



SISTEMA DE MONITORAMENTO SUBAQUÁTICO PARA EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO USANDO REDES DE SENSOES ACÚSTICOS

Fabício Jorge Lopes Ribeiro

Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia Elétrica.

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

Rio de Janeiro
Novembro de 2012

SISTEMA DE MONITORAMENTO SUBAQUÁTICO PARA EXPLORAÇÃO DE
PETRÓLEO USANDO REDES DE SENSORES ACÚSTICOS

Fabício Jorge Lopes Ribeiro

TESE 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 DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Aloysio de Castro Pinto Pedroza, Dr.

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa, Dr.

Prof. José Ferreira de Rezende, Dr.

Prof. Julius Cesar Barreto Leite, PhD.

Prof. Joni da Silva Fraga, Dr.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

NOVEMBRO DE 2012

Ribeiro, Fabrício Jorge Lopes

Sistema de Monitoramento Subaquático para Exploração de Petróleo Usando Redes de Sensores Acústicos / Fabrício Jorge Lopes Ribeiro. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XV, 99 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Aloysio de Castro Pinto Pedroza

Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 78-84.

1. Comunicação Subaquática. 2. Sensores Acústicos. 3. Redes. 4. Monitoramento. 5. Posicionamento. 6. Roteamento. I. Pedroza, Aloysio de Castro Pinto *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Dedicatória:

À minha esposa Aline Familiar Solano Ribeiro, aos meus filhos Mariah Solano Ribeiro e Miguel Jorge Solano Ribeiro, aos meus pais Dalcy Jorge da Cruz Ribeiro e Lysahir Lopes Ribeiro e minha irmã Fabiola Simone Lopes Ribeiro.

Agradecimentos:

A Deus.

À minha esposa sempre presente.

Aos meus filhos que são a minha inspiração.

Aos meus pais e irmã que me incentivaram.

Aos Professores Aloysio de Castro Pinto Pedroza e Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa, pela orientação que foi fundamental para a realização deste trabalho.

À Petrobras.

Aos amigos de trabalho que me apoiaram durante todo estudo em especial ao Antônio Rodrigues e a equipe responsável pela gerência da rede de telecomunicações da Bacia de Campos.

À CAPES, CNPq, FAPERJ e MCT / FINEP / FUNTTEL por financiar parcialmente este trabalho.

A todos os amigos da COPPE.

A todos os funcionários do Departamento.

A todos os professores do GTA que muito contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Aos professores José Ferreira de Rezende, Julius Cesar Barreto Leite e Joni da Silva Fraga que participaram da Comissão Examinadora.

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

SISTEMA DE MONITORAMENTO SUBAQUÁTICO PARA EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO USANDO REDES DE SENSORES ACÚSTICOS

Fabício Jorge Lopes Ribeiro

Novembro/2012

Orientadores: Aloysio de Castro Pinto Pedroza

Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho propõe um sistema de monitoramento subaquático composto de sensores distribuídos ao longo da infraestrutura submarina, responsáveis pela operação e transporte da produção de petróleo. A transmissão dos dados é realizada por modems acústicos instalados nos sensores subaquáticos, plataformas e navios de suporte logístico usados na exploração de petróleo. No entanto, estes navios não estão ao alcance dos sensores todo o tempo, sendo necessária a utilização de uma rede DTN (*Delay/Disruption Tolerant Network*). Neste trabalho investigamos a capacidade do sistema em duas aplicações específicas para o monitoramento e localização dos sensores subaquáticos, analisando os sinais acústicos disponíveis e o comportamento da rede no simulador ONE (*Opportunistic Network Environment simulator*) através de cenários compatíveis com a movimentação dos navios nas rotas marítimas estabelecidas na área de exploração de petróleo brasileira.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

UNDERWATER MONITORING SYSTEM FOR OIL EXPLORATION USING
ACOUSTIC SENSORS NETWORK

Fabício Jorge Lopes Ribeiro

November/2012

Advisors: Aloysio de Castro Pinto Pedroza

Luís Henrique Maciel Kosmowski Costa

Department: Electrical Engineering

This work proposes an underwater monitoring system built with sensors distributed over the subsea infrastructure, which is responsible for operation and transportation of oil production. Data transmission is undertaken by underwater acoustic modems installed on the sensors, platforms and vessels used for logistic support of the oil exploration. However, the vessels may not be within sensor range at all times, requiring the use of DTN (Delay/Disruption Tolerant Network). This work investigates the system ability in two specific applications for monitoring and location of underwater sensors, analyzing the acoustic signals available and the network behavior using ONE (Opportunistic Network Environment) simulator through the compatible scenarios with the movement of vessels on maritime routes established in Brazilian oil exploration area.

Sumário

Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Acrônimos	xiv
1. Introdução	1
1.1. Redes Subaquáticas	2
1.2. Sistema de Monitoramento Subaquático.....	3
1.3. Projeto	5
2. Trabalhos Relacionados	7
3. Comunicação Subaquática	12
3.1. Introdução	12
3.2. Transmissões Acústicas no Oceano	13
3.3. Largura de Banda de um Canal Acústico.....	15
3.4. Restrições de Energia	16
3.5. Requisitos para Aplicação	17
3.6. Considerações Finais.....	18
4. Sistema de Monitoramento Subaquático	20
4.1. Introdução	20
4.2. Rede Subaquática de Sensores	22

4.3.	Arquitetura da Comunicação Subaquática	23
4.4.	Algoritmo de Localização	26
4.4.1.	Estimativa da Distância	26
4.4.2.	Cálculo da Posição.....	27
4.4.3.	Requisitos do Posicionamento.....	29
4.5.	Posicionamento Subaquático	29
4.6.	Vantagens sobre Outros Sistemas	32
4.7.	Considerações Finais.....	36
5.	Procedimento de Análise e Resultados	37
5.1.	Introdução	37
5.2.	Cenário	38
5.3.	Análise dos Protocolos de Roteamento.....	42
5.4.	Análise dos Pontos de Referência	42
5.5.	Resultados da Rede de Monitoramento.....	43
5.5.1.	Sensores Alcançados	43
5.5.2.	Contatos na Rede e Tempo de Espera dos Sensores	44
5.5.3.	Probabilidade de Entrega e Latência da Rede	46
5.5.4.	Taxa de Entrega das Mensagens.....	49
5.6.	Resultados para o Cálculo do Posicionamento	51
5.6.1.	Sensores alcançados por três referências.....	52
5.6.2.	Contatos na Rede e Tempo de Espera dos Sensores	53
5.7.	Considerações Finais.....	55
6.	Implantação e Operação	56
6.1.	Introdução	56
6.2.	Plano de Implantação	57
6.2.1.	Atividades de Implantação	58

6.2.1.1. Implantação dos Modems Acústicos.....	58
6.2.1.2. Implantação dos Sensores	59
6.2.2. Cronograma	61
6.2.2.1. Estimativas da duração das atividades	62
6.2.2.2. Sequência das Atividades.....	63
6.2.3. Custos de Implantação.....	65
6.3. Plano de Operação.....	68
6.3.1. Consumo das Baterias dos Sensores.....	68
6.3.2. Desgastes dos modems acústicos dos navios	71
6.3.3. Custos de Operação	71
6.4. Considerações Finais.....	73
7. Conclusões	74
Referências Bibliográficas	78
Apêndice A - Modems Acústicos	85
Apêndice B - Sensores Subaquáticos	91
Apêndice C - Embarcações Especiais	97

Lista de Figuras:

Figura 1.1: Relevo submarino brasileiro.	2
Figura 1.2: Infraestrutura submarina para exploração de petróleo.....	4
Figura 3.1: Perfil da velocidade do som no oceano.....	13
Figura 3.2: O canal SOFAR - <i>Sound Fix and Ranging</i>	14
Figura 3.3: Alcance dependente da frequência e o sinal/ruído.....	15
Figura 4.1: Áreas de navegação da frota de embarcações <i>offshore</i>	21
Figura 4.2: Sistema de monitoramento subaquático.....	22
Figura 4.3: Arquitetura proposta para o sistema de comunicação subaquático.....	24
Figura 4.4: Comunicação entre nós móveis e sensores.	25
Figura 4.5: Cálculo da posição: (a) caso hipotético de trilateração; (b) caso realista de trilateração; (c) multilateração; e (d) triangulação.	28
Figura 4.6: Processo de posicionamento.	30
Figura 4.7: Processo de definição das coordenadas e profundidade.	31
Figura 4.8: Monitoramento subaquático através de embarcações.....	33
Figura 4.9: Sonda com boia submersa e de superfície.	34
Figura 4.10: Boia com GPS e antena de telemetria.....	35
Figura 5.1 Cenário das simulações.....	40
Figura 5.2: Porcentagem de sensores alcançados.....	44
Figura 5.3: Número de contatos na rede.....	45
Figura 5.4: Intervalo de espera para enviar as mensagens.	46

Figura 5.5: Probabilidade de entrega de mensagem.....	47
Figura 5.6: Latência da rede.....	48
Figura 5.7: Taxa de entrega da rede – protocolo Epidemic.....	49
Figura 5.8: Taxa de entrega da rede – protocolo Prophet.....	50
Figura 5.9: Taxa de entrega da rede para os protocolos Epidemic e Prophet.....	51
Figura 5.10: Porcentagem dos sensores alcançados.....	52
Figura 5.11: Média de contatos na rede por hora.....	53
Figura 5.12: Tempos médios para obtenção do posicionamento.....	54
Figura 6.1: Porto da Petrobras em Macaé.....	59
Figura 6.2: Implantação de novas linhas de dutos.....	60
Figura 6.3: Cronograma de implantação.....	64
Figura 6.4: Cronograma de manutenção.....	72
Figura A.1: Modem acústico UWM10000.....	86
Figura A.2: Modems acústicos da LinkQuest.....	88
Figura B.1: Sensores de temperatura termopares.....	93
Figura B.2: Sensor de pressão piezelétrico.....	94
Figura B.3: Sensor de vazão tipo turbina.....	96
Figura C.1: Embarcação CSO Deep Blue.....	97
Figura C.2: Embarcação Gulmar Atlantis Harrier.....	98
Figura C.3: Embarcação CBO Isabella.....	99

