio. A fórmula da velocidade do som na água do mar descrita por WILSON em [16], em m/s, contém 23 termos, da qual pode-se usar uma aproximação simplificada, com os termos mais significativos:

$$c = 1449 + 4.6t - 0.055t^2 + 1.39(s - 35) + 0.017d \quad (2.1)$$

onde c é a velocidade em m/s, t é a temperatura da água em graus Celsius (varia

de 2 a 22 graus Celsius), d é a profundidade em metros e s é a salinidade, em partes por mil (varia de 32 a 37, sendo 35 um valor típico).

A equação 2.1 dá origem à curva conhecida como *perfil de velocidade*, que é uma curva representando a variação da velocidade do som em função da profundidade.

A temperatura da água do mar, a partir de uma pequena camada superficial, diminui com o aumento da profundidade, mas atinge um mínimo de aproximadamente 4 graus Celsius a uma profundidade que varia em função da latitude, permanecendo constante a partir desta profundidade. No litoral do Rio de Janeiro essa profundidade é de aproximadamente 1000 metros. Nessa região inicial a velocidade do som diminui com o aumento da profundidade, pois o efeito da diminuição da temperatura se sobrepõe ao do aumento da pressão. Abaixo deste ponto, como a temperatura permanece aproximadamente constante, a velocidade do som passa a ser função apenas da profundidade, tornando a aumentar linearmente com ela. Descartando o efeito da variação da salinidade, que é desprezível em mar aberto, chega-se ao *perfil de velocidade*, mostrado na Figura 2.2(a), reproduzida de [19]. Nesta figura o eixo horizontal (c) representa a velocidade do som e o eixo vertical (z) a profundidade. O ponto C_h é a velocidade do som na profundidade do leito oceânico e Z_c a profundidade na qual a velocidade se iguala à da superfície.

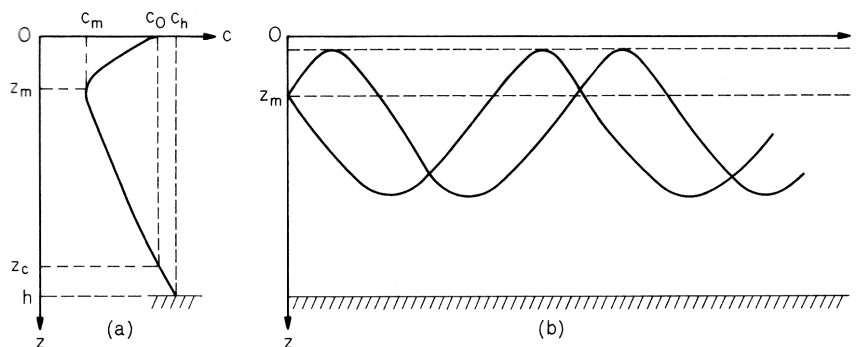


Figura 2.2: Variação típica da velocidade do som no mar (a) e canal SOFAR (b)

No litoral do Rio de Janeiro os valores típicos para os principais pontos da Figura 2.2(a) são aproximadamente: $Z_m=1000$ m, $C_0=1.540$ m/s, $C_m=1.480$ m/s. O ponto de inflexão dessa curva, Z_m , delimita duas regiões: acima, a termoclina ¹ principal e abaixo, a isoterma profunda, origem dos efeitos da refração que criam o canal SOFAR (*Sound Fixing And Ranging*), Figura 2.2(b). Nesta figura o eixo horizontal (r) é distância horizontal e o eixo vertical (z) profundidade. Esse canal forma uma guia horizontal de ondas acústicas cujo eixo central se localiza na separação dessas duas regiões. Esse efeito ocorre por causa da refração que as ondas acústicas

¹faixa de profundidade no mar que apresenta temperatura decrescente, compreendida entre a camada superficial e a profundidade na qual a temperatura atinge seu valor mínimo (≈ 4 graus Celsius).

sofrem nas contínuas camadas adjacentes, de velocidades diferentes. Sinais de baixa frequência produzidos nesse eixo ou próximos a ele se propagam horizontalmente por diversos quilômetros, com pouca atenuação, pois nunca perdem energia em reflexões na superfície ou no fundo do mar, ficando submetidos apenas aos efeitos da refração.

2.4.2 Trajetórias de propagação

O fenômeno da refração ocorre quando ondas atravessam interfaces entre meios que possuam diferentes velocidades de propagação. O que relaciona as velocidades nos dois meios é o índice de refração relativo n_{21} . O desvio que a trajetória do som na água sofre quando passa de um meio a outro depende das diferenças de velocidade entre esses meios. A lei de Snell relaciona os ângulos de incidência (θ_i) e de refração (θ_r) com os índices de refração dos meios (e, conseqüentemente, com suas respectivas velocidades):

$$\frac{\sin(\theta_i)}{\sin(\theta_r)} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.2)$$

A Figura 2.3(a) mostra esse efeito para o som atravessando interface entre dois meios com velocidades distintas e a Figura 2.3(b) mostra o efeito de “curvamento” de uma onda sonora se propagando de uma região de menor velocidade para uma de maior velocidade com variações gradativas. O raio acústico tende a curvar-se na direção da região de menor velocidade.

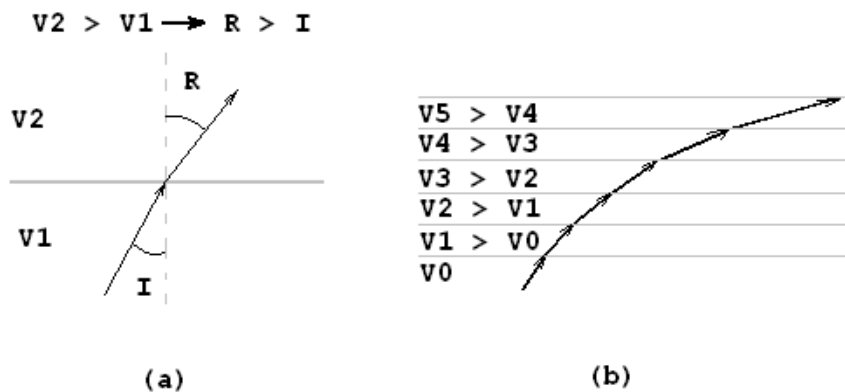


Figura 2.3: Refração do som entre dois meios com velocidades distintas (a), e em meio com variação gradativa de velocidade (b).

Disso se conclui que o som no mar pode se propagar em trajetórias curvilíneas e, em alguns casos, nunca atingir determinadas regiões, conhecidas como zonas de sombra. Essas zonas são locais inalcançáveis por transmissões acústicas, como mostrado

na Figura 2.4, reproduzida de [23]. O mesmo fenômeno é responsável por formação de zonas de convergência, locais onde, devido às trajetórias cíclicas, há uma convergência de transmissões, porém provenientes de trajetórias diferentes, o que as faz chegar ao ponto de convergência em tempos diferentes. No caso de transmissões digitais esse efeito causa o aumento de interferências intersímbolos.

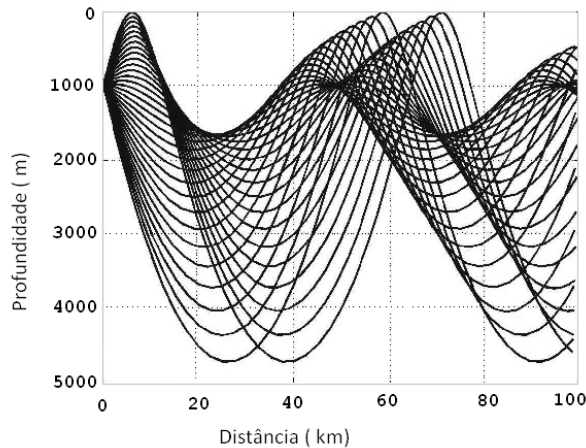


Figura 2.4: Zonas de sombra e de convergência.

Esses efeitos ocorrem principalmente em águas profundas, já que em águas rasas a velocidade não chega a sofrer a inversão mostrada na Figura 2.2(a). Entretanto, em águas rasas, outro problema que ocorre na propagação de sinais acústicos é o da reverberação provocada pelas múltiplas reflexões do sinal transmitido, na superfície e no leito oceânico, conforme mostrado na Figura 2.5.



Figura 2.5: Reverberação do sinal acústico na superfície e no fundo do mar.

Esse efeito também provoca aumento da interferência intersímbolos, devido à chegada no receptor de sinais provenientes da mesma fonte, porém com trajetórias distintas, agravado pela baixa velocidade de propagação.

2.4.3 Perdas de transmissão e Banda Passante

As perdas de transmissão no canal acústico subaquático dependem tanto da distância transmissor-receptor quanto da frequência do sinal transmitido, na se-

guinte relação [19]:

$$A(l, f) = l^k a(f)^l \quad (2.3)$$

Que pode ser reescrita da seguinte forma:

$$10\log A(l, f) = k \times 10\log(l) + l \times 10\log(a(f)) \quad (2.4)$$

Onde $A(l, f)$ é a atenuação em função da distância l , e da frequência f , k é o fator de espalhamento e $a(f)$ é o coeficiente de absorção. O fator k é 1 para espalhamento exclusivamente cilíndrico, 2 para espalhamento exclusivamente esférico, e varia entre esses valores para os demais casos, sendo $k = 1,5$ o valor normalmente adotado em termos práticos.

O coeficiente de absorção é expresso em dB/km através da fórmula empírica de Thorp (f em kHz) [19]:

$$10\log(a(f)) = \begin{cases} 0.11 \frac{f^2}{(1+f^2)} + 44 \frac{f^2}{(4100+f^2)} + 0.000275f^2 + 0.003 & f \geq 0.4 \\ 0.002 + 0.11(\frac{f}{1+f}) + 0.011f & f < 0.4 \end{cases} \quad (2.5)$$

O ruído no canal acústico subaquático tem sido estudado e modelado como composição de 4 componentes principais: turbulência, ruído de embarcações, vento e ruído térmico. A densidade espectral de potência desses ruídos em dB re $\mu Pa/Hz$, em função da frequência (em kHz) é expressa nas seguintes fórmulas [18]:

$$\log N_t(f) = 1.7 - 3\log f \quad (2.6)$$

$$\log N_s(f) = 4 + 2(s - \frac{1}{2}) + 2.6\log f - 6\log(f + 0.03) \quad (2.7)$$

$$\log N_w(f) = 5 + 0.75w^{\frac{1}{2}} + 2\log f - 4\log(f + 0.4) \quad (2.8)$$

$$\log N_{th}(f) = -1.5 + 2\log f \quad (2.9)$$

Onde N_t é o ruído por turbulências, N_s é o ruído de embarcações, N_w é o ruído de ventos, N_{th} é o ruído térmico, s varia de 0 a 1, e w é a velocidade do vento em

m/s. O ruído total, $N(f)$, é a soma desses quatro componentes:

$$N(f) = N_t(f) + N_s(f) + N_w(f) + N_{th}(f) \quad (2.10)$$

A composição dos efeitos de atenuação, provocados pelo espalhamento e pela absorção, equação (2.4), com o ruído descrito na equação (2.10), determina as curvas de relação S/N (*Sinal/Ruído*) versus frequência, para cada distância transmissor-receptor, conforme mostrado na Figura 2.6, reproduzida de [24].

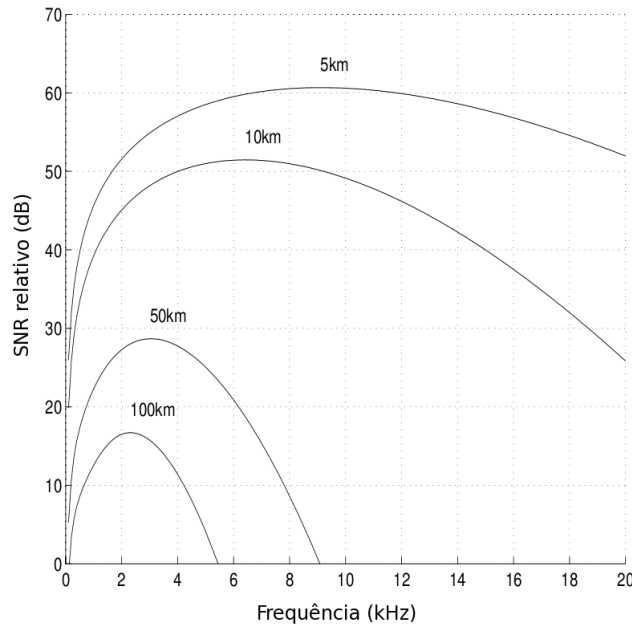


Figura 2.6: Relação S/R em função da frequência e distâncias transmissor-receptor.

Desse gráfico se depreende duas coisas: 1) a melhor frequência para transmissões subaquáticas (a que apresenta a maior relação S/R) depende da distância transmissor-receptor, sendo tanto menor quanto maior for essa distância. 2) A banda disponível para as transmissões também varia com essa distância, sendo maior para menores distâncias transmissor-receptor.

Portanto, a banda de transmissão disponível no canal acústico, além de estreita, se comparada à banda do canal eletromagnético terrestre, é variável com a distância transmissor-receptor, característica singular do canal acústico que precisa ser levada em conta na definição das arquiteturas de RASSAs.

Baseado na dependência da banda passante com a distância transmissor-receptor AKYILDIZ *et al.* [3] classificam os sistemas subaquáticos conforme descrito na tabela 2.1:

Por conta dessa limitação, a maioria dos equipamentos subaquáticos opera com frequências abaixo de 30 kHz. Além disso, a banda estreita disponível no canal acústico limita a taxa de transmissão de dados a poucos kbps (kbits/s).

Tabela 2.1: Banda em função da 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

KILFOYLE *et al.* [20] fazem uma minuciosa revisão da evolução das técnicas de modulação para transmissões acústicas subaquáticas nas décadas de 80 e 90. Relatam experiências e apresentam dados sobre alcances e taxas de transmissão obtidas com a modulação inicial, não coerente, em FSK (*Frequency Shift Keying*), com modulação em DPSK (*Differential Phase Shift Keying*) e com as modulações coerentes (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)). Neste artigo discorrem sobre o aumento das taxas de transmissão nessa evolução e resumem a relação “distância x taxa de transmissão” das experiências analisadas no gráfico mostrado na Figura 2.7, reproduzida de [20].

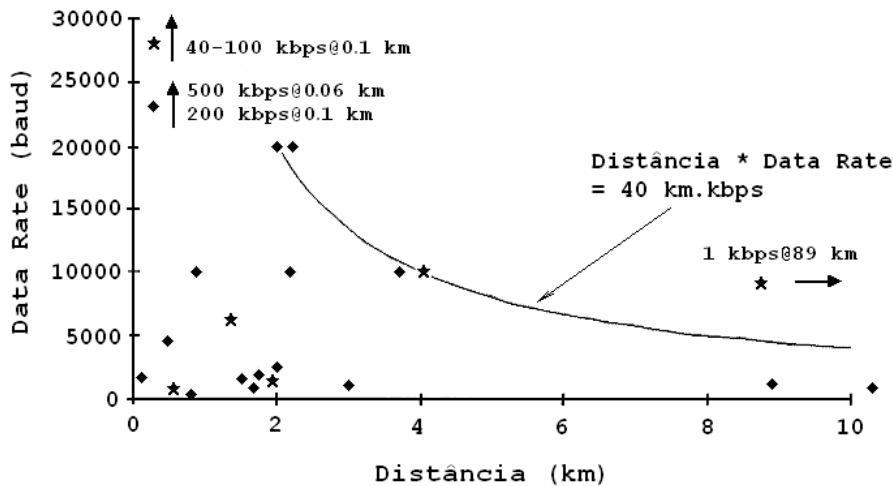


Figura 2.7: Alcances e taxas de transmissão de modems comerciais e experimentais.

Na Figura 2.7 alguns dados são referentes a modems experimentais (representados por estrelas) e outros referentes a modems comerciais (representados por losangos), alguns sobre testes em águas rasas e outros em águas profundas. As maiores taxas e distâncias indicadas são de experiências em canais verticais, de águas profundas. Mas na prática, o que se conclui desse gráfico é que a relação “alcance x taxa de transmissão” para transmissões acústicas subaquáticas é extremamente

limitada, se comparada às transmissões eletromagnéticas terrestres. Os dados analisados por KILFOYE *et al.* são das décadas de 80 e 90, mas de lá para cá as taxas de transmissão dos modems acústicos comerciais continuaram limitadas, tipicamente menores que 10 kbps, e o alcance das transmissões, com essas taxas, limitado a curtas distâncias, tipicamente menores que 5 km.

2.4.4 Potência de transmissão

Para as transmissões acústicas subaquáticas as potências envolvidas são muito maiores do que as transmissões eletromagnéticas terrestres. A tabela 2.2 da seção 2.5 apresenta dados dessa comparação. Essa diferença deve-se ao fato do sinal acústico ser gerado a partir da provocação de vibrações mecânicas das moléculas do meio, que se comunicam às moléculas adjacentes. 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. Assim, as grandezas acústicas são derivadas das de pressão e a potência acústica é a energia sonora emitida por unidade de tempo.

Em acústica submarina emprega-se usualmente o decibel (dB), que é uma medida de comparação entre grandezas como intensidades ou energias.

$$N_{dB} = 10 \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) \quad (2.11)$$

Para o caso de acústica subaquática marítima I_0 é a intensidade de referência 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 deve ser acompanhada da informação sobre a distância em que essa intensidade foi medida. Assim, um exemplo de notação completa e correta para indicar a intensidade relativa de um sinal acústico subaquático é:

$$120 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa@ } 1 \text{ m}$$

A Figura 2.8, reproduzida de [25], apresenta gráfico relacionando potência de transmissão (em $\text{dB re } 1 \mu\text{Pa}$) com a distância alcançável para obter relação S/R de 20 dB no receptor.

O consumo em Watts para obter essas potências de transmissão acústica depende da eficiência do modem. O Micromodem [26] do WHOI (*Woods Hole Oceanographic*

² μPa é unidade derivada do Pascal (Pa), unidade padrão de pressão no SI (*Sistema Internacional de unidades*), equivalente à força de 1 Newton uniformemente aplicada a uma superfície de 1 m^2 .

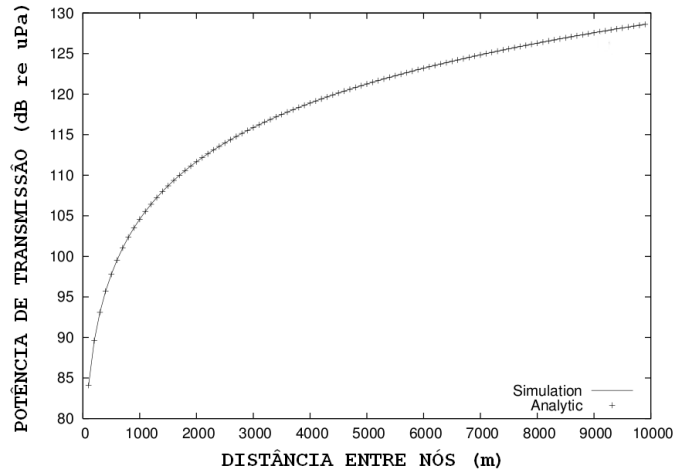


Figura 2.8: Potência de transmissão x alcance para obter relação S/R de 20 dB no receptor.

Institution, www.whoi.edu), por exemplo, requer aproximadamente 50 Watts para proporcionar 190 dB de potência acústica [26].

O elevado consumo de energia para transmissão de sinais acústicos subaquáticos tem implicações no planejamento das RASSAs, especialmente no desenvolvimento de protocolos de controle de acesso ao meio, já que os nós de RASSAs são alimentados por baterias, normalmente não recarregáveis. Há propostas que visam poupar energia dosando a potência de transmissão ao mínimo necessário a proporcionar uma relação S/R suficiente para o receptor detectar corretamente as mensagens enviadas [27]. Outros propõem esquemas de hibernação e despertar, mantendo os modems em estado de repouso, para poupar energia. A subseção 2.5.1 apresenta uma revisão das principais propostas de protocolos MAC, nas quais o foco é conservar energia através de mecanismos que evitem colisões de transmissões.

2.5 Protocolos de controle de acesso ao meio e de rede

Nesta seção são revistos os principais conceitos de protocolos MAC e de rede e as principais propostas para RASSAs.

2.5.1 Introdução

O controle de acesso ao meio numa RASSA é um dos pontos mais importantes e complexos devido principalmente à enorme latência apresentada pela comunicação acústica. Diferentemente do que ocorre nas transmissões eletromagnéticas em terra, nas quais as potências de transmissão e recepção são semelhantes, na comunicação

acústica a potência na transmissão pode chegar a dezenas de vezes a necessária para a recepção, que por sua vez pode ser até 10 vezes maior que a de repouso [1]. Afora isso, a potência para transmitir sinais acústicos entre dois pontos submersos é incomparavelmente maior do que o necessário às transmissões eletromagnéticas entre pontos à mesma distância em terra, pois no caso acústico envolve geração de vibrações mecânicas. A tabela 2.2, reproduzida de [28], contém dados reais sobre essas comparações. O *Aironet 350* é um rádio da Cisco e o Micromodem é o modem acústico experimental desenvolvido pelo WHOI [26].

Tabela 2.2: Comparações de potências (mW).

Equipamento	TX	RX	Repouso	Hibernação
Aironet 350	2240	1350	1350	75
Micromodem	10000	3000	80	≈ 0

Também diferentemente das redes de sensores terrestres, onde a troca de uma bateria ou a sua recarga através de energia fotovoltaica são atividades possíveis e até triviais, no caso de RASSA essas operações são muito difíceis e caras. A conversão fotovoltaica tem uma eficiência modesta mesmo em terra, e a luz solar penetra pouco no mar, tornando essa alternativa desprezível como fonte de energia subaquática. Por outro lado, trocar uma bateria de um nó de rede subaquática, mesmo a pequenas profundidades, é uma operação tão cara e operacionalmente complicada que pode inviabilizar o projeto de RASSAs.

Dessa forma, as limitações de energia são muito mais críticas nas RASSAs do que nas demais redes, pois as colisões nas transmissões acústicas são incomparavelmente mais danosas às RASSAs do que no caso das redes de sensores sem fio terrestres, pois esse desperdício pode consumir rapidamente a escassa energia dos nós, abortando prematura e definitivamente sua operação. Devido principalmente às diferenças de energia e latências entre as transmissões acústicas subaquáticas e eletromagnéticas terrestres, as soluções encontradas para minimizar as colisões nas transmissões em redes de sensores sem fios terrestres não podem, automaticamente, ser aproveitadas na comunicação acústica subaquática.

Assim, das áreas de pesquisa em RASSA que mais têm concentrado esforços dos pesquisadores, a de protocolos MAC tem sido objeto de uma parte expressiva dos artigos publicados recentemente [29–39].

2.5.2 Métodos de acesso múltiplo ao meio

O método FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) é o mais simples de todos e divide a faixa de frequências disponível em sub-faixas e as atribui a usuários individuais. Nas experiências do *SeaWeb* descritas por RICE *et al.* [40] em 1998

e 1999 foi usado esse método devido a limitações dos modems da época. Mas é consenso que, devido à limitada banda de frequências disponível do canal acústico, esse método não é o mais eficiente para comunicação nas RASSA.

O método TDMA divide o tempo disponível da comunicação em intervalos fixos e subsequentes (*time slots*), destinados à exclusiva transmissão seqüencial dos nós, num esquema de multiplexação no tempo. Durante cada *time slot* o canal acústico fica reservado para transmissão de dados de apenas um dos nós da rede. Para garantir ausência de colisões há necessidade de uma margem de segurança (*TGI*, de *Time Guard Interval*) entre os *time slots* sucessivos. Essa margem de segurança é proporcional ao atraso existente no canal. Além disso, para o correto funcionamento desse método de acesso, há necessidade de um mínimo de sincronismo entre os nós da rede. A Figura 2.9 ilustra a dinâmica desse método de acesso.

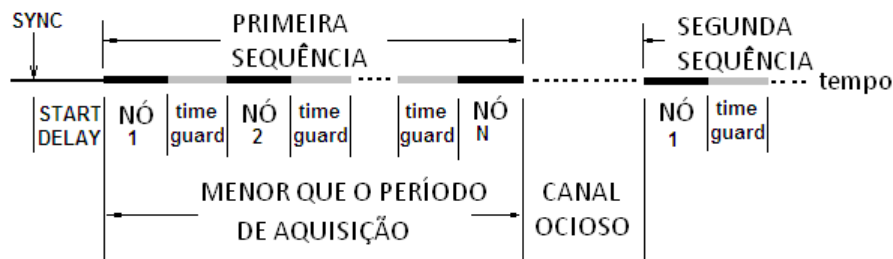


Figura 2.9: Representação temporal do método de acesso TDMA.

A elevada latência presente na comunicação acústica implica a necessidade de margens de segurança muito grandes, o que limita a eficiência da comunicação com o uso desse método de acesso nas RASSAs. Além disso, a maneira de garantir um mínimo de sincronismo entre os nós subaquáticos ainda é uma questão em investigação. Desse modo, o método TDMA só é seguro se a aplicação tolerar longos *Time Guard Intervals*, compatíveis com a precisão do sincronismo disponível.

O método CDMA (*Code Division Multiple Access*) permite a transmissão simultânea de vários usuários na mesma faixa de frequências. Os sinais são distinguidos através de códigos de pseudo-ruído que são usados para espalhar por todo espectro disponível as mensagens de cada usuário. Esse método é resistente ao desvanecimento seletivo de frequências decorrente da propagação em múltiplos percursos, como ocorre nas RASSAs, em especial em águas rasas. O método para espalhamento no espectro pode ser o FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*), usando FSK (*Frequency Shift Keying*) para baixas taxas de transmissão e o DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), usando PSK (*Phase Shift Keying*) para altas taxas.

2.5.3 Protocolos MAC

Descrição dos principais protocolos MAC

Sozer *et al.* fazem em [2] uma revisão sobre os principais protocolos MAC para redes sem fios, resumidamente descritos a seguir.

O mais simples dos protocolos de controle de acesso ao meio é o ALOHA, cujo funcionamento é baseado na transmissão aleatória da informação assim que estiver disponível. Caso bem sucedida o emissor receberá um ACK do destino confirmando o recebimento. Caso contrário, o emissor tentará retransmitir o pacote. Devido à independência e aleatoriedade das transmissões há colisões e a máxima vazão teórica é de 18 % da máxima *throughput*. Um melhoramento ao ALOHA foi a introdução de *slots* de tempo para disciplinar as transmissões, gerando o *slotted ALOHA*, o que aumentou a vazão teórica para 36 % da máxima *throughput*.

O CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) foi uma maneira encontrada para minimizar as colisões. Consiste em escutar o meio antes de tentar uma transmissão. Entretanto, esse método não elimina as colisões pois não tem como lidar com a questão do nó oculto. O nó oculto ocorre quando numa transmissão de A para B (Figura 2.10), um terceiro nó C estiver no alcance de transmissão de B mas não ao alcance de A. Por não ouvir a transmissão de A para B, C pode transmitir ao mesmo tempo, causando colisão em B (nó A oculto a C). O CSMA também causa o problema do nó exposto, que ocorre quando B transmite para A na presença de C; como C está ao alcance de B, terá sua transmissão inibida, mesmo se quiser transmitir a nós diferentes de A e B (nó C exposto a B).

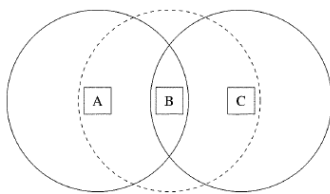


Figura 2.10: Problema dos nós exposto e oculto.

Diversos protocolos MAC para redes sem fios são derivados do MACA (*Multiple Access with Collision Avoidance*). Esse protocolo, proposto por KARN em [41], usa dois pacotes de sinalização, o RTS (*Request to Send*) e o CTS (*Clear to Send*). Quando um nó A deseja enviar uma mensagem ao nó B, inicia o protocolo com o envio de um RTS ao nó B, que ao recebê-lo responde com um CTS. Ao receber o CTS o nó A inicia então a transmissão dos dados.

O MACAW (*MACA-Wireless*), um melhoramento do MACA, foi proposto por BHARGHAVAN *et al.* [42] com a transmissão de um quadro ACK (*Acknowledgment*)

após cada recepção bem sucedida, com o que possibilita à origem retransmitir pacotes que não tenham sido corretamente recebidos pelo destino (Figura 2.11(a)). Apesar da sobrecarga introduzida, o ganho obtido na vazão é compensatório. 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 (Figura 2.11(b)). Esse esquema é inconveniente pois desperdiça energia quando o nó destino, apesar de ativo, estiver temporariamente impossibilitado de responder. Para contornar esse problema em [14] DOUKKALI e NUAYMI propõem acréscimo de um pacote de WAIT a ser usado pelo destino quando estiver temporariamente impossibilitado de atender a um RTS (Figura 2.11(c)).

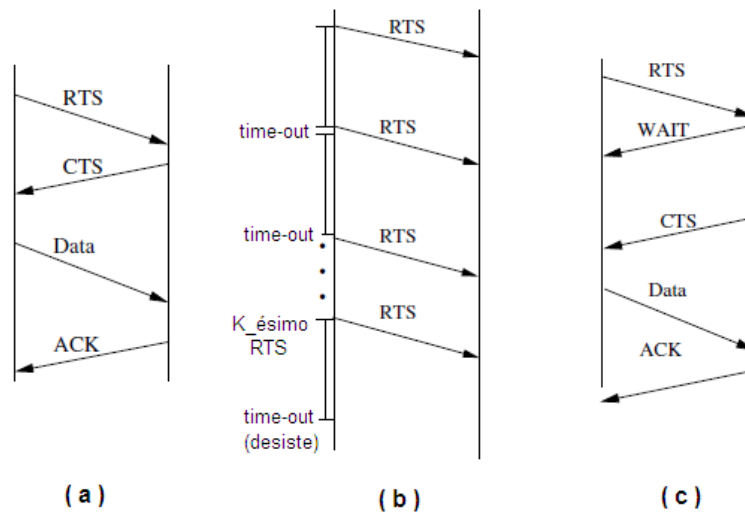


Figura 2.11: Esquemas de RTS x CTS x ACK.

Uma importante característica das soluções que usam RTS e CTS é a dos nós poderem testar o canal durante essa troca de RTS e CTS, o que é muito conveniente para as RASSAs, por possibilitar a adequação das potências de transmissão ao mínimo necessário a obter comunicação confiável. Em [27] DOUKALLI *et al.* descrevem esse esquema (Figura 2.12): os nós transmitem o RTS e CTS, sempre com a potência máxima. Ao receber um RTS o nó destino envia, junto com o CTS, uma informação sobre a relação entre a potência recebida e a potência mínima que necessita para decodificar corretamente os sinais recebidos (r_1). De posse dessa informação o nó que enviou o RTS pode então dosar a potência necessária e suficiente para enviar dados de forma confiável àquele nó. Ao enviar o pacote de dados, o nó que iniciou a comunicação envia também a informação da relação entre a potência do CTS recebido e a potência mínima de que necessita para decodificar corretamente os sinais (r_2). Dessa forma o nó destino também pode dosar a potência de suas transmissões ao nó que iniciou a comunicação. Assim os nós da rede podem gerar uma tabela dinâmica com as potências necessárias às transmissões aos seus

vizinhos.

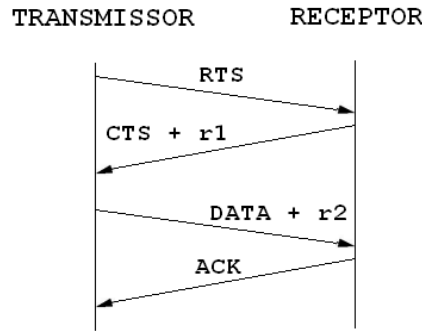


Figura 2.12: Teste de potências durante troca de RTS e CTS.

A solicitação de repetição automática, ARQ (*Automatic Repeat Request*), é usada para detectar erros na camada de enlace e requisitar automaticamente a retransmissão de quadros com erros. Na sua forma mais simples, o emissor aguarda um ACK do destino para prosseguir nas transmissões (*Stop-and-Wait*). No esquema conhecido por *Go Back N*, o emissor envia pacotes seguidos sem aguardar ACKs. Os pacotes são numerados e o envio de um ACK pelo destino referente a um determinado pacote significa que recebeu corretamente todos os precedentes. Se a fonte não recebe um ACK para determinado pacote, reinicia as transmissões a partir dele. A recepção dos pacotes em ordem limita a necessidade de *buffer* ao tamanho de um pacote no receptor. Se o receptor dispuser de *buffer* poderá implementar um esquema conhecido como *Repetição Seletiva* no qual apenas os pacotes com erros são retransmitidos, sendo essa a forma mais eficiente de implementar a ARQ.

CREBER *et al.* [43] fazem uma avaliação do desempenho desse esquema de solicitação automática de repetição seletiva. Esse esquema foi usado nas experiências do *SeaWeb*. O digrama da Figura 2.13, reproduzido de [44], detalha um exemplo da dinâmica do protocolo com um esquema de requisição de repetição seletiva múltipla.

O protocolo FAMA (*Floor Acquisition Multiple Access*) [45] 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. Foi mostrado que 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 [37]. Embora esse esquema garanta ausência de colisões, para o caso das RASSAs representa um desperdício de energia devido aos elevados atrasos de propagação.