Lista de Tabelas:

Tabela 3.1: Relação entre alcance e largura de banda.....	16
Tabela 3.2: Comparação do consumo de energia.....	17
Tabela 6.1: Tempo estimado para execução das atividades.....	63
Tabela 6.2: Custos de aquisição dos equipamentos.....	66
Tabela 6.3: Custos de instalação dos modems acústicos e sensores.....	66
Tabela 6.4: Custos de instalação de sensores durante a implantação de equipamentos e dutos submarinos.....	67
Tabela 6.5: Custo total de implantação do sistema de monitoramento subaquático.....	67
Tabela 6.6: Capacidade das baterias para autonomia de 1 ano dos sensores.....	70
Tabela 6.7: Custos anuais de operação do sistema de monitoramento subaquático.....	72
Tabela A.1: Especificação dos modems UWM1000 e UWM10000.....	87
Tabela A.2: Comparação de modems acústicos subaquáticos.....	90
Tabela B.1: Custos dos sensores.....	92

Lista de Acrônimos:

ADCP:	<i>Acoustic Doppler Current Profilers</i>
AOA:	<i>Angle of Arrival</i>
AUV:	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
CAR:	<i>Context-aware Adaptive Routing</i>
CDMA:	<i>Code Division Multiple Access</i>
DSSS:	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
DSV:	<i>Dive Support Vessel</i>
DTN:	<i>Delay/Disruption Tolerant Network</i>
EOM:	<i>Electro-optical mechanical</i>
FDMA:	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FPSO:	<i>Floating Production Storage and Offloading</i>
FSK:	<i>Frequency Shift Keying</i>
GPS:	<i>Global Positioning System</i>
GSM:	<i>Global System for Mobile Communications</i>
MBR:	<i>Model-Based Routing</i>
NDBC:	<i>National Data Buoy Center</i>
OFDM:	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
ONE:	<i>Opportunistic Network Environment</i>
PSK:	<i>Phase Shift Keying</i>
S2C:	<i>Sweep-Spread Carrier</i>

ROV:	<i>Remotely Operated Vehicle</i>
RSSI:	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
RSV:	<i>ROV Support Vessel</i>
RTD:	<i>Resistive Temperature Detector</i>
SNR:	<i>Signal/Noise Ratio</i>
SOFAR:	<i>Sound Fix and Ranging</i>
SWIM:	<i>Shared Wireless Info-station Model</i>
TDMA:	<i>Time Division Multiple Access</i>
TDOA:	<i>Time Difference of Arrival</i>
TOA:	<i>Time of Arrival</i>
TPV:	<i>Temperatura, Pressão e Vazão</i>

Capítulo 1

Introdução

As últimas décadas no Brasil foram marcadas pela busca da autossuficiência na produção de petróleo, que obteve sucesso graças aos avanços tecnológicos alcançados na exploração e operação em águas profundas. O desenvolvimento dessa tecnologia possibilitou inúmeras descobertas na plataforma oceânica continental, em uma grande área a 70 km da costa, com lâminas d'água variando de 120 até 2800 m, que geram uma produção nacional de gás e petróleo de até 2,376 milhões de barris diários.

A nova fronteira de exploração de petróleo brasileira está localizada em uma região mais longínqua a 200 km da costa, chamada pré-sal, que compreende uma área de aproximadamente 800 km de comprimento e 200 km de largura, englobando três bacias (Santos, Campos e Espírito Santo) (CARMINATTI *et al.*, 2008). No entanto, a exploração e operação nessa região, onde a lâmina d'água pode chegar a mais de 3.000 m, é o desafio a ser superado, exigindo a utilização de tecnologias inovadoras a fim de auxiliar o controle operacional e ampliar o monitoramento nesse ambiente extremo.

Atualmente a produção de gás e petróleo está concentrada em uma grande área de aproximadamente 115.000 km² denominada Bacia de Campos (FRAGA *et al.*, 2003). Esta região contribui com cerca de 70% da produção nacional que é transportada por uma extensa infraestrutura composta por equipamentos de bombeio e várias malhas de dutos submarinos geralmente distribuídos por grandes áreas.

As atividades dessa indústria são complexas e perigosas, necessitando de uma infraestrutura robusta e confiável a fim de suportar as condições severas do ambiente subaquático. No entanto, além das restrições impostas pela operação em alto mar, o relevo submarino na costa brasileira é irregular apresentando em alguns pontos uma extrema inclinação (Figura 1.1), o que expõe as estruturas submersas a uma grande instabilidade. Assim, a necessidade do monitoramento é constante, contudo a abordagem atual limita os pontos de observação, excluindo do monitoramento grande parte dos equipamentos submarinos.



Figura 1.1: Relevo submarino brasileiro.

1.1. Redes Subaquáticas

As redes subaquáticas podem viabilizar o monitoramento em toda extensão da infraestrutura submarina e em especial nos dutos submarinos, proporcionando a ampliação do controle operacional através da verificação constante das condições dos equipamentos e do posicionamento dos sensores. Todavia, a comunicação nesse

ambiente está sujeita a várias limitações, que acarretam perdas no canal de transmissão. Essas perdas aumentam em meios com grande variabilidade (FALL, 2004). Por este motivo, este sistema deve tolerar falhas e interferências a fim de se adequar as características do meio de comunicação.

O desenvolvimento de uma arquitetura de comunicação subaquática baseada em redes tolerantes a atrasos e desconexões (CERF *et al.*, 2007) torna-se uma necessidade, devido às limitações impostas por esse ambiente. Assim, aplicações de monitoramento em redes DTN (*Delay/Disruption Tolerant Network*), podem ser perfeitamente compatíveis com os atrasos e interrupções, causados pelas interferências e variabilidade do meio submarino. Nesse sentido, foi utilizada essa arquitetura de comunicação para adequar o sistema às características do ambiente subaquático, especificando cenários de comunicação para a verificação do comportamento do sistema, visando implementar uma aplicação de monitoramento eficaz.

1.2. Sistema de Monitoramento Subaquático

O sistema de monitoramento subaquático proposto é composto por sensores acústicos, plataformas e navios de suporte logístico. Os sensores acústicos são responsáveis por calcular a posição, armazenar e transmitir as informações obtidas dos vários equipamentos submarinos instalados na área *offshore* da Bacia de Campos. Os sensores são distribuídos ao longo da infraestrutura submersa (Figura 1.2) e dos dutos submarinos, sendo os navios de suporte logístico da exploração de petróleo por sua vez responsáveis pela coleta das mensagens geradas nesses sensores e pelo consequente encaminhamento para o centro de controle. Todavia, estes navios em conjunto com as unidades de produção de petróleo devem disponibilizar pelo menos três coordenadas conhecidas, para que os sensores obtenham o posicionamento através da trilateração dos sinais acústicos recebidos.

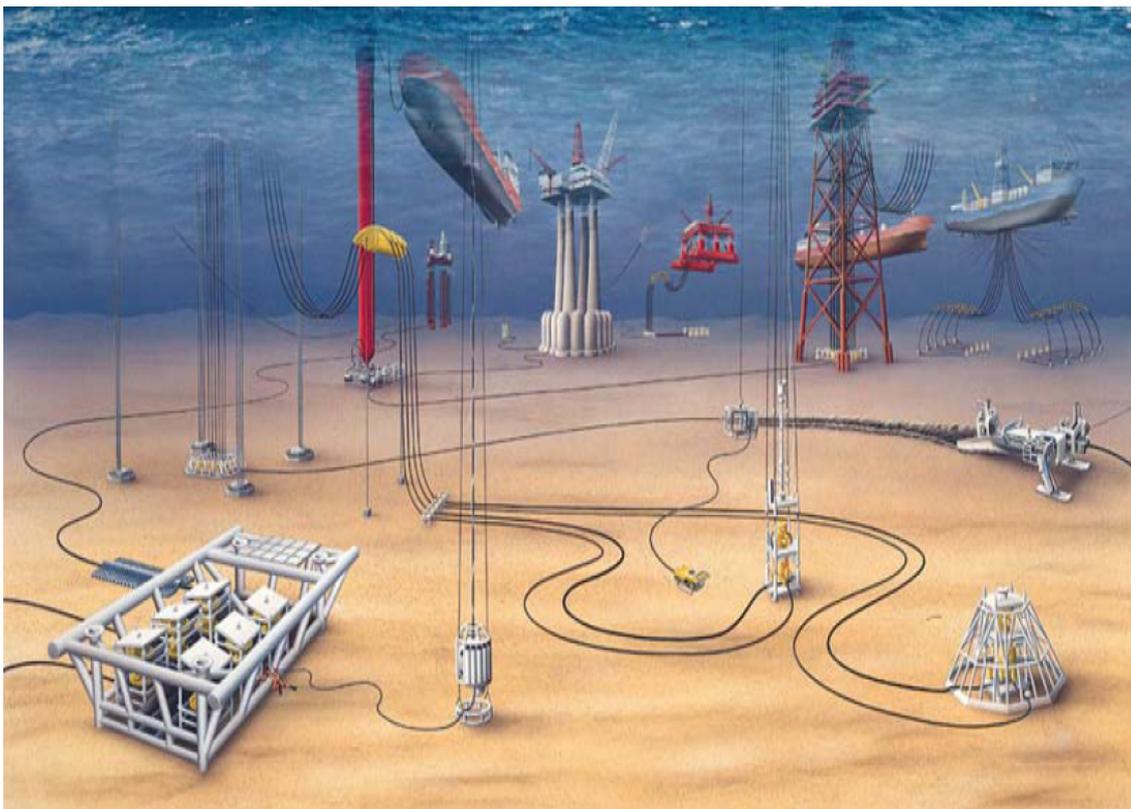


Figura 1.2: Infraestrutura submarina para exploração de petróleo.