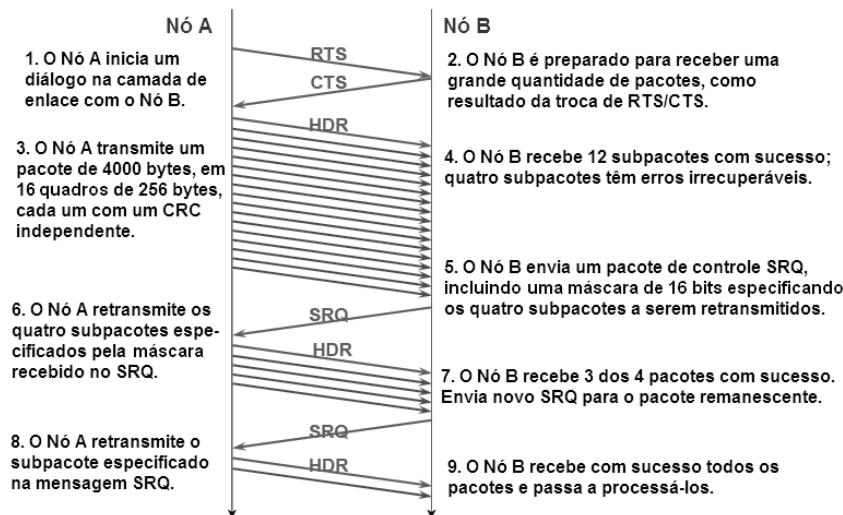


Figura 2.13: Solicitação automática de repetição seletiva múltipla.

Adaptações para RASSAs

Baseadas nesses três protocolos (MACA, MACAW e FAMA) foram apresentadas diversas propostas de adaptação para uso nas RASSAs. O *Slotted FAMA* foi proposto por MOLINS e STOJANOVIC em [37], acrescentando *slots* de tempo ao esquema proposto no FAMA original, visando 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*. Entretanto os autores desconsideram que o sincronismo entre nós de RASSA é uma questão em aberto e não explicam como contornar essa limitação para uso do protocolo proposto.

Uma outra abordagem visando limitar os efeitos da longa duração da troca dos pacotes de RTS e CTS é apresentada por PELEATO e STOJANOVIC em [33], na qual a temporização do *handshake* é proporcional à separação dos nós envolvidos na comunicação.

O UW-MAC é um protocolo de acesso ao meio proposto por POMPILI *et al.* em [46] que usa como método de acesso o CDMA em portadora única, no qual o transmissor usa um algoritmo de controle da transmissão para adequar a potência e o tamanho dos pacotes visando minimizar o efeito perto-longe (*near-far*). Esse problema ocorre quando um nó se comunica com outros dois, um próximo e outro distante. A comunicação com o nó distante ficará prejudicada na presença da comunicação com o nó próximo (supondo todos com as mesmas potências de transmissão). O protocolo proposto proporciona baixa retransmissão de pacotes e, conseqüentemente, aumento da eficiência energética e autonomia de operação.

Em [31] RODOPLU *et al.* descrevem um protocolo MAC baseado em CSMA que visa eficiência no uso de energia e é denominado UWAN-MAC (de *UnderWater Acoustic Network MAC*). O protocolo poupa energia baseado num esquema de longos períodos de hibernação e curtos despertares coordenados (*duty cycle* de 0.004). Ao despertar, cada nó divulga o tempo em que permanecerá hibernando até o próximo despertar. Nós que desejem se comunicar com ele podem, então, programar seu despertar para coincidir com o dele e estabelecer a comunicação. Afirmam desperdiçar em colisões apenas 3% da energia transmitida, se cada nó dispuser de ao menos 5 nós vizinhos disponíveis a um salto.

SYED e HEIDEMANN apresentam em [29] a proposta do T-Lohi³, um protocolo baseado em contenção, no qual os nós disputam o meio para transmissão de seus dados. Poupa energia de duas formas: alocação de canal para evitar colisão no campo de dados e uso de receptor de baixíssimo consumo para identificar 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 a mensagem no meio é a ele destinada, processando-a 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 equânime. Simulações executadas em um simulador desenvolvido pelos próprios autores indicam uma sobrecarga de apenas 3 a 9% em relação à eficiência energética ótima (obtida com a transmissão de um pacote ponto a ponto, sem o protocolo) e boa taxa de utilização do canal, cerca de 30% da máxima teórica. A proposta, entretanto, ainda não foi testada em experimentos reais.

Em [14] DOUKKALI E NUAYMI fazem um levantamento comparativo entre as diversas propostas de protocolo MAC para redes subaquáticas. Os autores analisam os protocolos propostos em [2], [47], [48], [49] e [50] em seus aspectos de princípio de funcionamento, atraso, consumo de energia, conectividade dos nós, fazendo comentários sobre as particularidades de cada um.

³Tone-Lohi, onde *Lohi* significa *lento* em havaiano.

2.5.4 Protocolos de roteamento

Os protocolos de rede podem ser genericamente classificados em três grupos, como pró-ativos, reativos e geográficos.

Os pró-ativos (DSDV, OLSR) são baseados na atualização e divulgação periódica das tabelas de roteamento, com rotas definidas entre todos os nós da rede. Assim as rotas estão sempre atualizadas, mas esse procedimento consome banda e energia, às vezes para manter rotas que nunca são usadas. Esses tipos de protocolos não são adequados às RASSAs pois implicam uma grande sobrecarga devido à contínua atualização das tabelas de roteamento, desperdiçando energia.

No caso dos protocolos reativos (AODV, DSR) a fonte inicia a descoberta da rota ao destino, quando e se necessário. Embora acarretem maior latência na descoberta de rotas implicam menor sobrecarga. Entretanto, também necessitam inundar a rede com pacotes de controle para descoberta das rotas, o que também os torna inadequados para uso nas RASSAs.

O roteamento geográfico tem por base as coordenadas dos nós para definição das rotas e necessitam de poucos pacotes de controle, sendo muito eficientes e de baixo consumo. Entretanto, a localização dos nós nas RASSAs ainda é uma questão a ser resolvida, já que no ambiente submerso não há um sistema de posicionamento global, como o GPS para instalações terrestres[11, 51–53].

Assim, nenhuma dessas três classes de protocolos de rede é inteiramente adequada às características e limitações das transmissões acústicas.

De qualquer forma, devido à diminuição da banda do canal acústico com a distância transmissor-receptor, STOJANOVIC et *al.* demonstraram [2] que teoricamente o consumo total de energia de uma rede, quando os nós encaminham seus dados ao nó sorvedouro através de múltiplos e pequenos saltos, é menor do que se todos os nós transmitissem seus dados diretamente ao nó sorvedouro. Daí a conveniência de se pesquisar e desenvolver protocolos de rede.

Entretanto, dado que o maior problema ainda é o de controle de acesso ao meio, poucas propostas têm sido apresentadas para roteamento em RASSA. Algumas dessas propostas são descritas a seguir.

Em [54] XIE e GIBSON propõe um protocolo baseado em controle centralizado, no qual um nó mestre gera uma topologia em árvore e atualiza os parâmetros dos nós a intervalos fixos através de pacotes de controle, permitindo inclusão de novos nós e exclusão de nós em falha. Aponta três aspectos chaves numa RASSA: controle da topologia, determinação das rotas e controle de acesso ao meio. O nó mestre usa diversos códigos CDMA para descobrir seus vizinhos mais próximos, que replicam esse procedimento para ir descobrindo os vizinhos dos vizinhos até descobrir toda a topologia. Com isso o nó mestre consegue descobrir todos os nós e determinar todas

as rotas possíveis, bem como as potências necessárias à comunicação em cada enlace e a reserva de energia de cada nó, possibilitando um efetivo gerenciamento dos recursos da rede. Todo esforço computacional do cálculo das rotas e do gerenciamento da rede fica com o mestre. A cada nó é atribuído um código CDMA e cada nó tem que escutar todos os demais códigos, o que implica em múltiplos transdutores. As potências de transmissão dos nós é limitada, visando economia de energia e reuso espacial do código CDMA. Não há resultados de simulações, muito menos de dados experimentais para comprovar a validade da proposta.

Dois protocolos de roteamento para RASSAs tridimensionais são descritos por POMPILI e MELODIA em [55], para aplicações sensíveis e não sensíveis a atrasos. Para aplicações não sensíveis a atrasos é proposto um algoritmo distribuído no qual cada nó tem liberdade de selecionar o próximo salto visando economizar energia, considerando as variações do canal acústico. Para isso qualifica os enlaces de acordo com o número de retransmissões necessárias a obter sucesso nas transmissões em cada um. Para aplicações sensíveis a atrasos é proposto um algoritmo centralizado. A solução é baseada nas informações de topologia agregadas por uma estação de superfície que configura de maneira otimizada as rotas baseada em técnica de roteamento por circuito virtual. A performance dos algoritmos propostos é avaliada através de simulação, mostrando atingir os resultados esperados.

Em [56] XIE *et al.* propõe um protocolo geográfico, pressupondo que os nós têm recursos para identificar continuamente suas coordenadas espaciais. O VBF (*Vector-Based Forwarding Protocol*) define uma região cilíndrica ao redor do vetor que liga fonte e destino (Figura 2.14, reproduzida de [56]). Os nós no interior desse cilindro são classificados em função da melhor posição (mais próximo ao eixo) para repassar as mensagens entre fonte e destino. Essa classificação é feita baseada na distância do nó ao eixo e no ângulo de chegada da mensagem a ser encaminhada, com o que o nó calcula sua adequabilidade a participar da rota ao destino. Nós fora dessa região cilíndrica, ou aqueles cujas adequações forem menores que a de outros vizinhos, descartam o pacote. Assim, apenas alguns nós participam da rota. A adequabilidade é calculada a cada pacote recebido, tornando o protocolo adequado às redes com nós móveis. O ponto questionável dessa proposta é que, além de ter que identificar o ângulo de chegada da mensagem a ser encaminhada, ela parte do princípio de que os nós conhecem sua posição continuamente. A localização de nós móveis no ambiente subaquático ainda é um assunto em investigação e embora a proposta seja interessante, dificilmente poderá ser implementada com o que se dispõe hoje.

Uma melhoria ao VBF foi proposta por NICOLAOU *et al.* em [57]. Os autores citam como desvantagem do VBF o fato de que em redes esparsas pode ocorrer o fato de não haver nós suficientes no cilindro ao redor do vetor fonte-destino, embora

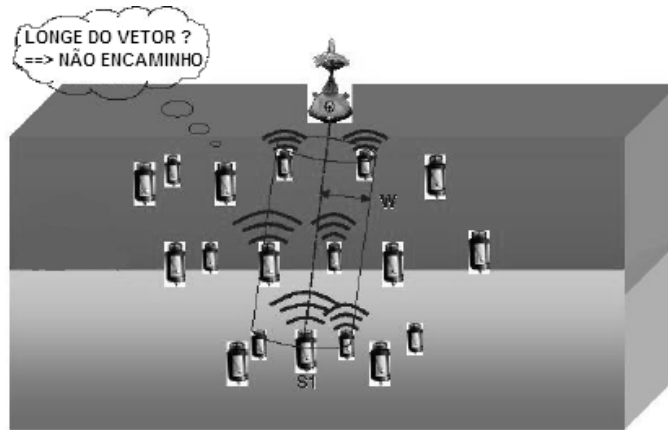


Figura 2.14: Funcionamento do protocolo VBF.

possa haver nós nas proximidades capazes de criar um caminho alternativo, apesar de mais longo. Outra limitação do VBF é a escolha do diâmetro do cilindro ao redor do vetor, que define o limiar para identificação dos nós elegíveis a participar da rota. Segundo os autores, devido à irregularidade da distribuição dos nós das RASSAs essa escolha não é trivial, sendo um limitante à aplicação daquele protocolo. Para contornar esses inconvenientes, usando também o princípio geográfico, propõe o HH-VBF (*Hop-by-Hop Vector-Based Forwarding Protocol*). O princípio é o mesmo do VBF, só que o vetor considerado não é mais fixo, entre fonte e destino da mensagem, mas sim entre o último nó que encaminhou a mensagem e o destino. Dessa forma o vetor muda dinamicamente a cada salto. O nó que recebe um pacote a ser encaminhado analisa o vetor, verificando se de sua atual posição é o único nó ou o mais adequado ao encaminhamento da mensagem, encaminhando-a se for esse o caso, ou descartando-a, caso contrário. Embora essa proposta resolva os problemas apontados no VBF, também se baseia na capacidade dos nós em conhecer continuamente suas coordenadas e na identificação do ângulo em que recebem a mensagem para efetuar os cálculos, sendo igualmente de difícil implementação prática.

2.6 Simulação para RASSAs

Boa parte dos trabalhos publicados na área de RASSA apresentam resultados analíticos e pouquíssimos com resultados experimentais. Dos que apresentam resultados de simulação, nem todos informam detalhes da ferramenta/configuração de simulação usada e dos que descrevem um pouco melhor a simulação, o fazem com dados obtidos em simuladores desenvolvidos pelos próprios pesquisadores, ou em adaptações no NS2, sem maiores detalhes sobre a modelagem da comunicação acústica ([28, 32–34, 37, 39, 56–61]).

Para RASSA não há ainda um padrão de simulação de consenso. A principal dificuldade consiste na modelagem da comunicação acústica, que tem características absolutamente distintas do canal eletromagnético terrestre. Essa lacuna dificulta o desenvolvimento de protocolos por não permitir uma avaliação comparativa confiável da performance das inúmeras propostas apresentadas, especialmente para os protocolos MAC e de rede, por não haver ainda uma referência de simulação consolidada e amplamente aceita.

Uma iniciativa no sentido de prover módulos para simulação de RASSA no NS-2 vem sendo desenvolvida pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Pádova, Itália (<http://www.dei.unipd.it>). Essa iniciativa baseia-se na modelagem do canal acústico descrito por HARRIS e ZORZI em [25].

Nesta modelagem os autores dividem as funções e características do canal acústico e da camada física em 4 componentes do NS-2: propagação, canal, meio físico e modulação, conforme mostrado na Figura 2.15, reproduzida de [25].

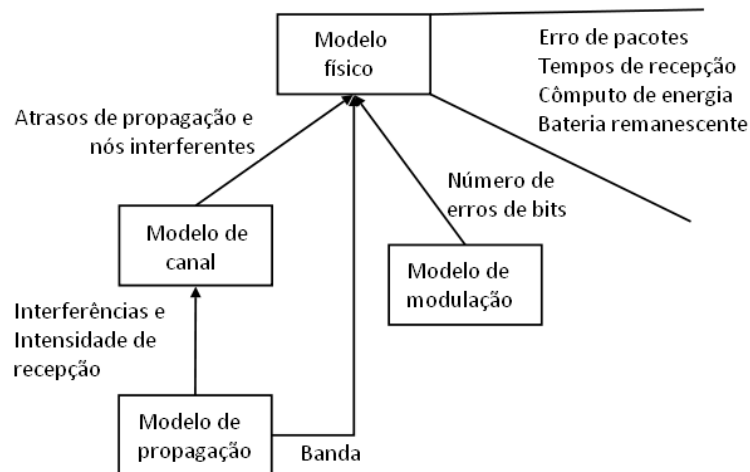


Figura 2.15: Modelo do canal e da camada física no NS-2.

O modelo de propagação calcula a relação S/R no receptor e a abrangência da interferência das transmissões com base nas características da atenuação do sinal acústico e no ruído ambiental. A atenuação total é calculada com base nas perdas por espalhamento e nas perdas por absorção, segundo a aproximação de Thorp [19]. O modelo de propagação considera as 4 fontes tradicionais de ruído: turbulências, embarcações, vento e ruído térmico [18], permitindo atribuições de pesos diferentes a cada uma dessas fontes para adequar o modelo aos diversos cenários possíveis do ambiente subaquático.

Como a atenuação do sinal acústico depende da frequência, o modelo calcula a frequência com a menor atenuação, com base na distância transmissor-receptor, para poder calcular a relação S/R no receptor. Calcula também a banda disponível para as distâncias transmissor-receptor, identificando as frequências nas quais a

atenuação é 3 dB maior que a mínima.

Para calcular a distância da interferência das transmissões o modelo usa a potência e a frequência de transmissão e um limiar de intensidade de sinal, abaixo do qual a interferência é considerada desprezível.

O modelo do canal calcula os atrasos de transmissão, com base nas características de velocidade variável do meio acústico subaquático. Leva em conta profundidades, temperaturas e salinidade do meio.

O modelo da camada física calcula estatísticas de recepção de pacotes, tempos de transmissão e atrasos de propagação.

O modelo requer informações sobre potência de transmissão, consumo de energia e definição de limiar de recepção. Esses valores variam de equipamento para equipamento e os valores padrões do modelo são estabelecidos com base no modem acústico WHOI [26].

O modelo de modulação é responsável pelo cálculo das taxas de transmissão e da taxa de erros de bits, com base na intensidade dos sinais e na modulação utilizada.

HARRIS e ZORZI descrevem essa modelagem e sua verificação em [25], apresentando resultados na avaliação de ruído, atrasos de propagação, banda passante, frequências ótimas e potências de transmissão em função das distâncias transmissor–receptor.

Os resultados evidenciam a importância dessa iniciativa e indicam a necessidade de aperfeiçoamento do modelo, para incluir interferências de múltiplas reflexões, cálculo de zonas de sombra etc.

No Capítulo 4 apresentam-se dois resultados de simulação no NS-2 usando essa modelagem, confirmando sua validade e coerência com a teoria de comunicação acústica subaquática.

O *World Ocean Simulation System (WOSS)* é outra proposta mais recente (Dezembro de 2009), apresentada por Guerra *et al.* [62], na qual os autores descrevem simulação baseada no NS-2 e no NS2-MIRACLE, [63] com modelo de propagação do software *Bellhop ray tracing*. Esta proposta agrega conhecimentos de perfis de velocidade, dados de batimetria e informações sobre os sedimentos do leito oceânico, obtidos de bancos de dados livres da Internet, para proporcionar à modelagem da comunicação acústica maior fidelidade às condições ambientais.

2.7 Centros de Pesquisa

Diversos centros de pesquisa têm desenvolvido trabalhos em RASSA, sendo os abaixo listados, os mais frequentemente citados na literatura e nos quais trabalham os principais pesquisadores da área:

- **MIT Sea Grant's AUV Lab** (auvlab.mit.edu): laboratório do *Massachusetts Institute of Technology, Sea Grant College Program*, dedicado ao desenvolvimento de robôs autônomos subaquáticos. Milica Stojanovic, uma das pesquisadoras com grande produção científica em RASSA, integra o corpo de pesquisadores dessa instituição;
- **Woods Hole Oceanographic Institution** (whoi.edu): maior organização privada sem fins lucrativos na área de pesquisa oceanográfica. Seu *Ocean Acoustic Lab* (www.oal.whoi.edu) desenvolve diversas pesquisas na área de transmissão acústica subaquática;
- **Underwater Acoustic Sensor Network** (www.ece.gatech.edu): projeto do *Broadband Wireless Networking Laboratories, School of Electrical and Computing Engineering, Georgia Institute of Technology*, constituído com o objetivo de desenvolvimento de soluções para comunicação *cross-layer* para aplicações em redes de sensores sem fio subaquáticos. Neste projeto trabalharam pesquisadores com reconhecimento internacional, com vasta produção científica em RASSA, tais como Ian F. Akyildiz, Dario Pompili e Tommaso Melodia;
- **Advanced Marine Systems Laboratories** (www.ome.fau.edu): da *Florida Atlantic University - Department of Ocean & Mechanical Engineering*, desenvolve pesquisas na área de veículos autônomos subaquáticos, sistemas de controle inteligentes e automação de navios oceanográficos;
- **Acoustic Research Laboratory** (arl.nus.edu.sg): da *National University of Singapore*, desenvolve pesquisas em 4 grandes áreas subaquáticas: novos sensores e processamento de sinais, veículos subaquáticos autônomos, comunicação acústica subaquática e rede, e bioacústica;
- **Sensor Network for Undersea Seismic Experimentation** (www.isi.edu/ilense/snuse): é um projeto do *Information Sciences Institute* da *University of South California* voltado para o desenvolvimento de sensores, adaptação de redes de sensores para comunicação acústica subaquática e desenvolvimento de protocolos para operação com *duty cycles* ultra longos. Conta com pesquisadores com reconhecimento internacional, tais como John Heidemann, Yuan Li, Affan A. Syed, e We Ye;
- **Autonomous Ocean Sampling Network** (www.mbari.org/aosn): é um projeto do *Montrey Bay Aquarium Research Institute* que usa robôs subaquáticos autônomos para efetuar observações marinhas, com a transmissão dessas informações para instalações terrestres a intervalos regulares;

- **Autonomous Undersea Systems Institute** (www.ausi.org): Instituto de pesquisa sem fins lucrativos concentrado na promoção de aplicações comerciais para AUVs, plataformas e sensores.

2.8 Conclusões do Capítulo

Neste Capítulo foram apresentados conceitos essenciais e revisão bibliográfica sobre RASSAs, com o foco nas características do canal acústico, já que, embora outros meios de comunicação como o eletromagnético e o óptico sejam possíveis no ambiente subaquático, é a transmissão acústica a que é efetivamente empregada para comunicação em RASSAs. Do canal acústico foi enfatizado:

- **Velocidade de propagação:** é baixa, provocando grande latência na comunicação. Além disso, varia com a profundidade;
- **Banda disponível:** além de estreita, limitando as taxas de transmissão a poucos kbps, é dependente da distância transmissor-receptor;
- **Frequência ideal de transmissão:** devido aos efeitos da atenuação, conjugados com as características dos ruídos subaquáticos, a frequência central da banda disponível no canal acústico, além de baixa, também muda com a distância transmissor-receptor. Na prática os sistemas usam frequência abaixo de 30 kHz;
- **Trajetórias:** devido aos efeitos da refração provocados pelo perfil de velocidade do som no mar, as trajetórias dos sinais acústicos podem ser curvilíneas, podendo gerar os efeitos de “zonas de sombra” e “zonas de convergência”;
- **reverberações:** ocorrem em águas rasas devido a múltiplas reflexões na superfície e no leito oceânico, causando aumento da interferência intersímbolos nas transmissões digitais;
- **Consumo de energia:** foi enfatizado que o consumo de energia para transmissões acústicas é muito maior do que para as transmissões eletromagnéticas terrestres, pois os sinais acústicos são gerados através de vibrações mecânicas das partículas do meio.

Devido a essas características, grande parte do esforço atual de pesquisa se concentra no desenvolvimento de protocolos MAC, cujas principais propostas foram apresentadas. As propostas para protocolos de rede ainda estão em fase inicial, já que dependem de soluções para sincronismo e localização para seu desenvolvimento.

O Capítulo também apresentou as classificações das RASSAs, principais propostas de aplicações, considerações sobre taxas de transmissão e alcances típicos da comunicação acústica, e relacionou os principais centros de pesquisa.

Foi abordado também estudo de modelagem da comunicação acústica com vistas a simulações no NS-2.

No Capítulo 3 o conteúdo dessa revisão bibliográfica é usado para definir requisitos a observar na implementação de aplicações com emprego de RASSAs.

Capítulo 3

Requisitos para aplicações em RASSA

Neste Capítulo apresentam-se os requisitos a observar para viabilizar aplicações em RASSA, levando em conta que o meio de comunicação é o acústico. As limitações do canal acústico descritas no Capítulo 2 são lembradas para definir alguns limites a serem considerados na implementação de aplicações com RASSAs. Apresentam-se também cálculos sobre o volume e periodicidade de dados de sistemas para monitoração de reservatórios de petróleo, para demonstrar a necessidade de observância dos limites aqui identificados para projetos com RASSAs.

A seguir relacionam-se os requisitos indicados:

- **Taxas de transmissão:** é necessário ter em conta que a taxa de transmissão possível na comunicação acústica subaquática é limitada pelas características de propagação no meio. Conforme descrito no Capítulo 2, embora haja diversas pesquisas visando aumentar as taxas de transmissão dos modems acústicos, na prática não se deve considerar taxas de transmissão acima de 5 kbps. Embora aparentemente conservador, esse limite é o que hoje se pode dispor com segurança em modems comerciais, para comunicação a distâncias úteis. Um exemplo é o UWM4000 da LinkQuest (<http://www.link-quest.com>), cujas principais especificações estão na tabela 3.1. Taxas maiores são possíveis, porém em condições especiais e apenas a curtas distâncias;
- **Distância entre nós:** devido à dependência da banda do canal acústico com a distância transmissor-receptor, essa distância não deve exceder 5 km. À distância de 5 km a banda disponível do canal acústico é de apenas aproximadamente 10 kHz, o que, dependendo da modulação empregada limita a taxa de transmissão de dados a poucos kbps. Em modulação BPSK, por exemplo, a máxima taxa teórica seria de 10 kbps, mas na prática essa taxa é de menos de 5 kbps, conforme especificações do UWM4000, tabela 3.1. Além

disso, distâncias maiores entre transmissor e receptor, além de expor as transmissões a mais ruídos, requerem mais potência, o que contraria o requisito de baixo consumo de energia. Distâncias maiores, quando necessárias, podem ser atendidas com roteamento em múltiplos saltos;

Tabela 3.1: Principais especificações do modem acústico UWM4000.

Parâmetro	Valor
<i>Link</i> acústico	8.000 bps
Taxa de Transmissão RS-232	4.800 bps
Taxa útil (<i>Payload</i>)	3.200 bps
Distância de operação	4.000 m
Taxa de Erro de Bits	10^{-9}
Profundidade máxima	3.000 m ou 7.000 m
Consumo em TX	7 W
Consumo em RX	0.8 W
Consumo em repouso	8 mW
Frequência de operação	12,75 kHz a 21,25 kHz
Alimentação	12 a 28 V

- **Volume e periodicidade da geração dos dados:** para ser compatível com as taxas de transmissão realizáveis na comunicação acústica, uma aplicação, para ser implementável com RASSA, não pode gerar grandes volumes de dados. Por dois motivos: grandes volumes de dados exigem grande consumo de energia da rede, esgotando-a rapidamente, e ocupam muito tempo do canal acústico, limitando a escalabilidade da rede em relação ao número de nós. Pequenos pacotes de dados têm maior probabilidade de sucesso na transmissão acústica, devido à menor exposição às interferências do meio. Pacotes de dados de 1 kByte podem comportar muita informação útil proveniente de sensores de uma RASSA e são suficientes para coleta da maior parte dos dados oceanográficos citados na introdução deste trabalho.

Além disso, as amostragens devem ser tão espaçadas quanto possível, ou seja, a aplicação deve ter um *duty cycle* tão pequeno quanto possível. Os parâmetros oceanográficos não se alteram com muita rapidez, sendo possível obter boa representatividade de seus valores com amostragens de até uma hora. Esse *duty cycle* pequeno contribui para economia de energia e para preservação do uso do canal acústico, proporcionando aumento na escalabilidade da RASSA em relação ao número de nós.

A combinação de curtos pacotes de dados e *duty cycles* pequenos permitem o uso de TDMA como método seguro de controle de acesso ao meio;

- **Modo de operação:** os nós das RASSAs são alimentados por baterias, cuja

substituição ou recarga é difícil. A preservação de energia deve ser buscada com prioridade no projeto de RASSAs. Para essa finalidade, aplicações que tolerem esquemas de hibernação/despertar com pequenos *duty cycles* são as mais adequadas para implementação com emprego de RASSAs. Há diversas propostas de protocolos MAC nesse sentido [28, 29, 31, 58, 64].

Da mesma forma, aplicações que tolerem operações intermitentes, como no esquema de RTAIs, também são mais facilmente implementáveis por RASSA, a exemplo das experiências descritas por VASILESCU *et al.* em [13]. A possibilidade de usar comunicação óptica para resgate dos dados dos nós da RASSA pela visita periódica de um AUV é um enorme atrativo e torna essa classe de RASSA efetivamente viável. Podendo conviver com a necessidade de proximidade para efetuar a comunicação, o meio óptico, além de proporcionar altas taxas de transmissão, consome pouca energia, reservando a energia do nó preferencialmente para os circuitos de aquisição e armazenamento de dados, contribuindo para o aumento do tempo de operação da RASSA;

- **Mobilidade:** embora haja grande atrativo para RASSAs com nós móveis, a mobilidade dos nós é um complicador para a comunicação acústica, o que ainda representa um grande desafio para implementação de RASSAs compostas exclusivamente por nós móveis. Aplicações com nós fixos são as adequadas para implementação com emprego de RASSA, por facilitarem o cômputo dos atrasos de transmissão, desenvolvimento de protocolos de controle de acesso ao meio, sincronismo e roteamento;
- **Sincronismo:** o sincronismo é importante para minimizar as colisões das transmissões visando economia de energia. Conforme descrito no Capítulo 2, o sincronismo em RASSA ainda é outra questão em aberto e um grande desafio. As soluções apresentadas implicam consumo de energia, pela necessidade de troca periódica de mensagens entre todos os nós da rede. A grande latência na comunicação acústica impede o desenvolvimento de protocolos que proporcionem sincronismo de grande precisão. Assim, aplicações que dispensem sincronismo preciso são as mais apropriadas às RASSAs. No Capítulo 5 discute-se a viabilidade de uso do movimento das marés como elemento de sincronismo para RASSAs;
- **Roteamento:** conforme descrito no Capítulo 2, o uso de múltiplos saltos melhora a eficiência energética das transmissões pois, devido à dependência da banda disponível em relação à distância transmissor-receptor, múltiplos saltos a pequenas distâncias são preferíveis a um único salto a longa distância [2, 65]. Entretanto, roteamento em RASSA ainda é também um assunto em estudo,

conforme pode se depreender das propostas analisadas no Capítulo 2. Devido às dificuldades de localização, sincronismo e implementação de protocolos MAC, os protocolos de rede propostos não são totalmente adequados a RASSAs, principalmente devido ao dispêndio de energia que requerem para a periódica atualização de rotas. Assim, aplicações que tolerem roteamento estático são as mais apropriadas para implementação usando RASSA. Levando em conta que os nós são fixos, o roteamento pode ser planejado na implantação da rede e alterado através de intervenção humana sempre que se fizer necessário.

Portanto, resumindo, aplicações elegíveis para a implementação usando RASSA, com a tecnologia hoje disponível devem: gerar pequenos pacotes de dados, com a maior periodicidade possível, ser composta por nós fixos, não requerer sincronismo com muita precisão e tolerar roteamento estático.

Evidentemente, o não atendimento a esses requisitos não implica necessariamente a inviabilidade total da aplicação. Os requisitos sinalizam apenas que, ao serem observados, facilitam a implementação de aplicações com RASSAs, com o que se dispõe hoje.

3.1 Monitoração de reservatórios de petróleo

Em [5] Heidemann *et al.* indicam a utilidade que as RASSAs teriam para monitoração sísmica de reservatórios de petróleo *offshore*. De fato, a aplicação seria de enorme interesse para essa atividade, mas suas características inviabilizam sua realização com emprego de RASSAs, conforme a seguir se demonstra.

A monitoração da evolução de reservatórios de petróleo é usada para controles operacionais na produção dos campos e é feita com uma técnica denominada “4D”. Essa técnica consiste no registro periódico de perfis sísmicos “3D” do campo sob avaliação para, através de suas comparações no tempo, poder avaliar a evolução das reservas. A técnica ficou conhecida como sísmica “3D” por proporcionar uma visão tridimensional das camadas de rocha da subsuperfície sob pesquisa. A técnica de registro sísmico “3D” consiste na geração artificial de pequenos abalos sísmicos provocados na superfície do oceano por meio de potentes canhões de ar comprimido, instalados em embarcação apropriada. Esses abalos geram vibrações mecânicas que se propagam pelo mar e penetram nas rochas do subsolo. Parte delas, refletidas nas interfaces das rochas, retorna à superfície, onde são registradas por sensores apropriados, dispostos num *grid*, instalados em cabos rebocados pela embarcação de registro, a mesma embarcação que contém os canhões de ar comprimido. A Figura 3.1 ilustra esse método de pesquisa.

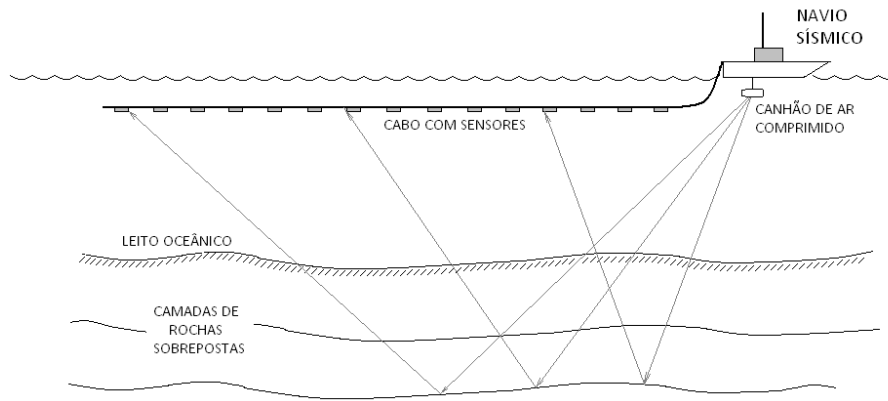


Figura 3.1: Aquisição de dados sísmicos marítimos.

Com a análise do tempo de trânsito dessas vibrações mecânicas, associadas às posições relativas entre a fonte dos abalos e a dos receptores é possível gerar uma imagem das camadas do subsolo, com o que os geofísicos conseguem monitorar a evolução das reservas. Essa técnica é a mais empregada para essa finalidade, mas a dificuldade em se garantir a repetibilidade das posições da fonte e dos receptores entre uma campanha e outra é uma deficiência considerável.