O posicionamento subaquático prevê a disponibilização do mapeamento submarino com referências emitidas por unidades na superfície, o que permite a determinação da localização através de coordenadas geográficas e da profundidade. Este monitoramento da posição dos sensores poderá ser útil no acompanhamento das atividades de instalação e movimentação das estruturas submarinas como durante a implantação de equipamentos na cabeça dos poços de petróleo. Estas estruturas, chamadas de árvores de natal, devem ser instaladas respeitando o perfeito alinhamento para a acoplagem. A obtenção do posicionamento pode também permitir o monitoramento da movimentação de veículos de operação remota (ROV - *Remotely Operated Vehicle*) e veículos subaquáticos autônomos (AUV- *Autonomous Underwater Vehicle*), amplamente utilizados nas atividades de exploração de petróleo.

A implementação do monitoramento subaquático garantirá a verificação constante das condições da infraestrutura submarina. Assim, o sistema deve ser capaz de obter as informações dos sensores com uma frequência adequada aos requisitos da aplicação, respeitando as necessidades do controle operacional. A rede DTN deverá ser capaz de realizar o monitoramento através dos sensores subaquáticos que são

responsáveis pelo envio de informações como vazão, temperatura, pressão e posicionamento. As informações geradas nos sensores poderão ser armazenadas até que um navio esteja ao alcance para transmissão.

1.3. Projeto

O objetivo deste trabalho é investigar a viabilidade e o comportamento do sistema reproduzindo o deslocamento dos navios dentro de cenários coerentes com o ambiente *offshore*. Assim, o funcionamento da rede é analisado através da utilização dos protocolos Epidemic (MUNDUR e SELIGMAN, 2008) e Prophet (LINDGREN *et al.*, 2004), que são protocolos de roteamento representativos de redes DTN. Estes protocolos foram escolhidos devido a mecanismos específicos de comunicação que eles representam. Essa análise é feita utilizando o simulador ONE (*Opportunistic Network Environment*) (KERANEN *et al.*, 2009), que foi adaptado para descrever as condições de comunicação subaquática. Além disso, foram configurados cenários compatíveis com as características específicas da Bacia de Campos, para verificar as condições que a rede provê para o cálculo do posicionamento e para a aquisição dos dados, ambos diretamente influenciados pela disponibilidade dos navios de suporte logístico ao alcance dos sensores subaquáticos.

O modelo para a validação do sistema de monitoramento consiste na especificação da movimentação dos navios, que permite a avaliação do comportamento da rede com critérios mensuráveis, reduzindo o período de teste de campo na avaliação do sistema.

A análise foi dividida em quatro partes:

- análise da movimentação das embarcações;
- análise da rede com os protocolos de roteamento Epidemic e Prophet;
- análise do comportamento da rede DTN afetada pela disponibilidade das embarcações;
- análise da disponibilização de 3 referências para o cálculo do posicionamento.

Esta tese está organizada da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta os principais trabalhos relacionados. O Capítulo 3 resume as características importantes da comunicação subaquática. O Capítulo 4 descreve o sistema de monitoramento subaquático proposto. No Capítulo 5 são apresentados a análise de desempenho do sistema através de simulação e os resultados obtidos. O Capítulo 6 apresenta o plano de implantação e operação do sistema de monitoramento, enquanto o Capítulo 7 as conclusões do estudo e trabalhos futuros.

Capítulo 2

Trabalhos Relacionados

A atual perspectiva da comunicação subaquática é o reflexo do aperfeiçoamento alcançado na transmissão de dados na água. Em (URICK, 1983) são apresentados os princípios básicos para a transmissão acústica subaquática, enfatizando as características que influenciam a velocidade do som na água como a pressão (profundidade), densidade, temperatura e salinidade. Os resultados apresentados por SOZER *et al.* (2000) sobre comunicação subaquática abrem o caminho para utilização de redes de comunicação sem fio no ambiente submarino. Já o estudo sobre a comunicação subaquática realizado por STOJANOVIC (2006) apresenta as características subaquáticas, que influenciam a transmissão de dados.

Os desafios da comunicação subaquática são descritos em (HEIDEMANN *et al.*, 2006), onde são destacadas as dificuldades impostas pelo meio de comunicação e as restrições no canal acústico, como interferência, largura de banda, reflexões, taxa de erros e alcance. Uma arquitetura para redes subaquáticas e seus requisitos são apresentados por AKYILDIZ *et al.* (2007). O estudo detalha algumas propostas para as camadas de controle de acesso ao meio, rede e transporte, apresentando uma avaliação dos protocolos desta arquitetura. Uma análise dos problemas das redes subaquáticas de sensores é também encontrada em (LIU *et al.*, 2008). Um protocolo de roteamento baseado na pressão hidráulica para redes de sensores subaquáticos proposto por LEE *et al.* (2010), explora os níveis de pressão medida para encaminhar os dados para boias na superfície.

O aumento das atividades nos oceanos está impulsionando novas pesquisas com monitoramento subaquático. Uma rede de sensores para monitoramento de corais e recifes é apresentada por VASILESCU *et al.* (2005). Esta rede acústica utiliza AUVs (*Autonomous Underwater Vehicles*) para a coleta dos dados dos sensores, mesclando comunicação óptica de curto alcance com comunicação acústica. Outro exemplo é a proposta de uma rede de sensores para obtenção de dados oceanográficos para o monitoramento de correntes marítimas apresentado por PENTEADO *et al.* (2010). Neste caso, a rede acústica é composta de sensores fixos que se comunicam com um sorvedouro responsável pela comunicação externa.

A utilização de boias também é uma alternativa para o monitoramento nos oceanos, mesmo considerando a maior complexidade e custo dessas soluções. Um sistema de observação costeira apresentado por SCHNEIDER (2006) utiliza uma rede de boias equipadas com baterias não recarregáveis com comunicação via rádio de 1 km de alcance e taxa de transmissão de 800 bps. Em (ROWLEY, 2008) é apresentado um projeto de boias para medições oceânicas de dados meteorológicos e biológicos para a detecção e monitoramento de riscos marítimos. TAFT *et al.* (2009) apresentam a aplicação de janelas acústicas no monitoramento de correntes marítimas com ADCP (*Acoustic Doppler Current Profilers*). O estudo visa diminuir a distância da boia ao ADCP para melhorar as medições e eliminar estresse mecânico e fadiga nos cabos elétricos de ligação dos transdutores e outros componentes eletrônicos. BROWN *et al.* (2010) apresentam um sistema de observação das condições ambientais dos Grandes Lagos constituído por boias de monitoração de baixo custo.

Alguns protocolos de roteamento foram propostos para redes de sensores subaquáticos. Em (POMPILI *et al.*, 2006), os autores apresentam uma solução de roteamento flexível em duas fases visando aplicações de monitoramento de longo prazo, com o objetivo de garantir a operacionalidade da rede mesmo com falhas dos nós e enlaces. O problema da coleta de dados para redes tridimensionais de sensores submarinos é investigado na camada de rede, considerando as interações entre as funções de roteamento e as características do canal acústico submarino. XIE *et al.* (2006) apresentam modelos de propagação específicos para redes de sensores submarinos, onde cada nó em um grupo se comunica com o nó *gateway*, que coleta estatísticas sobre os pacotes recebidos. O nó *gateway* se comunica com as entidades

externas através de um nó especial equipado com sistemas acústicos e RF.

As redes tolerantes a atrasos e desconexões (DTN) permitem a comunicação através de mensagens assíncronas, sem o estabelecimento de um caminho fim a fim, o que faz do roteamento um processo desafiador (JAIN *et al.*, 2004). ZHANG (2006) examina alguns protocolos DTN propostos para redes ad hoc, tais como Epidemic, Swim, CAR, MBR e Prophet. Estes protocolos podem ser utilizados no roteamento, dependendo da redundância de mensagem desejada. Em um extremo está o protocolo Epidemic que usa uma abordagem de inundação para encaminhar mensagens. Assim, cada nó envia o pacote para todos os nós encontrados, de modo a aumentar as chances de um pacote ser entregue no seu destino, consumindo muitos recursos da rede. O outro extremo é o protocolo Prophet, que utiliza as informações da movimentação (nós encontrados) para determinar o nó com maior probabilidade de entrega da mensagem, reduzindo o número de mensagens duplicadas na rede.

ISLAM e WALDVOGEL (2008) analisam alguns métodos de encaminhamento para redes DTN como Entrega Direta e Primeiro Contato. Os resultados das simulações mostram que os métodos simples alcançam um bom desempenho especialmente com pequenas larguras de banda e baixa conectividade. Recentemente, foi proposto um protocolo de roteamento híbrido para sistemas subaquáticos de comunicação, que utiliza os mecanismos dos protocolos Epidemic e Prophet para definir o encaminhamento das mensagens de acordo com a densidade dos nós móveis ao alcance dos sensores (RIBEIRO *et al.*, 2010).

Algumas propostas baseadas na determinação da localização utilizam as características da propagação dos sinais com base no cálculo da posição. O sistema de posicionamento GPS (*Global Positioning System*) é o exemplo mais conhecido. Este sistema é baseado na rádio navegação via satélite, consistindo de 24 satélites, igualmente espaçados em seis planos orbitais a 20.200 km acima da Terra, que transmitem dois sinais codificados, um para uso civil e outro para uso militar (KAPLAN, 1996). Os satélites do sistema transmitem mensagens de navegação para que o receptor GPS calcule a sua posição em 3D - latitude, longitude e altitude.

Outras propostas podem não utilizar satélites na localização. A proposta de SONG (1994) que realiza a localização através de sinais do sistema celular foi precursora para os estudos de localização através do sistema GSM celular proposto por

VARSHAVSKY *et al.* (2006). Em GUSTAFSSON e GUNNARSSON (2005) são discutidas as possibilidades fundamentais associadas com o posicionamento móvel nas de redes sem fio com uma abordagem de fusão de sensores e um modelo baseado em filtragem. Um sistema de localização para redes ad hoc veiculares é proposto por BOUKERCHE *et al.* (2008), apresentando como combinar as técnicas de localização de veículos através da fusão de dados para fornecer um sistema de localização mais robusto.

TAN *et al.* (2011) apresentam um panorama das técnicas e desafios da localização em redes de sensores subaquáticas. O estudo apresenta a comparação dos custos, velocidade, precisão e cobertura da localização realizada através da comunicação acústica através de técnicas baseadas no alcance dos nós de referência. Um método que utiliza o sistema GPS e comunicação acústica para o posicionamento de *transponders* no leito marinho foi apresentado por WU *et al.* (2012). Este método visa monitorar as eventuais deformações da crosta devido à movimentação das placas tectônicas. Assim, foi desenvolvido um *transponder* acústico que fornece linhas de base que podem ser utilizadas para o monitoramento da posição dos sensores, através de um mapeamento submarino. Já o estudo experimental de desempenho de um sistema híbrido hidro acústico proposto por KEBKAL *et al.* (2012), permite simultaneamente o posicionamento de objetos subaquáticos e comunicação acústica. Este sistema possibilita a transferência de dados entre o nó identificador do objeto submerso e os nós de base de forma a prover a determinação das coordenadas da posição.

Em RIBEIRO *et al.* (2011b) foi avaliado o sistema de monitoramento subaquático baseado em RIBEIRO *et al.* (2011), mas para a infraestrutura submarina especificamente localizada na região de exploração de petróleo da Bacia de Campos. Assim, é considerada a distribuição dos sensores subaquáticos somente na região onde há maior densidade de nós móveis. O encaminhamento das mensagens foi realizado pelo protocolo Epidemic, escolhido por sua simplicidade e desempenho.

Diferentemente dos trabalhos apresentados até aqui, propõe-se a integração de sensores subaquáticos e nós móveis coletores em uma rede DTN e, para implementação de um sistema de monitoramento subaquático específico para a exploração de petróleo *offshore* no Brasil (RIBEIRO *et al.*, 2012). Assim, considera-se o estudo da capacidade do sistema em realizar o monitoramento de parâmetros necessários para o controle

2. Trabalhos Relacionados

operacional das atividades exploratórias, utilizando os protocolos de roteamento Epidemic e Prophet (RIBEIRO *et al.*, 2011a) e determinar a localização dos sensores através do cálculo do posicionamento (RIBEIRO *et al.*, 2012a). Tanto quanto foi possível verificar, não existe na literatura uma abordagem de provimento de um sistema de monitoramento que seja específico para infraestrutura submarina de exploração de petróleo, considerando a mobilidade e as restrições do ambiente subaquático da Bacia de Campos.

Capítulo 3

Comunicação Subaquática

3.1. Introdução

A comunicação subaquática pode ser realizada através de ondas eletromagnéticas, ópticas e acústicas, mas este último método, na prática, é o mais viável devido aos problemas encontrados nos dois primeiros. A transmissão eletromagnética apresenta a desvantagem da alta atenuação do sinal na água, devido à absorção do meio que aumenta com a frequência. Até em baixas frequências a potência necessária para essas transmissões são inviáveis. Já a transmissão óptica apresenta alta taxa de transmissão com baixo consumo de energia, mas com o inconveniente do curto alcance, ocasionado pela absorção e espalhamento da luz. As aplicações são limitadas pelo alcance de poucos metros, mesmo em águas límpidas e alinhamento perfeito (VASILESCU *et al.*, 2005).

A implementação mais eficaz de uma comunicação subaquática é feita através de ondas acústicas (LIU *et al.*, 2008), mesmo levando em conta as limitações impostas pelo ambiente submarino. No entanto, algumas características do canal acústico restringem seu uso, tais como a baixa e variável velocidade de propagação, a baixa largura de banda e o alto consumo de energia. Essas características devem ser consideradas na análise de viabilidade das aplicações neste ambiente.

3.2. Transmissões Acústicas no Oceano

As transmissões acústicas são diretamente influenciadas pela velocidade do som, que na água é cerca de 1.500 m/s, o que é quatro vezes mais rápido que a velocidade do som no ar, mas ainda cinco ordens de grandeza menor do que a velocidade das ondas eletromagnéticas no ar. Essa característica implica em uma latência de aproximadamente 0,67 s/km.

A velocidade do som na água é variável e dependente da pressão (profundidade), densidade, temperatura e salinidade (URICK, 1983). A combinação destas características faz com que a velocidade do som na água varie desde a superfície ao fundo, propagando-se através de caminhos curvos, devido à refração causada por camadas com diferentes velocidades. O perfil da velocidade do som no oceano é apresentado na Figura 3.1 (BREKHOVSKIKH e LYSANOV, 2003), onde "C" é a velocidade enquanto a "Z" é a profundidade. C_0 é a velocidade na superfície, C_h é a velocidade no fundo do mar e C_m é a velocidade a uma profundidade de Z_m , que varia com a latitude.

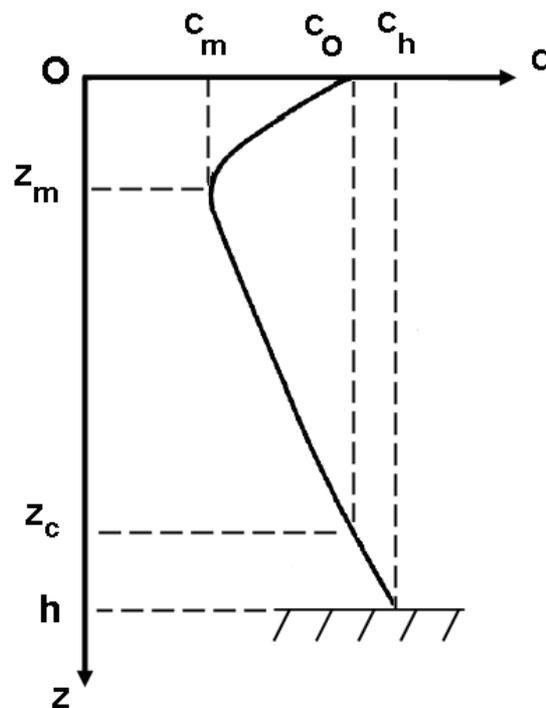


Figura 3.1: Perfil da velocidade do som no oceano.

A propagação do som na água do oceano é feita através de linhas curvas, devido à refração da onda sonora causada pela velocidade diferente em camadas adjacentes. O canal SOFAR (*Sound Fix and Ranging*), apresentado na Figura 3.2 (BREKHOVSKIKH e LYSANOV, 2003), é formado em torno Z_m , devido à variação de velocidade de inversão no perfil de velocidade do som.

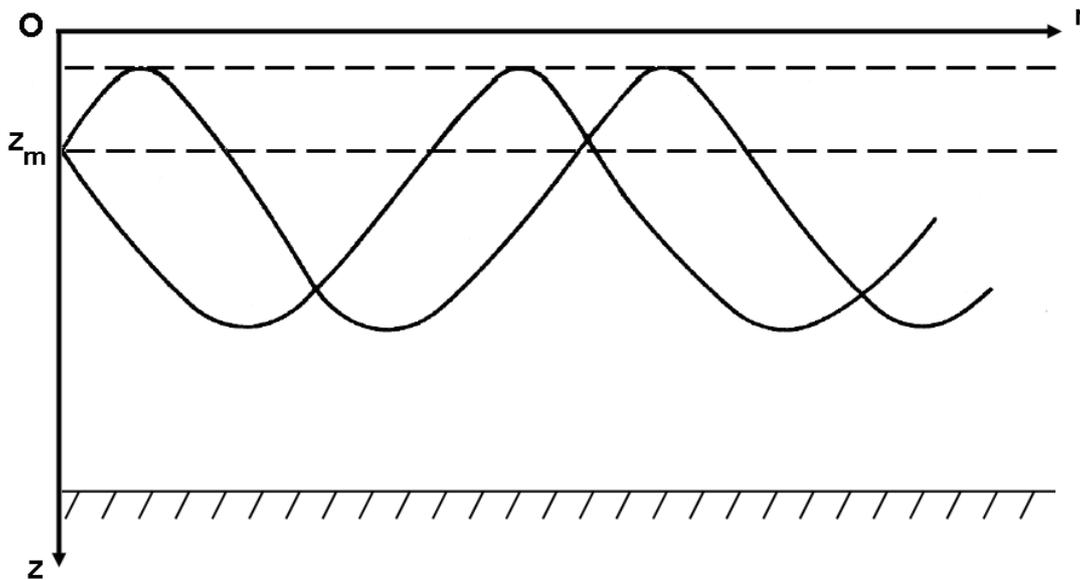


Figura 3.2: O canal SOFAR - *Sound Fix and Ranging*.