Um alternativa a essa técnica é a fixação dos sensores no leito oceânico, interligados numa malha por cabos. Essa técnica é conhecida como OBC (de *Ocean Bottom Cable*). Neste caso, há duas embarcações: uma que percorre a área de interesse, gerando os *disparos*¹ em linhas pré-definidas, e outra, para registro dos dados, conectada aos cabos que interligam os nós sensores instalados no leito. Neste caso, o sincronismo entre a geração dos disparos e o registro dos dados é obtido através de comunicação via rádio. Essa técnica é preferível à anterior, já que garante repetibilidade total quanto à posição dos sensores. Entretanto, embora venha sendo muito empregada, apresenta o inconveniente operacional de ter que interconectar com cabos todos os nós da rede e ainda deixar uma bóia com a ponta do cabo da rede de sensores para conectar, periodicamente, os equipamentos de registro a cada nova campanha.

Cada nó dessa malha é composto de 4 sensores (um de pressão e 3 de vibração). É comum efetuar registros de até 400 nós sensores, simultaneamente. Cada sensor de cada nó precisa registrar os sinais de pressão e vibração com uma resolução de 24 bits, a cada 2 milissegundos, durante 10 segundos, para cada disparo gerado. Para obter uma cobertura eficiente neste cenário típico é necessário efetuar por volta de 40.000 disparos em cada campanha. Os disparos são gerados sequencialmente pela embarcação fonte, à medida que esta percorre a superfície sob a qual estão instalados os sensores e normalmente cada disparo ocorre a cada 20 segundos. A Figura 3.2

¹ *disparo* sísmico, usado como termo para identificar o instante de liberação dos abalos provocados pelos canhões de ar comprimido

ilustra essa técnica.

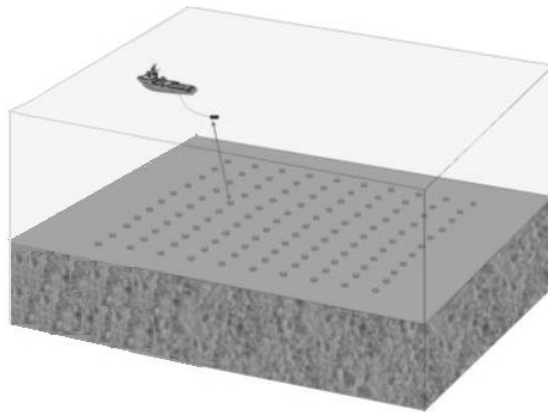


Figura 3.2: Aquisição de dados sísmicos com sensores no leito oceânico (OBC).

Como a técnica se baseia na análise dos tempos de trânsito das reflexões dos sinais sísmicos entre a fonte dos disparos e os receptores, o sincronismo para início dos registros em todos os nós da rede precisa ser muito preciso. Um valor típico para esse sincronismo é de 200 microssegundos.

A proposta de usar RASSA nessa aplicação consiste em fixar os nós sensores autônomos no fundo do mar, com comunicação acústica, deixando à embarcação a função de geração dos disparos e posterior coleta das informações registradas pelos nós da RASSA. Para isso é necessário encaminhar os dados de cada nó sensor a um nó sorvedouro, de onde possam ser resgatados. Entretanto essa proposta desconsidera que o volume de dados, sua taxa de geração e o sincronismo necessário aos registros tornam essa aplicação absolutamente inviável para RASSA, conforme se demonstra a seguir.

Para efeito de cálculos, consideremos um cenário real desse tipo de pesquisa composto por um *grid* quadrangular de 400 nós sensores equiespaçados de 300 m, instalados no leito oceânico e 40.000 disparos na superfície, sobre esses nós sensores, equiespaçados num *grid* de 50 m x 50 m. Cada registro sísmico é composto de 4 sinais, amostrados a 2 milissegundos, com 24 bits de resolução e com tempo de registro de 10 segundos. Isso implica um volume de dados de 24 MBytes por disparo. Considerando os 40.000 disparos, tem-se um total de 960 GBytes de dados por campanha, uniformemente distribuídos pelos nós da rede (2,4 GBytes/nó), sem considerar *overheads* de cabeçalhos de registro, protocolo de roteamento e bytes para controle de erros.

Para encaminhar os dados de uma campanha de um único nó dessa rede a um nó sorvedouro – na melhor condição desse encaminhamento necessitar de apenas um único salto – mesmo que considerássemos a hipótese de conseguir nessa comunicação

uma taxa de transmissão de 100 kbps, seriam necessários:

$$\frac{(2,4 \times 8 \times 10^9)bits}{(100 \times 10^3 \frac{bits}{s})} = 192 \times 10^3 s. \quad (3.1)$$

ou seja, mais de 53 horas horas de transmissão, para encaminhar os dados de um único nó sensor ao nó sorvedouro, num único salto. Sem considerar os múltiplos saltos necessários aos nós mais afastados do sorvedouro, para encaminhar os dados dos 400 nós sensores da rede ao nó sorvedouro, um por vez, seriam necessários:

$$(192 \times 10^3 s) \times 400 = 76,8 \times 10^6 s. \quad (3.2)$$

ou seja, quase 900 dias, apenas para encaminhar os dados de todos os nós da RASSA ao sorvedouro. Ainda faltaria transmitir esses dados, do sorvedouro para a superfície. Hoje em dia, o intervalo entre campanhas de registro precisa ser tão pequeno quanto 3 meses.

Só isso já inviabiliza a aplicação mas, além disso, devido à latência na comunicação acústica, é impossível o sincronismo requerido pela aplicação. Igualmente, é impossível suprir os nós dessa RASSA com energia suficiente para transmitir tantos dados, mesmo para uma única campanha.

O objetivo dessa demonstração de inviabilidade foi o de enfatizar a importância de atentar para os requisitos listados no começo deste Capítulo, diante das limitações da comunicação acústica, quando da avaliação da viabilidade de implementação de uma aplicação usando RASSA. Nesse caso a negligência foi o volume de dados e a periodicidade de sua geração – incompatíveis com as taxas de transmissão acústica realizáveis –, a energia necessária às transmissões e a precisão do sincronismo requerido pela aplicação.

3.2 Conclusões do Capítulo

Este Capítulo relacionou os requisitos a serem observados na avaliação da viabilidade de aplicações com emprego de RASSAs, considerando os limites da comunicação acústica subaquática. Apresentou também estudo sobre o volume e periodicidade de geração de dados na monitoração sísmica de reservatórios de petróleo, para concluir por sua inviabilidade com emprego de RASSAs.

Capítulo 4

RASSA na monitoração de correntes marítimas

Este Capítulo detalha a aplicação de RASSA para a monitoração de correntes marítimas. Inicia com a descrição da principal tecnologia e equipamento empregados na medição de correntes marítimas. Detalha a estrutura dos dados gerados, as características da aplicação e apresenta dados típicos. Apresenta comprovações e resultados obtidos com simulações no NS-2 e resultados analíticos, com cálculos do volume de dados, confrontados com as taxas de transmissão realizáveis, evidenciando a viabilidade da RASSA, bem como sua escalabilidade em relação ao número de nós, periodicidade das transmissões e abrangência geográfica. Apresenta um cenário típico, com uma arquitetura centralizada e indica TDMA como método de acesso ao meio.

4.1 ADCP na medição de correntes marítimas

Os medidores de corrente marítima podem ser mecânicos ou acústicos. O mecânico é denominado correntógrafo e realiza as medições através da rotação de uma pequena hélice exposta perpendicularmente à corrente em medição. A velocidade angular dessa hélice é proporcional à velocidade laminar do fluido que a faz girar. Embora simples e eficiente, esse equipamento tem limitações que foram contornadas com o desenvolvimento dos equipamentos baseados na reflexão de sinais acústicos nas partículas em suspensão na água.

A medição de velocidade entre dois corpos pode ser feita através da observação da variação de frequência entre um sinal emitido por um dos corpos e a frequência do sinal refletido pelo outro corpo. A diferença entre essas frequências é proporcional à variação da distância entre transmissor e refletor. Esse fenômeno foi descrito teoricamente por Johann Christian Andreas Doppler em 1842 e posteriormente com-

provado por Christoph B. Ballot, em 1845, numa experiência com ondas sonoras. O fenômeno ficou conhecido como efeito Doppler.

Outra maneira de se medir a velocidade relativa entre dois corpos consiste na medição do atraso entre a transmissão de um trem de pulsos por um dos corpos e a recepção da reflexão desse trem de pulsos no outro corpo. A diferença de tempo entre transmissão e recepção da reflexão também é proporcional à variação da distância entre esses corpos.

Ambos princípios são usados nos atuais medidores acústicos de correntes marítimas. Os equipamentos que os empregam são designados por ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*). A técnica parte da premissa de que a água do mar possui inúmeras partículas em suspensão que se deslocam na mesma velocidade das correntes marítimas nas quais estão imersas. Na verdade os equipamentos medem a velocidade de deslocamento dessas partículas, a partir das reflexões que provocam nos sinais acústicos emitidos em suas direções. Para efetuar as medidas com esse princípio o equipamento emite sinais acústicos, de cima para baixo ou de baixo para cima, inclinados com a vertical. Normalmente se empregam de dois a quatro feixes de sinais acústicos no mesmo equipamento. A Figura 4.1 mostra um equipamento com dois feixes, instalado no leito oceânico, com transmissões de baixo para cima. A inclinação dos feixes com a vertical é necessária pois a medição do efeito doppler, ou do atraso entre transmissão e recepção, só mede a velocidade de aproximação ou afastamento relativo entre fonte (ADCP) e refletores (partículas em suspensão). Através da medição da componente da velocidade da corrente na direção do eixo de transmissão dos sinais acústicos é possível calcular a velocidade na horizontal.

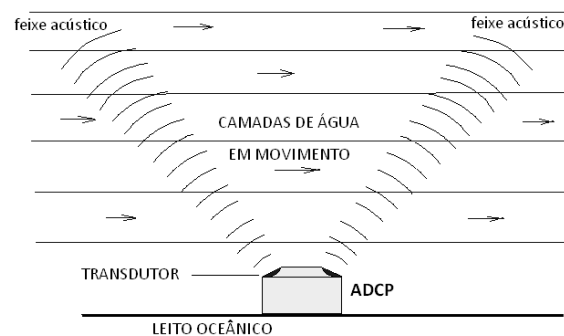


Figura 4.1: ADCP instalado no leito oceânico.

Os ADCPs também podem ser instalados em plataformas fixas ou no casco de navios, e nesses casos os feixes de transmissão acústica são voltados para baixo.

Através da análise da reflexão de um trem de pulsos o ADCP é capaz de identificar simultaneamente a velocidade das correntes marítimas em diversas camadas laminares atravessadas pelos feixes de sinais acústicos, gerando um perfil de velocidade dessa região. Essas camadas são denominadas de *células de profundidade* e o

equipamento é configurado para definir o número de células e seu espaçamento. Uma configuração típica é a medição das velocidades de 30 células sobrepostas, espaçadas de 20 metros. O alcance das transmissões acústicas desse equipamento é limitado, variando de alguns metros a centenas de metros, mas é tipicamente menor que 1000 metros. O equipamento faz uma média de diversas medidas para gerar dados a intervalos periódicos. Um intervalo típico para o registro dessa informação é de uma hora.

4.2 Características e dados típicos da aplicação

Os dados típicos resultantes da medição de corrente marítima por um equipamento com tecnologia ADCP variam de acordo com o fabricante e com a configuração da aquisição, mas o tamanho dos registros depende fundamentalmente do número de células de profundidade a medir. Cada registro é composto pela média de diversas medições feitas a intervalos regulares, incluindo estatística e informações sobre a qualidade dos sinais. A tabela 4.1 é um exemplo da organização dos dados num registro para alguns modelos de ADCP da RD Instruments (<http://www.rdinstruments.com>) para o armazenamento de medições de correntes de 30 células de profundidade.

Tabela 4.1: Dados típicos registrados por um ADCP.

Bytes	Conteúdo
20	Header Geral
53	Header de configuração
65	Header de dados
242	Dados de velocidade
122	Dados de correlação de amplitude
122	Intensidade dos ecos
122	Porcentual de dados válidos
81	Bottom track
2	Reservado
2	Checksum
831	Bytes

Embora haja variações na composição desses registros, em função de fabricantes, modelos e configurações, a quantidade de bytes fixos não varia muito. Além desses bytes fixos de cabeçalho, o que define o tamanho desses registros é a quantidade de *células de profundidade* programadas no ADCP. A tabela 4.1 é um exemplo prático e real, que pode ser tomado como referência quanto ao volume típico de dados gerados a cada medição. Assim, pode-se considerar que um pacote de dados de até 1 kByte comporta todas as informações necessárias ao registro de velocidade de correntes marítimas da maioria das situações práticas de registro desse dado oceanográfico.

A periodicidade da gravação desses registros é configurável e o intervalo de uma hora é considerado um período útil para a maioria das aplicações, suficiente para obtenção de um perfil confiável do comportamento das correntes na região amostrada.

Para efetuar as medições com o princípio usado pelo ADCP esse equipamento tem que estar fixo, no leito oceânico, como na Figura 4.1, no casco de uma embarcação, em estruturas fixas, como plataformas, ou flutuando submerso, atado a *poitas* fixadas no leito oceânico, como indicado na Figura 1.1(a). Neste último caso o ADCP apresenta certa mobilidade, mas possui sensores internos para compensar os efeitos desses movimentos nas medições das correntes.

Embora o instante das amostragens seja registrado com precisão de segundos a precisão de um minuto para o instante da medição da corrente é suficiente para a monitoração da maior parte das situações, já que as correntes, na média, não sofrem variações abruptas.

Para a finalidade de apoio às operações de exploração e produção de petróleo áreas de cobertura de 100 km^2 são suficientes para a monitoração necessária desse parâmetro oceanográfico. Áreas dessa dimensão podem ser atendidas por RASSAs com poucos nós, com espaçamentos menores que 5 km.

Do exposto concluímos que a monitoração de correntes marítimas com ADCPs é uma aplicação plenamente adequada à implementação usando RASSA, conforme discutido por PENTEADO *et al.* em [7] e [66]. O volume dos dados de cada medição dessa aplicação (menor que 1 kByte), a periodicidade de sua geração (uma hora), a localização estática dos medidores, a tolerância a sincronismo de um minuto e a distância entre nós menor que 5 km, estão em conformidade com o discutido no Capítulo 3. A seção 4.3 descreve comprovações e resultados de uma RASSA na monitoração de correntes marítimas, utilizando TDMA como método de acesso múltiplo ao meio, seu volume de dados, seus tempos de trânsito e sua dinâmica de aquisição, provando a viabilidade da aplicação.

4.3 Comprovações e resultados

Para medições de correntes marítimas em águas rasas o ADCP pode ser instalado num navio ou em alguma estrutura fixa, como plataformas ou bóias. Entretanto, como em termos práticos o alcance das medições feitas com ADCP é limitado a algumas centenas de metros, para medições de correntes profundas é necessária a instalação do ADCP no fundo do mar. A monitoração em tempo real de correntes marítimas profundas pode ser feita com o emprego de alguns ADCPs distribuídos no local de interesse, acoplados a modems acústicos para o encaminhamento periódico de suas medições a um nó sorvedouro, do qual as informações de todos os ADCPs

possam ser resgatadas. A Figura 4.2 ilustra um cenário real de 100 km^2 com 12 nós para análise de uma RASSA com essa finalidade.

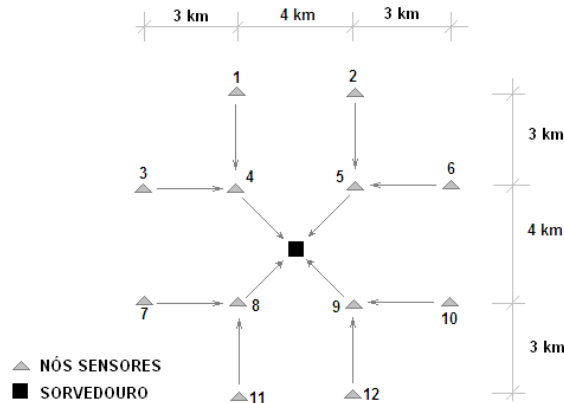


Figura 4.2: Cenário para avaliação.

Neste cenário os nós 1, 2, 3, 6, 7, 10, 11 e 12 estão a 3 km dos nós intermediários 4, 5, 8 e 9, e estes a aproximadamente 2,83 km do nó sorvedouro. Para efeito de cálculo, será considerado que a distância entre todos os nós é de 3 km, o pior caso. Os nós 4, 5, 8 e 9 encaminham seus dados diretamente ao nó sorvedouro e os demais em dois saltos, através desses nós. O acesso ao meio é feito em TDMA e o roteamento é estático, conforme mostrado na Figura 4.2.

4.3.1 Comprovações com simulações no NS-2

Conforme descrito no Capítulo 2, a banda disponível do canal acústico e a frequência central dessa banda dependem da distância transmissor-receptor. Uma comprovação dessa dependência pode ser observada através de simulações feitas no NS-2 usando a modelagem da comunicação acústica descrita por HARRIS e ZORZI em [25]. Para essas simulações foram gerados pacotes de 1 kBytes em CBR, com periodicidade de 5 segundos, tendo como MAC o protocolo ALOHA, modulação em BPSK e o modelo do canal subaquático descrito em [25], conforme mostrado na Figura 4.3.