Muitas equações empíricas para o cálculo da velocidade do som neste ambiente foram desenvolvidas usando os valores de salinidade, temperatura e pressão/profundidade da água. Uma expressão simplificada para a velocidade do som na água é apresentada na Equação 3.1 (SU *et al.*, 2010), onde c é a velocidade do som na água, T é a temperatura da água (em graus Celsius), S é a salinidade (em partes por mil) e z é a profundidade (m). Para a maioria dos casos, essa equação é suficientemente precisa.

$$c = 1449,2 + 4,6T - 0,055T^2 + 0,00029T^3 + (1,34 - 0,01T)(S - 35) + 0,016z \quad (3.1)$$

3.3. Largura de Banda de um Canal Acústico

A largura de banda disponível nas comunicações subaquáticas é afetada pela variabilidade da frequência do canal acústico, que diminui com a distância. Isso acontece principalmente devido às perdas na transmissão do som e ruídos captados pelo receptor, causados principalmente pelo espalhamento da energia e absorção do som na água. A perda de energia depende da distância entre o transmissor e receptor e aumenta também com a frequência.

O ruído ambiente em alto mar é predominante e sua densidade espectral diminui em 20 dB/década. Assim, as dependências entre largura de banda, alcance transmissor-receptor e SNR (*Signal/Noise Ratio*) no receptor são mostradas na Figura 3.3 (STOJANOVIC, 2003).

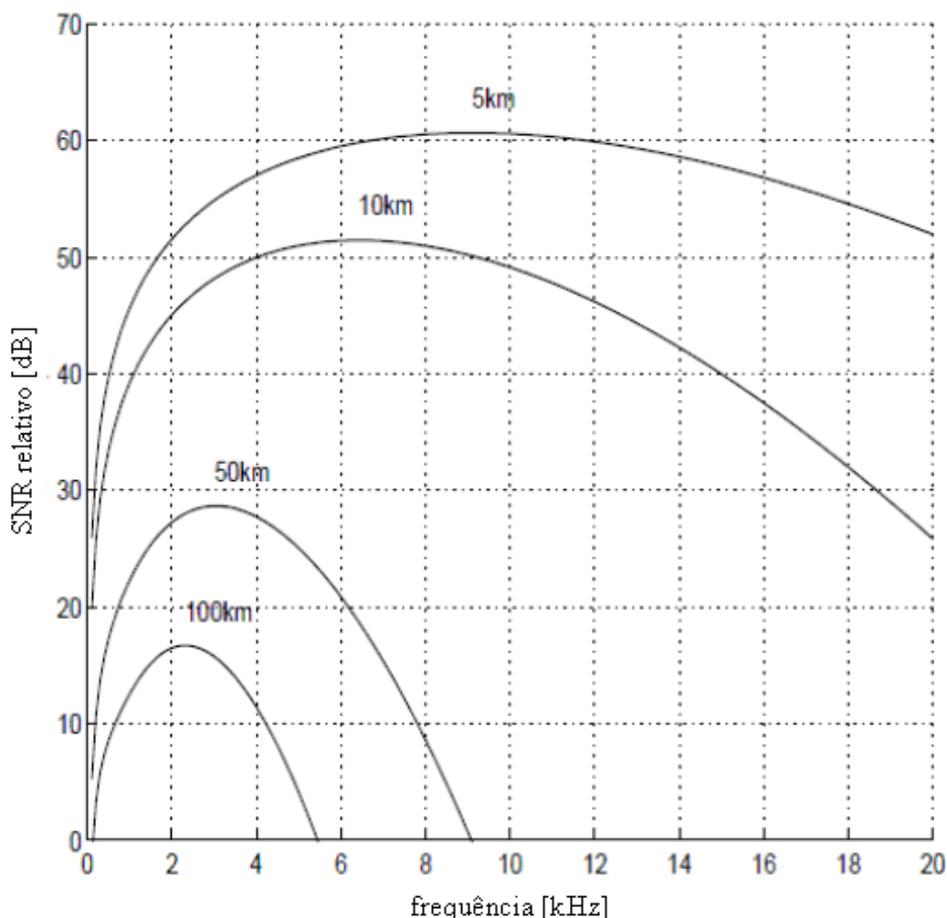


Figura 3.3: Alcance dependente da frequência e o sinal/ruído.

A relação entre o SNR e a frequência é apresentada na Figura 3.3 para quatro distâncias diferentes: 5 km, 10 km, 50 km e 100 km. Quanto maior a distância entre o transmissor e o receptor, menor é a largura de banda disponível. Além disso, é possível identificar que a frequência central de comunicação é também depende da distância entre o transmissor e receptor, tornando-se maior, quanto menor for essa distância. A Tabela 3.1 (STOJANOVIC, 2003) mostra a relação entre a largura de banda do canal acústico e a distância.

Tabela 3.1: Relação entre alcance e largura de banda.

Alcance (km)	Largura de Banda (kHz)
1000	Menor que 1
10 – 100	2 – 5
1 – 10	Aproximadamente 10
0,1 – 1	20 – 50
Menor que 0,1	Maior que 100

As ondas acústicas são afetadas por ruídos causados por reverberações, obstáculos e turbulências. A perda pela absorção sonora é outra característica importante, fazendo com que a largura de banda e a frequência central do canal acústico sejam variáveis e diminuam com a distância. Essa limitação restringe a alcance útil para poucos quilômetros, e as frequências de transmissão para menos de 30 kHz. Isto implica em taxas baixas de transmissão, normalmente em torno de 5 kbps (STOJANOVIC, 2006).

3.4. Restrições de Energia

No ambiente subaquático, os sensores geralmente operam com energia fornecida por baterias. Assim, uma questão importante na comunicação acústica submarina é o consumo de energia, que é muito maior do que em transmissões de rádio em ambiente convencional. O sinal acústico é baseado em ondas mecânicas de compressões

alternadas, necessitando grande potência para as transmissões. A comparação do consumo de energia entre um sensor subaquático utilizando ondas acústicas para comunicação e um sensor convencional utilizando ondas eletromagnéticas pode ser verificada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Comparação do consumo de energia.

Estado	Sensor Subaquático UWM10000 LinkQuest	Sensor RF
TX	40 W	80 mW
RX	0,9 W	30 mW
Repouso	9 mW	30 mW

O consumo de energia de sensores pode conduzir a uma maior necessidade de substituição de bateria ou de sua recarga. Esta operação trivial em redes de sensores terrestres é muito difícil e caro em redes submarinas. Portanto, é crucial evitar transmissões desnecessárias, uma vez que qualquer perda na transmissão leva a um desperdício de energia que pode diminuir a vida útil do sensor. Por isso, é tão importante a implementação da camada de acesso ao meio, que deve ser adaptada as características subaquáticas.

3.5. Requisitos para Aplicação

Devido às limitações do canal acústico, as aplicações devem se adaptar às características de comunicação existentes nas redes subaquáticas. Essas limitações restringem o alcance útil para alguns km, com frequências de transmissão abaixo de 30 kHz, o que implica em baixas taxas de transmissão.

As implementações de redes subaquáticas de sensores devem operar com taxas de transmissão de até 5 kbps. Este valor é conservador, mas é o limite alcançado pelos modems acústicos atuais. É possível alcançar taxas de transmissão maiores, mas sob condições especiais e em curtas distâncias. Mesmo a taxa de transmissão de 5 kbps pode

não ser alcançada, dependendo do cenário e das condições ambientais.

A largura de banda do canal é dependente diretamente da distância entre o transmissor e o receptor. Essa característica se torna o principal fator de limitação do alcance da rede, que em certas condições pode chegar a até 5 km. No entanto, se for utilizado em distâncias maiores, haverá uma diminuição na largura de banda e aumento da potência da transmissão, o que causará mais interferência no canal acústico, comprometendo a eficiência da comunicação e a vida útil do sensor.

A quantidade de dados transmitidos deve ser compatível com a taxa de transmissão disponível. Portanto, para aumentar a taxa de sucesso e se adequar às altas taxas de erro, alta latência e baixas taxas de transmissão, o tamanho dos dados transmitidos deve ser em torno de 1 kbyte. Além disso, pacotes pequenos são mais propensos a serem transmitidos com sucesso.

Atualmente as aplicações de monitoramento de oleodutos utilizam em média pacotes com 400 bytes, gerando um tráfego em torno de 5 kbps (dados reais obtidos a partir de medições nas aplicações de monitoramento de oleodutos terrestres).

As redes DTN são apropriadas para operar com as limitações de atrasos, largura de banda e consumo de energia, encontrados nas comunicações subaquáticas (VASILESCU *et al.*, 2005). Assim, é necessário o desenvolvimento de protocolos de roteamento eficientes que devem considerar a existência de nós móveis e fixos na rede subaquática, o que implica a adoção de soluções de roteamento dinâmico para esta rede.

3.6. Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentados conceitos essenciais sobre a comunicação subaquática que pode ser realizada através de ondas eletromagnéticas, ópticas e acústicas. Todas as três formas de comunicação têm suas próprias vantagens e limitações para atuar nas comunicações subaquáticas. Entretanto, as ondas acústicas fornecem os melhores resultados neste ambiente com alcances médios e taxas de transmissão relativamente baixas, mas completamente adequada às aplicações de monitoramento. Assim, a utilização de ondas acústicas continua sendo a forma de transmissão mais robusta e viável para a comunicação com os sensores submarinos.

3. Comunicação Subaquática

No próximo capítulo, é apresentado o sistema de monitoramento subaquático para exploração de petróleo da Bacia de Campos e a arquitetura de comunicação proposta, assim como os componentes principais para execução da coleta dos dados e da obtenção do posicionamento dos sensores.

Capítulo 4

Sistema de Monitoramento Subaquático

4.1. Introdução

O uso de redes acústicas de monitoramento em ambientes subaquáticos foi impulsionado pelo avanço dos modems acústicos atuais que proporcionaram o aumento do alcance para 5 km e taxas de transmissão de 5 kbps, fornecendo as características básicas necessárias para a implantação de aplicações de monitoramento neste ambiente. Portanto, é possível utilizar sensores acústicos subaquáticos instalados na infraestrutura submarina para monitorar pressão, temperatura e controle de posicionamento (RIBEIRO *et al.*, 2011). Esta última opção é especialmente importante para monitoramento do lançamento de novas linhas de dutos submarinos (SOLANO *et al.*, 2007).

A área de exploração de petróleo da Bacia de Campos é de aproximadamente 115.000 km² (CARMINATTI *et al.*, 2008) e composta por inúmeras plataformas e navios, além de diversas estruturas submarinas pertencentes a várias unidades de produção. As embarcações de suporte logístico deslocam-se por toda essa área, realizando a distribuição de recursos.

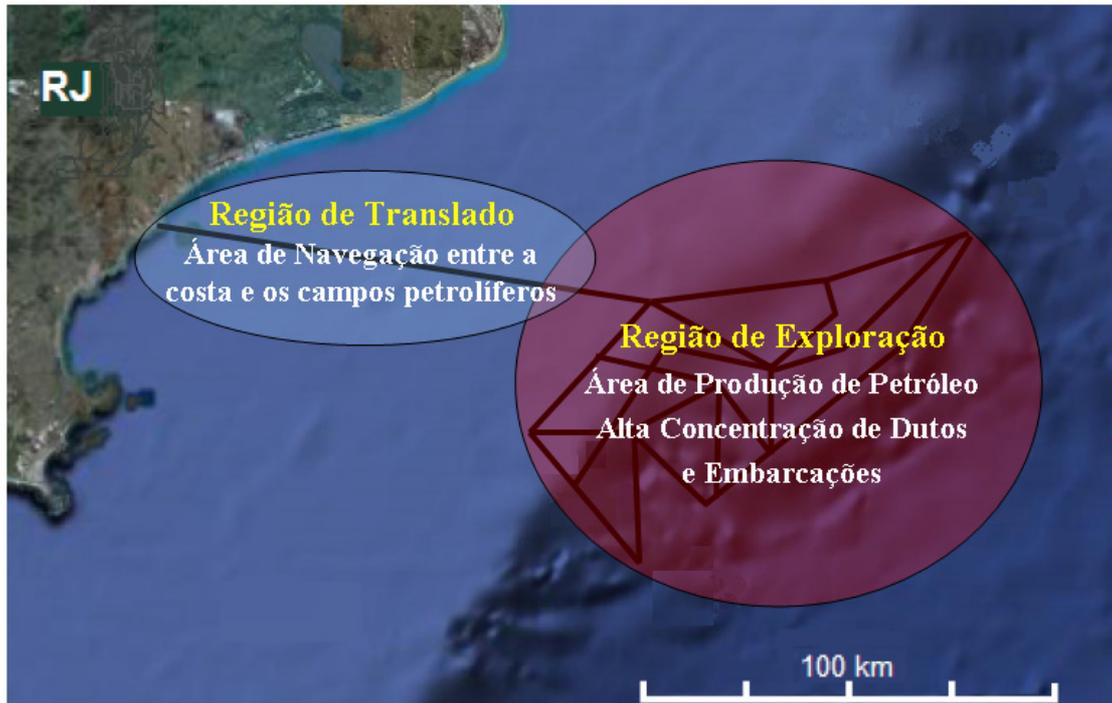


Figura 4.1: Áreas de navegação da frota de embarcações *offshore*.

A Bacia de Campos pode ser dividida em duas regiões bem distintas chamadas de translado e de exploração (Figura 4.1). A região de translado é uma área de passagem onde os navios de suporte logístico fazem o caminho entre a costa e os campos de petróleo. Já a região de exploração concentra a maior parte da infraestrutura submarina, responsável pela operação dos campos de produção de petróleo. É nessa região que os navios de suporte logístico permanecem grande parte do seu tempo, executando uma rotina de deslocamento e ancoragem a fim de realizar a distribuição de recursos para o abastecimento das unidades de produção.

Os navios de suporte logístico possuem comunicação via rádio e/ou satélite e as suas rotas, distribuídas por toda a área de exploração, são coincidentes aos dutos submarinos, tornando-se a opção mais adequada para captura dados dos sensores. A informação é gerada e armazenada nos sensores até que algum navio esteja disponível para a coleta das mensagens, conforme apresentado na Figura 4.2.

As longas distâncias e a dispersão das instalações na área *offshore*, afetam a densidade dos navios dentro do alcance dos sensores. Assim, esses navios não podem estar ao alcance dos sensores todo o tempo, impossibilitando o uso de uma arquitetura de rede convencional. Neste caso, uma arquitetura de comunicação baseada em redes

subaquáticas tolerantes a atrasos e interrupções se encaixa perfeitamente ao modelo de encaminhamento das mensagens nó a nó, sem o estabelecimento de um caminho fim a fim.

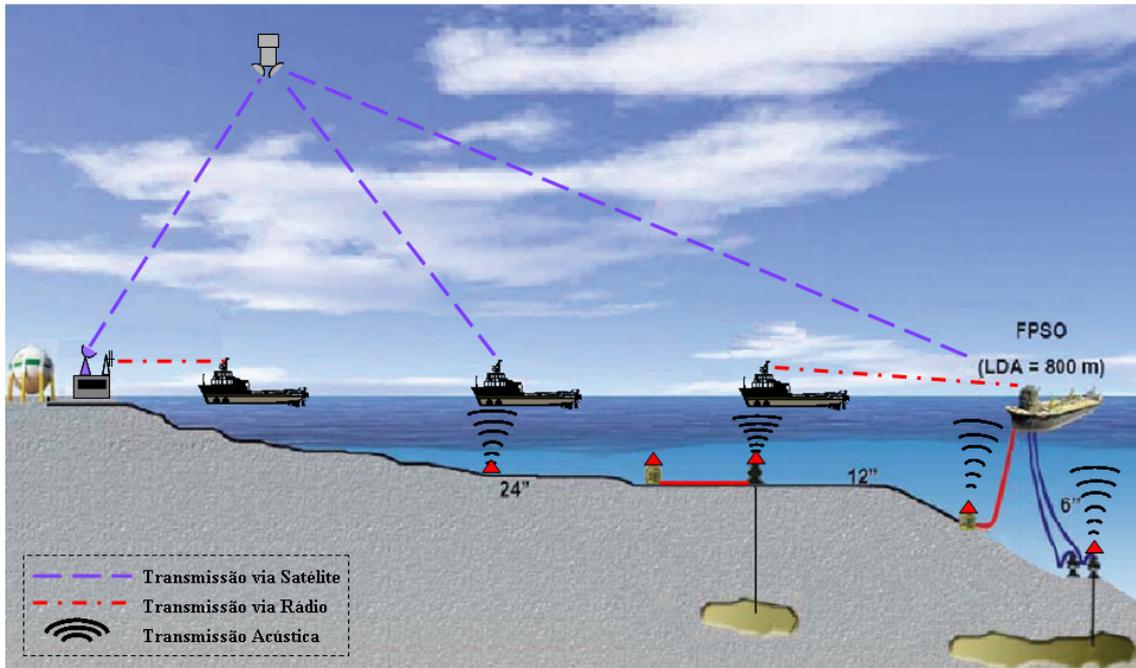


Figura 4.2: Sistema de monitoramento subaquático.

4.2. Rede Subaquática de Sensores

A implementação da rede subaquática de sensores baseia-se em nós equipados com sensores e modems acústicos também usados por (VASILESCU *et al.*, 2005). Os nós podem se comunicar com nós móveis (navios) ou fixos (plataformas) para receber informações das coordenadas dos pontos de referência e enviar os seus dados até alcançar um nó coletor. Este nó coletor de borda capta as mensagens no domínio subaquático e encaminha para o domínio não subaquático (AKIYLDIZ *et al.*, 2007). Neste tipo de rede, os nós mantêm uma operação autônoma de transmissão de dados, sendo responsabilidade do sensor a decisão sobre o cálculo da posição e a transmissão das informações, o que sempre ocorre quando um nó móvel está ao alcance. Assim, os sensores podem ser utilizados para o posicionamento e monitoramento até em tempo real, mas essa operação deve ser dimensionada para que não se gaste muita energia com

excessivas transmissões. O ajuste é necessário para garantir maior vida útil do sensor.

A rede de sensores proposta não terá apenas um sorvedouro, mas todos os nós móveis poderão coletar dados no domínio subaquático da rede DTN (*Delay/Disruption Tolerant Network*). Os sensores são instalados na infraestrutura submarina e programados para calcular a posição sempre que estiverem disponíveis 3 pontos de referência e gerar informações em intervalos fixos, até que estejam prontos para encaminhá-las ao centro de controle. Cada uma dessas amostras é codificada em um pacote de dados, geralmente em torno de 1 kbyte. Se for considerada uma taxa de transmissão de 5 kbps cada nó necessita apenas 1,6 segundos de conexão para transmitir o seu pacote, o que é totalmente viável para aplicações com amostragem baixa como no monitoramento de dutos (GUO *et al.*, 2010) e oceanográfico (PENTEADO *et al.*, 2010).