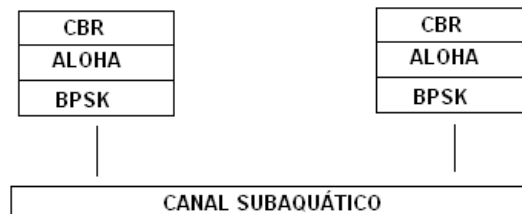


Figura 4.3: Estrutura da simulação no NS-2.

As curvas da Figura 4.4 foram obtidas para duas distâncias transmissor-receptor, variando-se a frequência de transmissão ao redor da frequência ótima teórica para

identificar a frequência ideal para ambas distâncias. Nessas frequências foram testadas potências de transmissão até identificar a potência que proporcionasse uma relação S/R de 20 dB no receptor, para ambos os casos. 20 dB de relação S/R em acústica subaquática é um valor seguro para garantir a correta decodificação dos sinais. Com essas potências foram feitas então transmissões variando-se a frequência conforme mostrado na Figura 4.4 e registrados os valores das relações S/R nos receptores. As curvas foram normalizadas pois as potências de transmissão são muito distintas.

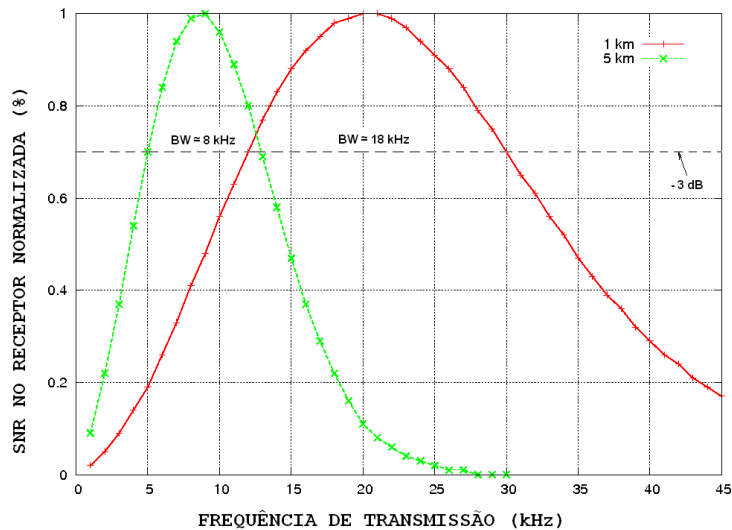


Figura 4.4: Bandas em função da distância transmissor-receptor.

Outra comprovação importante através de simulações é a da máxima taxa de transmissão possível, em função da distância transmissor-receptor (e, consequentemente, da banda disponível no canal). A Figura 4.5 apresenta os resultados de simulações para ilustrar essa relação para três distâncias transmissor-receptor, 1 km, 2 km e 5 km. No módulo desenvolvido para o NS-2 a modulação é em BPSK e não se define diretamente a taxa de transmissão, e sim a banda utilizada na modulação do sinal transmitido. Internamente o programa converte essa banda em taxa de transmissão na proporção de 1 bps para cada 2 Hz disponível na banda do canal acústico. Ao se tentar modular transmissões com banda superior à disponível no canal a taxa de erros de pacotes aumenta, refletindo a limitação do canal. As simulações foram feitas usando a frequência ótima de transmissão para cada distância e potência suficiente para não gerar perda de pacotes com baixas taxas de transmissão. Aumentou-se então gradativamente as taxas de transmissão e registrou-se o percentual de perda de pacotes para geração do gráfico mostrado na Figura 4.5.

As simulações demonstram a limitação de banda do canal acústico e confirmam a importância de se considerar as máximas taxas possíveis em função das distâncias transmissor-receptor.

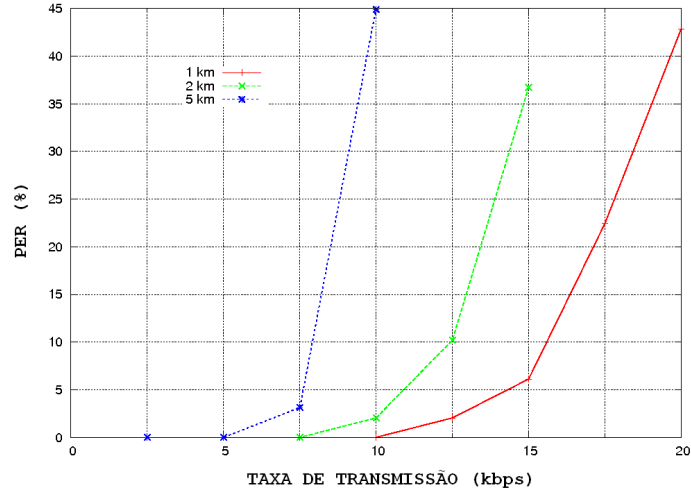


Figura 4.5: Limitação das taxas de transmissão em função da distância transmissor-receptor.

4.3.2 Comprovações com resultados analíticos

Para uma distância transmissor-receptor de 3 km, a banda disponível é menor que 15 kHz. Teoricamente transmissões moduladas em BPSK disporão de banda de 15 kHz, proporcionariam taxas de transmissão de até 15 kbps. No modelo do canal de comunicação acústica desenvolvido para o NS-2 [25] a taxa de transmissão com modulação em BPSK é considerada, em kbps, como metade de banda disponível, em kHz. Mesmo assim, os modelos comerciais de modems acústicos abaixam ainda mais essas taxas teóricas. As especificações do UWM4000 (tabela 3.1), por exemplo, indicam *link* acústico de 8.000 bps, taxa de dados em RS-232 de 4.800 bps e taxa útil de dados (*payload*) de apenas 3.200 bps, para distâncias de 4.000 metros. Por uma questão de segurança, os cálculos a seguir considerarão taxa útil de 3 kbps na comunicação acústica dessa aplicação.

Considerando taxa de transmissão de 3 kbps e pacotes de 1 kBytes o Tempo de Transmissão de Pacotes (TTP) será de:

$$TTP = \frac{(1.000 \times 8 \text{ bits})}{3.000 \frac{\text{bits}}{\text{s}}} \approx 2,67 \text{ s}. \quad (4.1)$$

Como a distância entre os nós é de 3 km e, por simplificação, considerando a velocidade de propagação de 1.500 m/s, o Tempo de Trânsito (TT) das mensagens será de:

$$TT = \frac{(3.000 \text{ m})}{1.500 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 2 \text{ s}. \quad (4.2)$$

Assim, o Tempo Total para Transmissão (TTT) de um pacote da aplicação em

um salto, será de:

$$TTT = TTP + TT \approx 2,67s + 2s \approx 4,67s. \quad (4.3)$$

sendo esse valor o *Time Slot* (TS) necessário à transmissão de um pacote em um salto, num esquema de TDMA. Como no cenário proposto há nós distantes dois saltos do sorvedouro, deve-se considerar que o *Total Time Slot* (TTS) para todos os nós da RASSA deve ser o dobro do TS (descartando como desprezível o tempo de processamento e de chaveamento recepção/transmissão dos nós intermediários). Esse tempo pode ser considerado como um *tempo de reserva do canal* para cada nó da RASSA. Por simplificação, considera-se o TTT como 5 segundos e o TTS como 10 segundos. Como o intervalo de aquisição dos dados é de uma hora, temos um *duty cycle* de apenas 0,0028.

Entretanto, no método de acesso TDMA cada *Time Slot* precisa ser separado dos adjacentes de um *Time Guard Interval* (TGI) seguro o suficiente para evitar sobreposições de transmissões. Esse TGI tem que ser compatível com o sincronismo possível entre os nós e com o máximo tempo de trânsito das mensagens esperado na rede. Conforme discutido no Capítulo 2, o sincronismo em RASSA é um dos grandes desafios, especialmente para RASSAs que se pretendam de longa duração. Se por um lado a longa duração pode provocar *drifts* nos osciladores internos dos nós tão grandes que comprometam a precisão do sincronismo, por outro lado os protocolos que pretendem solucionar esse problema com a troca de mensagens periódicas são inadequados pois consomem muita energia. Como será discutido no Capítulo 5, há possibilidade de se obter sincronismo de um minuto através da monitoração de marés. Por esse motivo, consideremos como TGI o intervalo de um minuto.

Dessa forma, conclui-se que neste cenário, cada nó necessitará ocupar o canal acústico por no máximo 1 minuto e 10 segundos para enviar seus dados ao nó sorvedouro, seja diretamente, seja através de dois saltos. Como há na RASSA 12 nós, o tempo total de alocação do canal necessário a enviar sucessivamente os dados de todos os nós ao sorvedouro será de 14 minutos.

Ao final da recepção dos pacotes de todos os nós o nó sorvedouro pode enviá-los sequencialmente à estação *Gateway* da superfície, conforme Figura 1.2, através do canal acústico vertical. Novamente, considerando uma taxa de transmissão de 3 kbps entre o nó sorvedouro e a estação *Gateway*, o tempo de transmissão dos dados dos 12 pacotes entre o sorvedouro e o *Gateway* (TSG) será de:

$$TSG = 12 \times \frac{(1.000 \times 8 \text{ bits})}{3.000 \frac{\text{bits}}{\text{s}}} = 32s. \quad (4.4)$$

Supondo um intervalo de um segundo entre a transmissão de cada pacote e que o nó sorvedouro esteja a 2.000 metros de profundidade (resultando num tempo

de trânsito de apenas 1,33 segundos) será necessário menos de um minuto para transmitir todos os pacotes, do nó sorvedouro à estação *Gateway*. Esse tempo só será necessário caso o nó sorvedouro não possa ser conectado via cabo a alguma estrutura fixa presente no local, caso em que poderia transferir os dados e receber alimentação, sem necessidade da onerosa e lenta transmissão acústica.

Porém, mesmo considerando que a comunicação Sorvedouro-*Gateway* tenha que ser acústica, o tempo total necessário para enviar os dados de todos os nós de uma amostragem da RASSA à estação *Gateway* no cenário analisado, será menor que 15 minutos.

Como o intervalo de amostragem para a medição das correntes é de uma hora, o canal acústico será ocupado em menos de 25% de sua disponibilidade. Essa folga proporciona espaço para escalabilidade da RASSA: em relação ao número de nós; para diminuir os intervalos de amostragem; para segmentar o pacote de dados; ou para aumentar o número de saltos para ampliar a abrangência geográfica da RASSA. Dá margem também para inclusão de algumas mensagens de controle de RTS e CTS para contornar eventuais erros de transmissão, conforme descrito no Capítulo 2, embora a inclusão dessas mensagens deva ser evitada devido ao consumo de energia que requerem. É possível também reservar alguns *Time Slots* para comunicação do sorvedouro com os nós sensores, útil para alterar configurações dos ADCPs durante as campanhas.

O único parâmetro afetado pela taxa de transmissão é o Tempo de Transmissão de Pacotes, mas esse tempo, para o caso analisado, representa ínfimos 7,6% do tempo de reserva do canal para a transmissão de cada nó ao sorvedouro da RASSA, devido ao grande TGI considerado (um minuto). Isso significa que mesmo que seja necessário diminuir a taxa de transmissão, isso não compromete a viabilidade da aplicação.

Como exemplo, recalculando todos os valores para uma taxa de transmissão de apenas 1 kbps, resultaria num tempo total menor do que 18 minutos, necessários à transmissão dos dados de todos os 12 nós da RASSA ao sorvedouro, e deste à estação *Gateway*, tempo apenas 20% acima do valor inicial considerando taxa de transmissão de 3 kbps. Ou seja, uma redução da taxa de transmissão a 1/3 do valor inicial, aumenta o tempo de ocupação do canal em apenas 20%. Mesmo nesse caso, como a amostragem dos dados continua sendo de uma hora, o canal estará ocupado em menos de 30% de sua disponibilidade.

4.4 Conclusões do Capítulo

Neste Capítulo foi abordada a medição de correntes marítimas com emprego de ADCPs, descrevendo a tecnologia, as características e a dinâmica da aquisição dos

dados, o volume e periodicidade das informações geradas, para indicá-la como adequada à implementação com emprego de RASSAs, à luz dos requisitos discutidos no Capítulo 3.

As limitações do canal acústico discutidas no Capítulo 2 foram demonstradas com simulações no NS-2 para evidenciar a limitação de banda e de taxas de transmissão possíveis no ambiente subaquático e para corroborar as considerações e a validade das demonstrações analíticas seguintes.

Foi apresentado um cenário real para aplicação de RASSA na monitoração de correntes marítimas, com acesso ao meio em TDMA. O cenário foi avaliado analiticamente quanto à taxa de utilização do canal acústico, considerando os dados típicos da aplicação para comprovar a viabilidade da proposta, mesmo numa condição de taxas de transmissão mais baixas do que as disponíveis atualmente em modems acústicos comerciais. A tabela 4.2 resume essa análise.

Tabela 4.2: Resumo da avaliação analítica da taxa de ocupação do canal para a aplicação proposta

Parâmetro	3 kbps	1 kbps
Tempo de Transmissão de Pacote (s.)	$\approx 2,67$	8
Tempo de Trânsito (s.)	2	2
Tempo Total de Transmissão (s.)	$\approx 4,67$	10
<i>Time Slot</i> Total (s)	≈ 10	20
Tempo de Ocupação do canal (min.)	< 15	< 18
Taxa de Ocupação do Canal (%)	< 25	< 30

Capítulo 5

Sincronismo em RASSA

Este Capítulo trata da dificuldade em obter sincronismo em RASSA. Descreve o problema e apresenta estudo e dados que indicam a viabilidade de uso das variações de marés para essa finalidade com vistas a obter sincronismo com precisão de ao menos um minuto, já que essa precisão é suficiente para a monitoração e registro das variáveis oceanográficas – posto que estas não sofrem variações abruptas, conforme discutido em 4.2 – sendo também coerente com o requisito de sincronismo discutido no Capítulo 3 e com o *TGI* do TDMA escolhido nas demonstrações de resultados analíticos da aplicação discutida no Capítulo 4.

5.1 O problema do sincronismo em RASSA

A solução da questão de sincronismo é vital para a implantação de RASSAs. Como os nós partilham do mesmo meio de comunicação e a banda disponível é estreita, eles não podem transmitir simultaneamente numa mesma região, sob pena de desperdiçar energia devido a colisão de transmissões. Conforme discutido no Capítulo 2, a eficiência dos protocolos de controle de acesso ao meio depende da existência de um mínimo de sincronismo entre os nós da rede. Devido à grande latência da comunicação acústica subaquática, os protocolos visando prover RASSAs com sincronismo de muita precisão se baseiam na disseminação de mensagens de controle ao longo da rede, o que compromete sua eficiência energética.

O método de acesso ao meio TDMA, proposto para a aplicação de monitoração de correntes marítimas é simples e confiável, mas a eficiência de sua utilização também depende de um mínimo de sincronismo. O relógio interno dos nós de uma RASSA não é confiável para garantir sincronismo, especialmente para campanhas de longa duração, pois devido às condições ambientais os osciladores internos dos equipamentos podem experimentar variações que acarretem desvios de alguns minutos em poucos meses [5, 12]. Por outro lado, não há no ambiente subaquático um sistema de posicionamento global – como o GPS para aplicações terrestres – do qual se possa

obter uma referência de tempo comum a todos os nós da rede.

Diversas propostas de sincronismo para RASSA são baseadas na troca de mensagens entre seus nós, como a apresentada por SYED e HEIDEMANN em [10]. Soluções desse tipo têm a desvantagem de necessitar de trocas periódicas de mensagens entre todos os nós da RASSA, o que requer consumo de energia. O consumo de energia para essa finalidade pode não ser um problema para RASSAs de curta duração, mas as RASSAs, de uma maneira geral, devem ser projetadas para aquisições de longa duração para se tornarem economicamente viáveis, devido aos elevados custos de equipamentos e embarcações. Enquanto um nó de rede sem fios terrestre pode custar tão pouco como algumas centenas de reais, um único modem acústico custa alguns milhares de dólares, um ADCP custa algumas dezenas de milhares de dólares e o custo de diárias de embarcações oceanográficas é desta mesma ordem de grandeza. Assim, para se justificar como economicamente viável, é desejável que as RASSAs operem por longos períodos, sem necessidade de troca periódica de nós devido ao esgotamento de suas baterias. Dessa forma, é necessário buscar solução para prover sincronismo às RASSAs sem a necessidade de trocas de mensagens acústicas ao longo de toda a rede.

5.2 Proposta de solução

Um evento que é comum a todos os nós de uma RASSA em uma região razoavelmente grande é o movimento das marés, conforme apresentado por PENTEADO *et al.* em [7] e [66]. As marés são provocadas pelo movimento das águas dos oceanos, arrastadas pelas atrações que sobre elas exercem o sol e a lua. Ao longo de uma área relativamente extensa – dezenas ou até centenas de quilômetros – pode-se considerar que a variação cíclica das marés é a mesma e pode ser observada simultaneamente com pequenas diferenças de tempo pelos nós de uma RASSA, mesmo quando instalados em águas profundas.