A rede DTN é capaz de transmitir mensagens sem o estabelecimento de um caminho fim a fim. A inexistência de caminho fim a fim está relacionada com os atrasos e desconexões existentes na rede (OLIVEIRA e DUARTE, 2007). Em ambientes subaquáticos, essas condições são causadas por mudanças constantes no meio acústico (PENTEADO *et al.*, 2010), que afetam a operação dos nós móveis, tais como interferências, hibernação de sensores para a conservação de energia ou as condições marítimas de navegação.

4.3. Arquitetura da Comunicação Subaquática

A arquitetura de comunicação trabalha através de domínios de comunicação, definidos pelo tipo de comunicação e associados à movimentação ou não do dispositivo. Esses domínios são compostos por sensores acústicos e nós móveis que devem oferecer a capacidade de armazenamento das mensagens. Esta característica pode ser garantida com o uso da camada de agregação e unidades de armazenamento, implementadas na arquitetura de rede tolerante a atrasos e desconexões (CERF *et al.*, 2007). Além disso, sensores acústicos são responsáveis pela definição da comunicação que melhor utilize os seus recursos.

A rede é composta pelos domínios subaquático e não subaquático. No domínio subaquático, os sensores acústicos geram mensagens que serão capturadas pelos nós acústicos móveis (embarcações). Essas mensagens são encaminhadas pelo domínio não

4. Sistema de Monitoramento Subaquático

subaquático, movendo-se na rede DTN até atingir o destino localizado em uma rede externa (Figura 4.3).

A arquitetura utilizada nesta rede acústica subaquática deverá adaptar-se às condições de comunicação da rede e recursos disponíveis. Portanto, a variação da quantidade de nós móveis ao alcance de cada sensor é um parâmetro importante para o protocolo de roteamento.

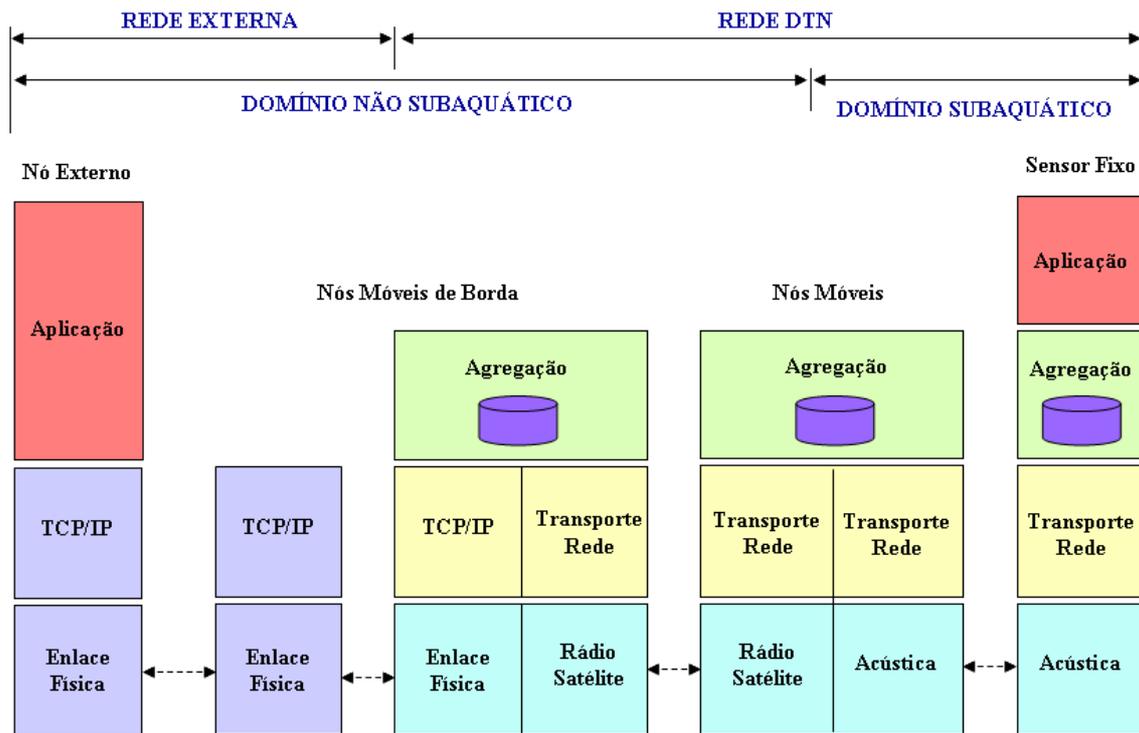


Figura 4.3: Arquitetura proposta para o sistema de comunicação subaquático.

Os nós móveis (embarcações) são entidades presentes na rede DTN, que serão usados para capturar as mensagens dos sensores, mas o número desses dispositivos depende da forma de deslocamento nas rotas marítimas. Todo o tráfego deve passar através dos navios antes de sair do domínio subaquático. Esses navios podem ter dois tipos de funções: captar mensagens dos sensores no domínio subaquático e retransmitir essas mensagens através do domínio não subaquático. Alguns nós móveis podem ser chamados de nós de borda, pois também são responsáveis pelo encaminhamento das mensagens para a rede externa, conforme apresentado na Figura 4.4.

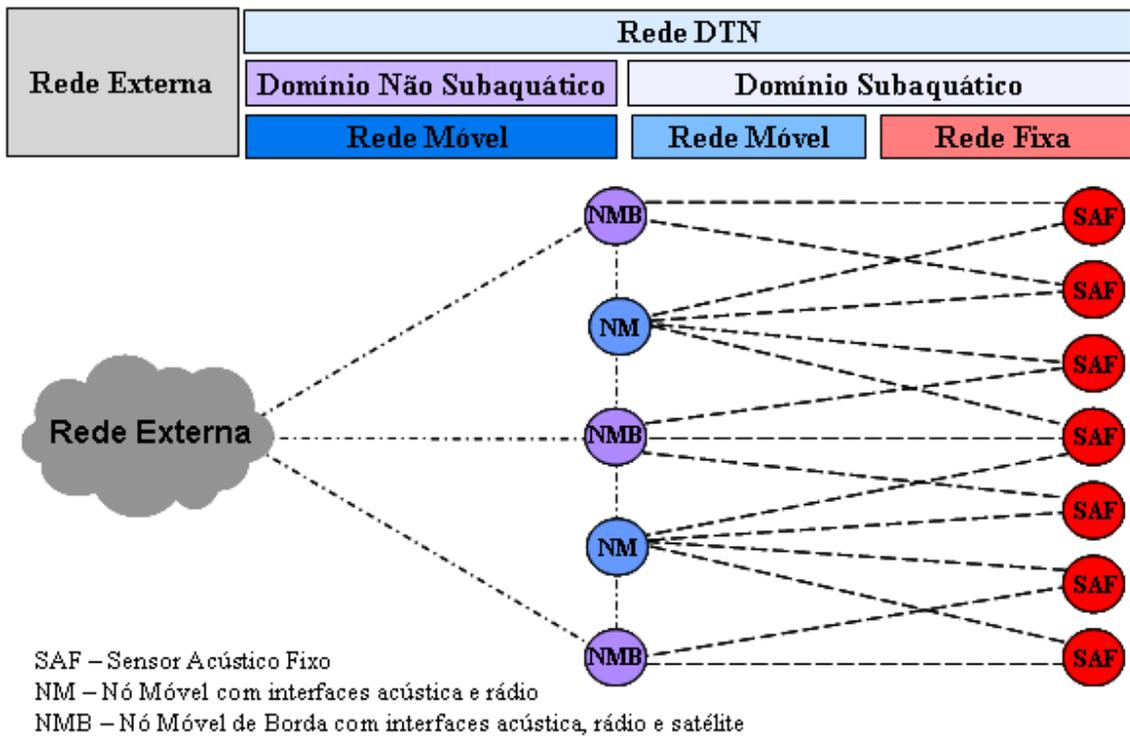


Figura 4.4: Comunicação entre nós móveis e sensores.

A arquitetura de monitoramento deve se adaptar às condições impostas a comunicação no ambiente subaquático e aos recursos de rede disponíveis. Portanto, a variação da quantidade de nós móveis dentro do alcance de cada sensor é um parâmetro importante para o sistema e pode ser usado para melhorar o desempenho da rede. O processo de encaminhamento das mensagens tem grande importância no funcionamento da rede, mas a escassez de navios pode diminuir a possibilidade de entrega da mensagem. Portanto, o protocolo de roteamento responsável pela determinação de qual nó móvel encaminhará as mensagens dos sensores pode ser baseado tanto no protocolo Epidemic (MUNDUR e SELIGMAN, 2008) como no protocolo Prophet (LINDGREN *et al.*, 2004). Assim, poderá ser possível verificar qual destes protocolos melhor se adapta às condições do sistema de monitoramento.

4.4. Algoritmo de Localização

A determinação do posicionamento de um elemento móvel ou fixo num sistema de coordenadas pode ser realizada de várias formas (GIBSON, 1999). Qualquer que seja o sistema de coordenadas adotado, esses métodos de localização requerem o conhecimento de pelo menos três pontos de referência no sistema, empregando métricas que estimam a posição do nó desconhecido a partir das distâncias medidas até os pontos de referência e suas coordenadas. Assim, os métodos de localização geralmente possuem dois componentes básicos: estimativa da distância e cálculo computacional da posição.

4.4.1. Estimativa da Distância

A estimativa da distância consiste em estimar, a partir das características do sinal transmitido, a distância entre dois nós. Essa estimativa pode ser implementada com base na medição da intensidade do sinal recebido RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), do ângulo de chegada AOA (*Angle of Arrival*), do tempo de chegada TOA (*Time of Arrival*), ou da combinação destes métodos.