A possibilidade de pequenas diferenças de fase entre os níveis de marés numa região delimitada ocorre devido à velocidade da “onda de maré”. A maré, na linha do equador, *viaja* de leste para oeste numa velocidade aproximada de 40.000 km/dia. Dois pontos na linha do equador afastados em longitude que corresponda à distância de 50 km na superfície observarão a mesma maré com uma defasagem de quase dois minutos. Esse efeito diminui à medida que se afasta da linha do equador. De qualquer forma, se considerarmos que os nós estejam em locais fixos e com coordenadas conhecidas, essa defasagem é fixa e pode ser calculada para ser considerada no procedimento de sincronismo.

As variações das marés podem ser monitoradas continuamente ou a qualquer instante por todos os nós de uma RASSA por uma simples medição de pressão. A

pressão em qualquer ponto no leito oceânico é proporcional à coluna d'água sobre este ponto, sendo essa medição um dos métodos para registro de ondas e marés. Mesmo em águas profundas pode-se medir variações de marés de 10 cm através desse método. Esse método requer a imersão de um sensor de pressão para efetuar as medidas. Um método alternativo e de baixo custo para medição de ondas e marés, também baseado em variações de pressão da coluna d'água, porém sem necessidade de imersão de equipamento, foi recentemente desenvolvido e patenteado por pesquisadores do Centro de Pesquisas da Petrobras, conforme descrito por MENDES, L. B. B. *et al.* [67].

Para a finalidade de medição de marés é necessário filtrar os efeitos de ondas e turbulências da superfície do oceano. Para isso é necessário fazer diversas medidas sucessivas para poder obter um valor representativo do nível médio do oceano durante o intervalo de medições. O tempo durante o qual é necessário fazer as medições para obter um valor de maré depende das condições do mar, podendo variar de 10 segundos a um minuto.

As marés podem ser afetadas por outras fontes que não as astronômicas, tais como variações da pressão atmosférica, mas isso não invalida o conceito, pois essas anomalias se acrescentam aos efeitos astronômicos e afetam a pressão subaquática simultaneamente da mesma forma.

5.3 Apresentação de dados reais

Como exemplo desse sincronismo, a Figura 5.1 mostra a localização de pontos onde foram realizadas medições de marés no litoral do Rio de Janeiro. Os pontos N3 e S3 indicados na figura estão a aproximadamente 2.000 metros de profundidade e a aproximadamente 130 quilômetros um do outro.

A Figura 5.2 mostra o gráfico das variações das marés nesses dois pontos registradas durante 16 dias (base de dados oceanográficos da Petrobras, programa PROCAP-2000). Pela sua observação fica evidente o perfeito sincronismo que existe entre as variações das marés nesses dois pontos. Neste gráfico foi necessário deslocar os dados reais de S3 em +10 cm e de N3 em -10 cm, para tornar as duas curvas distinguíveis já que, se traçadas na mesma escala, se confundiriam.

A sincronização baseada nesse efeito pode ser feita através da identificação dos máximos e mínimos dos valores dessas curvas, que são periódicos e regularmente separados de aproximadamente 6 horas. Esses máximos e mínimos variam em amplitude ao longo do tempo, mas sua periodicidade é mantida. Para que o nó identifique esses pontos de inflexão é necessário analisar dados passados. Estima-se que 15 minutos sejam suficientes para identificar esses pontos de inflexão com segurança.

Os dados usados nesse exemplo foram adquiridos em 1994 pela Petroleo Brasileiro

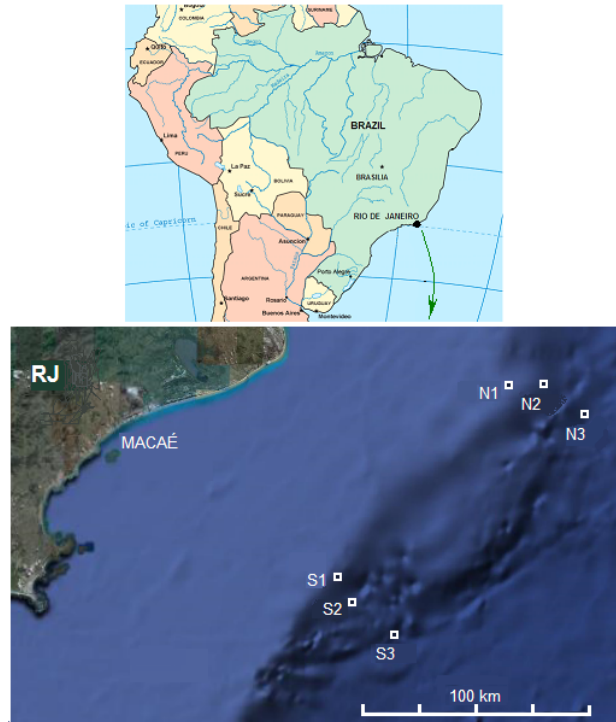


Figura 5.1: Localização dos pontos de medição de marés.

SA, como esforço em capacitação para exploração de petróleo em águas profundas, com a tecnologia de medição disponível naquela época. Esses dados foram adquiridos durante vários meses a intervalos de 15 minutos, pois não se destinavam à finalidade de demonstrar o sincronismo em análise neste Capítulo.

A Figura 5.3 é parte dos resultados das experiências relatadas por VASILESCU *et al.* em [13]. Novamente, o registro desses dados não se destinou a evidenciar a precisão do sincronismo das variações de marés em dois pontos distintos no fundo do mar, neste caso separados de apenas 1 km. Entretanto nesta experiência os dados foram adquiridos com amostragem de 150 segundos, ao invés dos 15 minutos da Figura 5.2. A melhor uniformidade e continuidade das formas de onda da Figura 5.3 evidenciam que a diminuição do intervalo de amostragem melhora a resolução na definição dos máximos e mínimos das curvas de variação de marés. Essa constatação

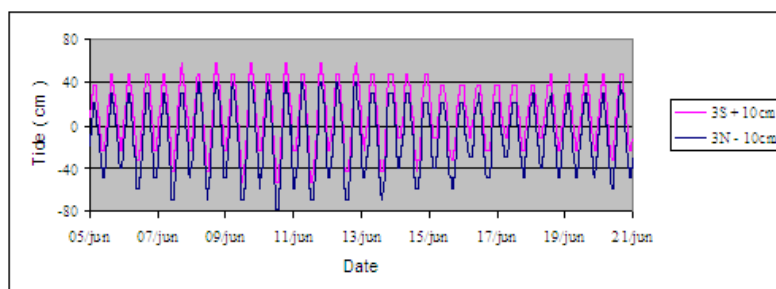


Figura 5.2: Sincronismo de marés na bacia de Campos.

permite inferir que é possível melhorar a precisão do sincronismo com a redução do intervalo de amostragem. Além disso, um intervalo de amostragem menor permite reduzir o tempo necessário para análise de dados passados para identificar a passagem do sinal por um máximo ou um mínimo.

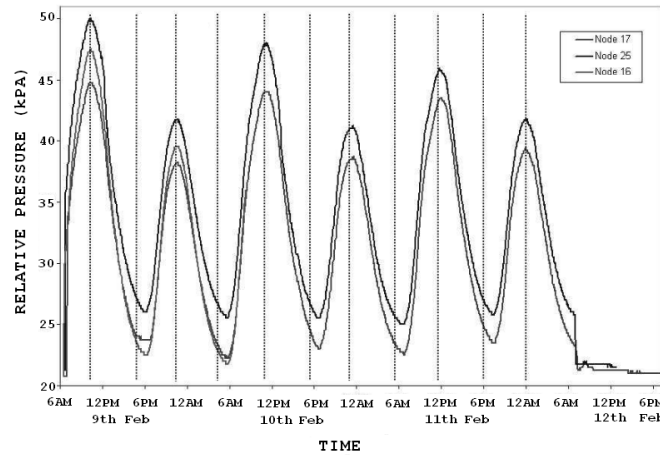


Figura 5.3: Registro de marés em pontos distintos, separados de 1 km, com amostragem a cada 150 segundos.

5.4 Avaliação de resultados dos dados reais

Para avaliação da defasagem entre pontos de máximos e mínimos dos dados da Figura 5.2, foram feitos ajustes de curvas aos conjuntos de dados entre picos máximos e mínimos sucessivos para obter as equações das curvas que melhor representam a tendência das variações das marés nesses períodos. Dessas equações obteve-se as derivadas primeiras para identificar os pontos de inflexão destas curvas. A Figura 5.4(a) ilustra essa identificação para um dos eventos e a Figura 5.4(b) um histograma com a distribuição das diferenças de tempo entre uma curva e outra nos eventos de máximos.

Como se observa, há uma dispersão considerável da defasagem nos dados analisados. Entretanto, deve-se lembrar que os dados foram adquiridos com amostragem de 15 minutos, com resolução de 10 centímetros de coluna d'água e com sensores instalados a 2.000 metros de profundidade. Isso induz à expectativa de que se as medições forem mais frequentes – e possivelmente com melhor resolução – pode-se chegar a uma precisão de um minuto no sincronismo da identificação dos máximos e mínimos dessas curvas, sem transmissão de um único sinal acústico. Um minuto de sincronismo é suficiente para o registro e monitoração de diversas variáveis oceanográficas, já que no ambiente subaquático as variações são lentas.

A medição contínua da pressão para registro das marés requer funcionamento frequente de um circuito que envolve sensor de pressão, amostradores, condiciona-

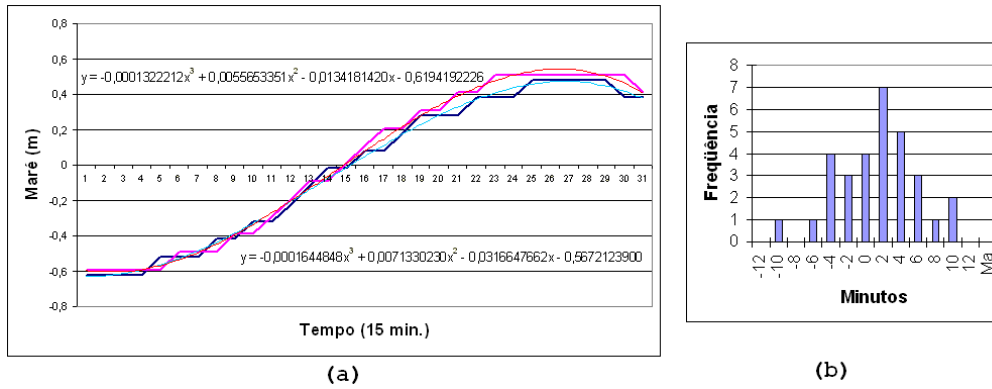


Figura 5.4: Método para verificação de sincronismo (a) e histograma com resultados (b).

dores de sinal, microcontrolador e memória. Isso consome energia, mas há que se considerar que: a) estima-se que o consumo de energia de um circuito para essa finalidade seja pequeno. Há transdutores de pressão hoje disponíveis no mercado com consumo da ordem de miliwatts (<http://www.freescale.com>); b) o circuito não precisa ficar energizado o tempo todo; apenas nos instantes de medição; c) os instantes de máximo e mínimo são previsíveis, com base nos dados passados, já que a variação das marés é periódica; assim, a amostragem precisa ser densa apenas nos instantes em que se esperam ocorrer os máximos e mínimos. Nos intervalos entre máximos e mínimos o intervalo de amostragem pode ser ampliado. Dessa forma, o consumo de energia esperado para medir, processar e identificar os máximos e mínimos das variações de marés é muito pequeno, se comparado ao necessário para transmissão de sinais acústicos (7 Watts, por exemplo, com o modem UWM4000 da *Link-Quest*, conforme dados da tabela 3.1).

5.5 Conclusões do Capítulo

Este Capítulo tratou da questão do sincronismo em RASSAs, evidenciando a inconveniência dos métodos baseados nas trocas periódicas de mensagens acústicas entre todos os nós da rede, devido ao consumo de energia que requerem.

Como alternativa, foi apresentada uma proposta de sincronismo baseada na monitoração dos movimentos das marés, cujos efeitos podem ser considerados simultâneos ao longo de áreas extensas o suficiente para serem usados como eventos de sincronismo. A monitoração pode ser feita através da contínua medição de pressão por todos os nós da RASSA.

Foram apresentados e analisados dados reais coletados no litoral do Estado do Rio de Janeiro como evidência da viabilidade do uso desse fenômeno natural para sincronismo de RASSAs, visando sua utilização em método TDMA, inune a so-

breposições de transmissões acústicas. A análise dos resultados obtidos indica que com amostragem e resolução adequadas pode-se obter precisão de um minuto no sincronismo baseado neste evento, o que é suficiente para monitoração da maioria dos dados oceanográficos.

Dessa forma, esse método é viável, extremamente promissor, e se puder ser desenvolvido, tendo sua eficácia comprovada, será de enorme auxílio ao desenvolvimento das RASSAs, posto que apresenta alternativa para solução de um dos maiores desafios ainda enfrentados nesta área de pesquisas.

Capítulo 6

Conclusões e trabalhos futuros

Nesta dissertação foram apresentados estudos sobre as características da comunicação subaquática, tendo na comunicação hidroacústica sua principal tecnologia.

Foram apresentadas e discutidas as limitações do canal acústico e as dificuldades que essas limitações implicam na implementação de RASSAs. As limitações teóricas foram comprovadas com os resultados de duas simulações em NS-2. Numa delas mostrou-se a limitação de banda do canal acústico, sua diminuição com o aumento da distância transmissor-receptor e o deslocamento da frequência central dessa banda, avaliando transmissões a 1 km e a 5 km, com resultados resumidos na tabela 6.1.

Tabela 6.1: Efeitos da distância transmissor-receptor na banda do canal acústico (valores aproximados, obtidos do gráfico da Figura 4.4).

Distância (m)	Frequência Central (kHz)	Banda (kHz)
1000	20	18
5000	8	8

Na outra simulação mostrou-se a dependência das taxas de transmissão com a distância transmissor-receptor, devido à diminuição da banda disponível com o aumento dessa distância. Nesta simulação foram avaliadas três distâncias transmissor-receptor, aumentando-se a taxa de transmissão e registrando-se a taxa de erros de pacotes. O resumo dos resultados é apresentado na tabela 6.2.

Com base nas limitações do canal acústico, comprovadas pelas simulações, foram relacionados diversos requisitos a serem observados na implementação de aplicações usando RASSAs. Como exemplo do impacto dessas restrições discutiu-se a limitação das RASSAs na monitoração de reservatórios de petróleo.

Tabela 6.2: Efeitos da distância transmissor-receptor na máxima taxa de transmissão (valores obtidos do gráfico da Figura 4.5).

Distância (m)	Limiar de Transmissões sem erros (kbps)
1000	10
2000	7,5
5000	5

O trabalho apresentou a monitoração de correntes marítimas como uma aplicação realizável com emprego de RASSA, evidenciando que ela atende aos requisitos identificados no Capítulo 3. Para comprovar essa viabilidade o trabalho elege um cenário real com 12 nós numa área de 100 km^2 , empregando taxas de transmissão acústica disponível em modems comerciais, e apresenta estudo analítico do volume de dados a trafegar, método de acesso ao meio, e dinâmica de operação com roteamento estático. O estudo comprova a viabilidade da aplicação indicando margem para ampliação do número de nós, redução do intervalo de amostragens nas medições de corrente ou aumento da abrangência geográfica da RASSA através do aumento do número de saltos até o nó sorvedouro.

Considerando taxa de transmissão de 3 kbps, foi demonstrado que a ocupação do canal acústico para esse cenário é de menos de 25 % do disponível; mesmo considerando a redução da taxa de transmissão para 1 kbps, demonstrou-se que a ocupação do canal acústico aumenta apenas 20%, passando para menos de 30 % do disponível.

Foi apresentado também um método de sincronismo baseado na monitoração das variações das marés, com apresentação de dados reais coletados no litoral do Estado do Rio de Janeiro, a 150 km da costa e em local com 2000 metros de profundidade, para corroborar a viabilidade do método. Esses dados foram analisados quanto ao sincronismo. Os resultados comprovam as expectativas e indicam que amostragens mais frequentes e medições de pressão com maior resolução podem proporcionar sincronismo com precisão de um minuto, aplicável à monitoração da maioria das variáveis oceanográficas.

Como trabalhos futuros aponta-se:

- Aprofundar estudos da modelagem da comunicação acústica visando aprimorar os módulos para simulação de RASSA no NS-2;
- Planejar e executar medições de marés com parâmetros de aquisição visando

confirmar as expectativas quanto à viabilidade de sincronizar os nós de RASSA a partir deste evento natural; com esses dados, aprofundar estudos para o algoritmo de identificação dos máximos e mínimos das marés, visando a precisão de um minuto, e definição de seu emprego como elemento de sincronismo para RASSAs;

- Estudar e avaliar com mais profundidade a questão do consumo de energia e autonomia de RASSA e do método de sincronismo a partir das variações das marés.

Referências Bibliográficas

- [1] PARTAN, J., KUROSE, J., LEVINE, B. N. “A Survey of Practical Issues in Underwater Networks”. In: *WUWNet '06: Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Underwater Networks*, pp. 17–24, New York, NY, USA, 2006. ACM. ISBN: 1-59593-484-7. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/1161039.1161045>.
- [2] SOZER, E., STOJANOVIC, M., PROAKIS, J. “Underwater Acoustic Networks”, *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, v. 25, n. 1, pp. 72–83, Jan 2000. ISSN: 0364-9059. doi: 10.1109/48.820738.
- [3] AKYILDIZ, I. F., POMPILLI, D., MELODIA, T. “State-of-the-art in Protocol Research for Underwater Acoustic Sensor Networks”. In: *WUWNet '06: Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Underwater Networks*, pp. 7–16, Los Angeles, CA, USA, Sep. 2006. ACM. ISBN: 1-59593-484-7.
- [4] AKYILDIZ, I. F., POMPILI, D., MELODIA, T. “Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges”, *Ad Hoc Networks*, pp. 257–279, 2005. doi: 10.101/j.adhoc.2005.01.004.
- [5] HEIDEMANN, J., YE, W., WILLS, J., et al. “Research Challenges and Applications for Underwater Sensor Networking”, *Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006. IEEE*, v. 1, pp. 228–235, 2006. ISSN: 1525-3511. doi: 10.1109/WCNC.2006.1683469.
- [6] CHITRE, M. A., S., S., M., S. “Underwater Acoustic Communications and Networking: Recent Advances and Future Challenges”. Sep 2008. doi: 10.1109/48.820738.
- [7] PENTEADO, D., DE CASTRO PINTO PEDROZA, A., COSTA, L. H. M. K. “Underwater Sensor Networks: a Feasibility Study”. In: *Proceedings of 8th International Information and Telecommunication Technologies Symposium*, pp. 213–215, Florianópolis, SC, BRAZIL, Dec. 2009.

- [8] VOGEL, M., SYMONDS, D., XIAO, N., et al. “Real-time Deepwater Current Profiling System”. v. 1, pp. 269–274 vol.1, 2001. doi: 10.1109/OCEANS.2001.968738.
- [9] BROWN, A., NICHOLAS, C., DRIVER, D. “Real-Time Full-Profile Current Measurement for Exploration and Production Structures in Ultra Deepwater”, *2005 Offshore Technology Conference, OTC 17439*, 2005.
- [10] SYED, A. A., HEIDEMANN, J. “Time Synchronization for High Latency Acoustic Networks”, *INFOCOM 2006. 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings*, pp. 1–12, April 2006. ISSN: 0743-166X. doi: 10.1109/INFOCOM.2006.161.
- [11] TIAN, C., LIU, W., JIN, J., et al. “Localization and Synchronization for 3D Underwater Acoustic Sensor Networks”, *Lecture Notes in Computer Science*, , n. 4611, pp. 622–631, 2007. ISSN: 0302-9743.
- [12] CHIRDCHOO, N., SOH, W.-S., CHUA, K. C. “MU-Sync: a Time Synchronization Protocol for Underwater Mobile Networks”. In: *WuWNeT’08: Proceedings of the third ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Characterization*, pp. 35–42, New York, NY, USA, 2008. ACM. ISBN: 978-1-60558-185-9. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/1410107.1410115>.
- [13] VASILESCU, I., KOTAY, K., RUS, D., et al. “Data Collection, Storage, and Retrieval with an Underwater Sensor Network”. In: *SenSys ’05: Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 154–165, New York, NY, USA, 2005. ACM. ISBN: 1-59593-054-X. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/1098918.1098936>.
- [14] DOUKKALI, H., NUAYMI, L. “Analysis of MAC Protocols for Underwater Acoustic Data Networks”, *Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. 2005 IEEE 61st*, v. 2, pp. 1307–1311 Vol. 2, May-1 June 2005. ISSN: 1550-2252. doi: 10.1109/VETECS.2005.1543520.
- [15] MA, Y., GUO, Z., FENG, Y., et al. “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. IEEE Computer Society. ISBN: 978-0-7695-3610-1. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/NSWCTC.2009.130>.

- [16] 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.
- [17] URICK, R. J. *Principles of Underwater Sound*. McGraw-Hill, 1983. ISBN: 0-07-066087-5.
- [18] COATES, R. F. W. *Underwater Acoustic Systems*. John Wiley and Sons, 1990. ISBN: 0-333-42542-1.
- [19] BREKHOVSKIKH, L. M., LYSANOV, Y. P. *Fundamentals of Ocean Acoustics*. Springer-Verlag, 1991.
- [20] 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, Jan 2000. ISSN: 0364-9059. doi: 10.1109/48.820733.
- [21] FREITAG, L., STOJANOVIC, M., GRUND, M., et al. “Acoustic Communication for Regional Undersea Observatories”. In: *Proceedings of Oceanology International*, 2002.
- [22] LANBO, L., SHENGLI, Z., JUN-HONG, C. “Prospects and Problems of Wireless Communication for Underwater Sensor Networks”, *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, v. 8, n. 8, pp. 977–994, 2008. ISSN: 1530-8669. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/wcm.v8:8>.
- [23] PREISIG, J. “Acoustic Propagation Considerations for Underwater Acoustic Communications Network Development”, *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, v. 11, n. 4, pp. 2–10, 2007. ISSN: 1559-1662. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/1347364.1347370>.
- [24] STOJANOVIC, M. “Underwater Acoustic Communication”. In: *Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, v. 22, pp. 688–698, John Wiley and Sons, 1999.
- [25] ALBERT F. HARRIS, I., ZORZI, M. “Modeling the Underwater Acoustic Channel in ns2”. In: *ValueTools '07: Proceedings of the 2nd International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools*, pp. 1–8, ICST, Brussels, Belgium, Belgium, 2007. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering). ISBN: 978-963-9799-00-4.

- [26] FREITAG, L., GRUND, M., SINGH, S., et al. “The WHOI Micro-modem: an Acoustic Communications and Navigation System for Multiple Platforms”, *OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE*, v. 2, pp. 1086–1092, 2005. doi: 10.1109/OCEANS.2005.1639901.
- [27] DOKKALI, H., NUAYMI, L., HOUCKE, S. “Power and Distance Based MAC Algorithms for Underwater Acoustic Networks”, *OCEANS 2006*, pp. 1–5, Sept 2006. doi: 10.1109/OCEANS.2006.307004.
- [28] ALBERT F. HARRIS, I., STOJANOVIC, M., ZORZI, M. “When Underwater Acoustic Nodes Should Sleep with one Eye Open: Idle-time Power Management in Underwater Sensor Networks”. In: *WUWNet '06: Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Underwater Networks*, pp. 105–108, New York, NY, USA, 2006. ACM. ISBN: 1-59593-484-7. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/1161039.1161061>.
- [29] 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, April 2008. ISSN: 0743-166X. doi: 10.1109/INFOCOM.2008.55.
- [30] TAN, H.-P., SEAN, W., DOYLE, L. “A Multi-hop ARQ Protocol for Underwater Acoustic Networks”, *OCEANS 2007 - Europe*, pp. 1–6, June 2007. doi: 10.1109/OCEANSE.2007.4302195.
- [31] 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, July 2007. ISSN: 0364-9059. doi: 10.1109/JOE.2007.899277.
- [32] CHIRDCHOO, N., SOH, W.-S., CHUA, K. C. “Aloha-Based MAC Protocols with Collision Avoidance for Underwater Acoustic Networks”, *INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE*, pp. 2271–2275, May 2007. ISSN: 0743-166X. doi: 10.1109/INFOCOM.2007.263.
- [33] PELEATO, B., STOJANOVIC, M. “A MAC Protocol for Ad-hoc Underwater Acoustic Sensor Networks”. In: *WUWNet '06: Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Underwater Networks*, pp. 113–115, New York, NY, USA, 2006. ACM. ISBN: 1-59593-484-7. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/1161039.1161063>.

- [34] CHIRDCHOO, N., SOH, W.-S., CHUA, K. C. “MACA-MN: A MACA-Based MAC Protocol for Underwater Acoustic Networks with Packet Train for Multiple Neighbors”, *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE*, pp. 46–50, May 2008. ISSN: 1550-2252. doi: 10.1109/VETECS.2008.22.
- [35] PELEATO, B., STOJANOVIC, M. “Distance Aware Collision Avoidance Protocol for Ad-hoc Underwater Acoustic Sensor Networks”, *Communications Letters, IEEE*, v. 11, n. 12, pp. 1025–1027, December 2007. ISSN: 1089-7798. doi: 10.1109/LCOMM.2007.071160.
- [36] MAKHIJA, D., KUMARASWAMY, P., ROY, R. “Challenges and Design of MAC Protocol for Underwater Acoustic Sensor Networks”, *Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, 2006 4th International Symposium on*, pp. 1–6, April 2006.
- [37] MOLINS, M., STOJANOVIC, M. “Slotted FAMA: a MAC Protocol for Underwater Acoustic Networks”, *OCEANS 2006 - Asia Pacific*, pp. 1–7, May 2006. doi: 10.1109/OCEANSAP.2006.4393832.
- [38] STOJANOVIC, M. “Optimization of a Data Link Protocol for an Underwater Acoustic Channel”, *Oceans 2005 - Europe*, v. 1, pp. 68–73 Vol. 1, June 2005. doi: 10.1109/OCEANSE.2005.1511686.
- [39] LEE, J.-W., KIM, J.-P., LEE, J.-H., et al. “An Improved ARQ Scheme in Underwater Acoustic Sensor Networks”, *OCEANS 2008 - MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean*, pp. 1–5, April 2008. doi: 10.1109/OCEANSKOB.2008.4530937.
- [40] RICE, J., CREBER, B., FLETCHER, C., et al. “Evolution of Seaweb Underwater Acoustic Networking”, *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*, v. 3, pp. 2007–2017 vol.3, 2000. doi: 10.1109/OCEANS.2000.882235.
- [41] KARN, P. “MACA, A New Channel Access Method for Packet Radio”. ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conf., 1990.
- [42] BHARGHAVAN, V., DEMERS, A., SHENKER, S., et al. “MACAW: a Media Access Protocol for Wireless LAN’s”, *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, v. 24, n. 4, pp. 212–225, 199. ISSN: 0146-4833. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/190809.190334>.

- [43] CREBER, R., RICE, J., BAXLEY, P., et al. “Performance of Undersea Acoustic Networking Using RTS/CTS Handshaking and ARQ Retransmission”, *OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition*, v. 4, pp. 2083–2086 vol.4, 2001.
- [44] RICE, J. “SeaWeb acoustic communication and navigation networks”. In: *Proc. International Conference on Underwater Acoustic Measurements: Technologies and Results, June, 2005*.
- [45] 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. ACM. ISBN: 0-89791-711-1. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/217382.217458>.
- [46] 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*.
- [47] 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. doi: 10.1109/ISIE.2001.931815.
- [48] XIE, G., GIBSON, J. “A Networking Protocol For Underwater Acoustic Network”, *SCS Department, Naval Postgraduate School*, Dec. 2000.
- [49] SALVA-GARAU, F., STOJANOVIC, M. “Multi-cluster Protocol for Ad hoc Mobile Underwater Acoustic Networks”, *OCEANS 2003. Proceedings*, v. 1, pp. 91–98, 2003. doi: 10.1109/OCEANS.2003.178527.
- [50] PROAKIS, J., SOZER, E., RICE, J., et al. “Shallow Water Acoustic Networks”, *Communications Magazine, IEEE*, v. 39, n. 11, pp. 114–119, Nov 2001. ISSN: 0163-6804. doi: 10.1109/35.965368.
- [51] KO, J., SHIN, J., KWON, S., et al. “Localization of Sensor Nodes in Underwater Acoustic Sensor Networks Using Two Reference Points”. In: *Information Networking, 2008. ICOIN 2008. International Conference on*, pp. 1–5, 2008.

- [52] CHANDRASEKHAR, V., SEAH, W. K., CHOO, Y. S., et al. “Localization in Underwater Sensor Networks: Survey and Challenges”. In: *WUWNet '06: Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Underwater Networks*, pp. 33–40, New York, NY, USA, 2006. ACM. ISBN: 1-59593-484-7. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/1161039.1161047>.
- [53] OTHMAN, A.-K. “GPS-less Localization Protocol for Underwater Acoustic Networks”. In: *Wireless and Optical Communications Networks, 2008. WOCN '08. 5th IFIP International Conference*, pp. 1–6, May 2008. doi: [10.1109/WOCN.2008.4542532](http://doi.acm.org/10.1109/WOCN.2008.4542532).
- [54] XIE, G., GIBSON, J. “A Network Layer Protocol for UANs to Address Propagation Delay Induced Performance Limitations”, *OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition*, v. 4, pp. 2087–2094 vol.4, 2001.
- [55] POMPILI, D., MELODIA, T. “Three-dimensional Routing in Underwater Acoustic Sensor Networks”. In: *PE-WASUN '05: Proceedings of the 2nd ACM international workshop on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks*, pp. 214–221, New York, NY, USA, 2005. ACM. ISBN: 1-59593-182-1. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/1089803.1089988>.
- [56] XIE, P., HONG CUI, J., LAO, L. “VBF: Vector-Based Forwarding Protocol for Underwater Sensor Networks”. In: *in Proceedings of IFIP Networking'06*, pp. 1216–1221, 2006.
- [57] NICOLAOU, N., SEE, A., XIE, P., et al. “Improving the Robustness of Location-Based Routing for Underwater Sensor Networks”, *OCEANS 2007 - Europe*, pp. 1–6, June 2007. doi: [10.1109/OCEANSE.2007.4302470](http://doi.acm.org/10.1109/OCEANSE.2007.4302470).
- [58] XIE, P., CUI, J.-H. “R-MAC: An Energy-Efficient MAC Protocol for Underwater Sensor Networks”, *Wireless Algorithms, Systems and Applications, 2007. WASA 2007. International Conference on*, pp. 187–198, Aug. 2007.
- [59] DOUKKALI, H., NUAYMI, L., HOUCHE, S. “Distributed MAC Protocols for Underwater Acoustic Data Networks”, *Vehicular Technology Conference, 2006. VTC-2006 Fall. 2006 IEEE 64th*, pp. 1–5, Sept. 2006. doi: [10.1109/VTTCF.2006.428](http://doi.acm.org/10.1109/VTTCF.2006.428).

- [60] SEAH, W., TAN, H.-X. “Multipath Virtual Sink Architecture for Underwater Sensor Networks”, *OCEANS 2006 - Asia Pacific*, pp. 1–6, May 2006. doi: 10.1109/OCEANSAP.2006.4393933.
- [61] MORNS, I., HINTON, O., ADAMS, A., et al. “Protocols for Sub-sea Communication Networks”, *OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition*, v. 4, pp. 2076–2082 vol.4, 2001. doi: 10.1109/OCEANS.2001.968318.
- [62] GUERRA, F., CASARI, P., ZORZI, M. “World ocean simulation system (WOSS): a simulation tool for underwater networks with realistic propagation modeling”. In: *WUWNet '09: Proceedings of the Fourth ACM International Workshop on UnderWater Networks*, pp. 1–8, New York, NY, USA, 2009. ACM. ISBN: 978-1-60558-821-6. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/1654130.1654134>.
- [63] BALDO, N., MAGUOLO, F., MIOZZO, M., et al. “ns2-MIRACLE: a modular framework for multi-technology and cross-layer support in network simulator 2”. In: *ValueTools '07: Proceedings of the 2nd international conference on Performance evaluation methodologies and tools*, pp. 1–8, ICST, Brussels, Belgium, Belgium, 2007. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering). ISBN: 978-963-9799-00-4.
- [64] WONG, Y., NGOH, L., WONG, W., et al. “Wakeup Scheme for Ocean Monitoring Underwater Sensor Networks (UWSN)”, *OCEANS 2006 - Asia Pacific*, pp. 1–8, May 2006. doi: 10.1109/OCEANSAP.2006.4393874.
- [65] STOJANOVIC, M. “On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel”, *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, v. 11, n. 4, pp. 34–43, 2007. ISSN: 1559-1662. doi: <http://doi.acm.org/10.1145/1347364.1347373>.
- [66] PENTEADO, D., DE CASTRO PINTO PEDROZA, A., COSTA, L. H. M. K. “Deep-Ocean Data Acquisition Using Underwater Sensor Networks”. In: *ISOPE '2010: The 20th International Offshore(Ocean) and Polar Engineering Conference, a ser publicado*, Beijing, China, Jun 2010.
- [67] MENDES, L. B. B., NUNES, L. M. P., PENTEADO, D., et al. “Wave Measurements Using an Air Pressure Gauge”, *ASME Conference Proceedings*, v. 2008, n. 48210, pp. 853–858, 2008. doi: 10.1115/OMAE2008-57670.