O método de estimativa da distância pela medição da intensidade do sinal recebido (RSSI) é baseado na verificação da atenuação do sinal transmitido (SAVVIDES *et al.*, 2001). No entanto, em ambientes reais, este indicador é altamente influenciado por ruídos, obstáculos e tipo de antena, o que torna difícil a modelagem matemática. A principal fonte de erro é o efeito do desvanecimento e sombreamento causado pelos múltiplos caminhos. Nos sistemas subaquáticos onde a potência do sinal acústico é controlada para economizar a bateria dos sensores, a medição pode sofrer alterações (STOJANOVIC, 2006).

O método de ângulo de chegada do sinal (AOA - *Angle of Arrival*) também pode ser usado por sistemas de localização (NICULESCU e NATH, 2003). Este ângulo é utilizado para estimar a localização do receptor. A estimativa do AOA é feita usando antenas diretivas ou um conjunto de receptores uniformemente dispostos. Basicamente, as antenas direcionais do receptor medem e marcam a direção do sinal recebido. A distância da fonte transmissora é descoberta então, através de geometria básica. A

dispersão do sinal em torno do receptor e transmissor pode alterar a medição do ângulo de chegada, limitando o alcance dos dispositivos de medição. A necessidade de utilização de *hardware* extra e o curto alcance limitam a utilização deste método. Na comunicação acústica subaquática, as transmissões são cercadas por fontes de interferências que afetam a recepção, tornando a abordagem AOA possivelmente impraticável neste ambiente.

A última técnica de estimativa de distância utiliza a medição do tempo de propagação do sinal (SAVVIDES *et al.*, 2001). Este método pode trabalhar com a diferença no tempo de propagação de pelo menos dois sinais TDOA (*Time Difference of Arrival*) ou a medição do tempo de propagação de um único sinal TOA (*Time of Arrival*).

Na abordagem TDOA, são usadas as diferenças nos tempos de chegada em relação aos dois sinais emitidos. Estes sinais devem ter velocidades de propagação diferentes, como o rádio/ultrassom ou de rádio/acústico. Essa opção não pode ser utilizada no ambiente subaquático devido à falta de alternativas para transmissão do segundo sinal.

A medição através do método TOA estima a distância entre o transmissor e o receptor encontrando o tempo de propagação unidirecional. Geometricamente, isto fornece um círculo, centrado no ponto de referência, em que o receptor deve estar. Neste caso, a distância entre dois nós é diretamente proporcional ao tempo que o sinal leva para se propagar de um ponto a outro. Desta forma, se um sinal foi enviado em tempo t_1 e atingiu o nó receptor no momento t_2 , a distância entre o emissor e o receptor é $d = c (t_2 - t_1)$, onde c é a velocidade de propagação do sinal e t_1 e t_2 são os tempos em que o sinal foi enviado e recebido. A precisão desse tipo de estimativa depende do sincronismo entre os nós.

4.4.2. Cálculo da Posição

Os métodos de localização processam as medidas das distâncias efetuadas pelo nó até três ou mais pontos de referência, executando uma série de cálculos para definir o posicionamento. O processo de definição da posição depende do método utilizado, que pode ser baseado na trilateração, multilateração ou triangulação.

A trilateração é o método mais básico e intuitivo, onde é calculada a posição geográfica de um nó através da intersecção de três circunferências. Para estimar uma posição, são necessários pelo menos três pontos de referência associados com as respectivas distâncias para o nó ($d_1; d_2; d_3$) (SAVVIDES *et al.*, 2001). Os círculos formados pela posição e distância de cada um dos pontos de referência, podem ser representados pela fórmula $(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2 = d_r^2$, onde (x, y) é a posição que se quer calcular, (x_r, y_r) é a posição do nó de referência r , e d_r é a distância do nó ao ponto de referência r . Assim, a localização do nó está no ponto de intersecção das três circunferências, considerando o caso hipotético sem erros nas estimativas das distâncias (Figura 4.5 (a)) ou em uma área de intersecção se considerado o caso real com erros nas medições (Figura 4.5 (b)).

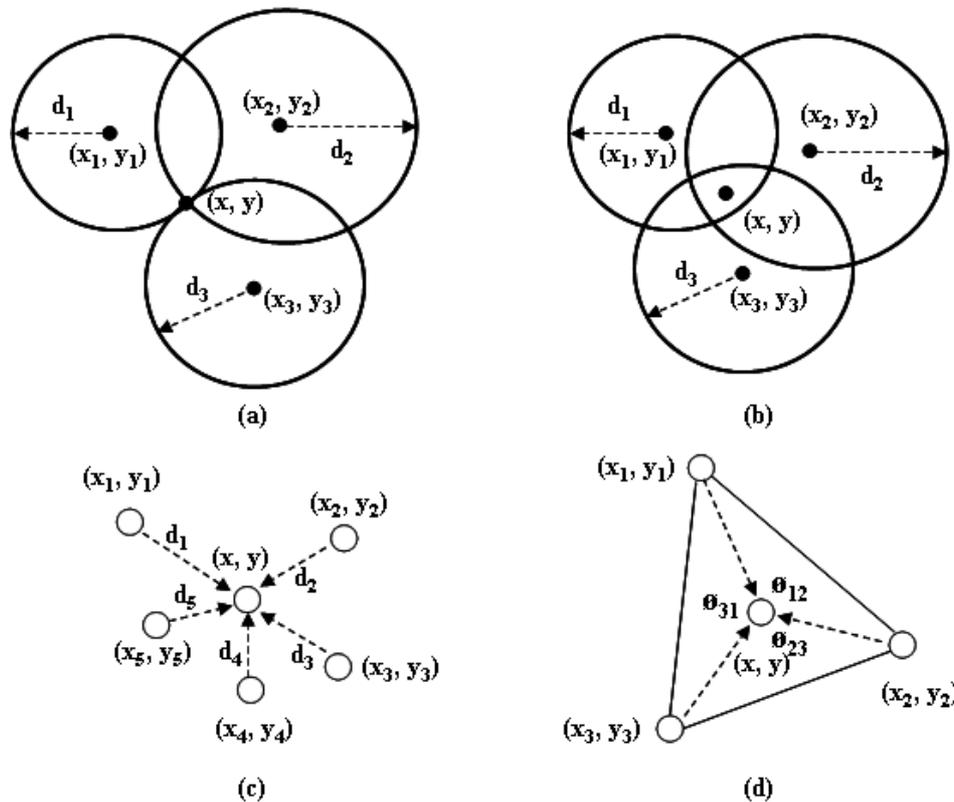


Figura 4.5: Cálculo da posição: (a) caso hipotético de trilateração; (b) caso realista de trilateração; (c) multilateração; e (d) triangulação.

A multilateração é uma generalização da trilateração (PATWARI *et al.*, 2005), que pode ser utilizada quando existem mais de três pontos de referência (Figura 4.5 (c)). Neste caso, o cálculo utiliza um sistema de equações para a determinação da localização. O número de operações é maior, demandando um maior processamento no

nó, o que geralmente dificulta a sua utilização, mesmo considerando sua maior precisão.

Quando é utilizada a técnica baseada em ângulo de chegada em vez de distâncias, aplica-se a triangulação (SAVVIDES *et al.*, 2001). O nó estima seu ângulo a cada um dos três pontos de referência e, com base nesses ângulos e as posições de referência, que formam um triângulo, calcula a sua posição através de simples relações trigonométricas (Figura 4.5 (d)).

4.4.3. Requisitos do Posicionamento

Geralmente, para estimar uma posição, um nó utiliza pelo menos três estimativas de distâncias, cada uma com um erro associado. Embora seja sempre desejável, a precisão não é a única característica importante na escolha do método mais adequado para a aplicação. Outros fatores devem ser considerados, como o custo, *hardware* específico necessário, processamento e energia. Assim, a determinação do método para definir a posição depende dos requisitos da aplicação.

Aplicações de posicionamento subaquático que trabalham em conjunto com sistemas de monitoramento podem utilizar técnicas de menor precisão em escalas de metros. Para essas aplicações, a localização precisa do sensor em alguns casos é desnecessária, sendo tolerado o conhecimento de sua vizinhança. Todavia, nas atividades subaquáticas que necessitem de precisão, pode ser utilizado um sistema de localização específico montado com pontos de referências próximos e dedicados, para aumentar a precisão medições.

4.5. Posicionamento Subaquático

A utilização de redes de sensores acústicos para o monitoramento do posicionamento no ambiente subaquático é possível desde que o sensor receba as coordenadas de 3 pontos de referência e seja capaz de estimar as distâncias. O mapeamento da posição subaquática tem especial importância no monitoramento do lançamento de novas linhas de dutos submarinos (SOLANO *et al.*, 2007), no acompanhamento das manobras de instalação e movimentação das estruturas

submarinas.

Como as embarcações de suporte logístico têm coordenadas conhecidas, pois possuem sistemas GPS, estas embarcações podem ser utilizadas, em conjunto com as unidades de produção (plataformas), para disponibilização dos pontos de referência necessários para a determinação do posicionamento dos sensores. Assim, o perfil de movimentação destas embarcações é importante para determinar a quantidade de navios que podem estar ao alcance dos sensores, para determinação do posicionamento e captação das informações. Neste caso, a utilização destes navios em conjunto com as unidades de produção pode aumentar as chances de haver pelo menos três unidades de referência para os sensores.

O sistema de posicionamento utiliza uma rede de sensores DTN, mas o processo de localização é realizado através de um único salto de comunicação entre os pontos de referência (navios e plataformas) e os sensores subaquáticos. Esta característica privilegia a economia das baterias dos sensores, pois no processo de posicionamento o sensor somente recebe os sinais de referência e calcula a posição. Deste modo, para obter o posicionamento o sensor não precisa realizar transmissões, gastando menos energia.

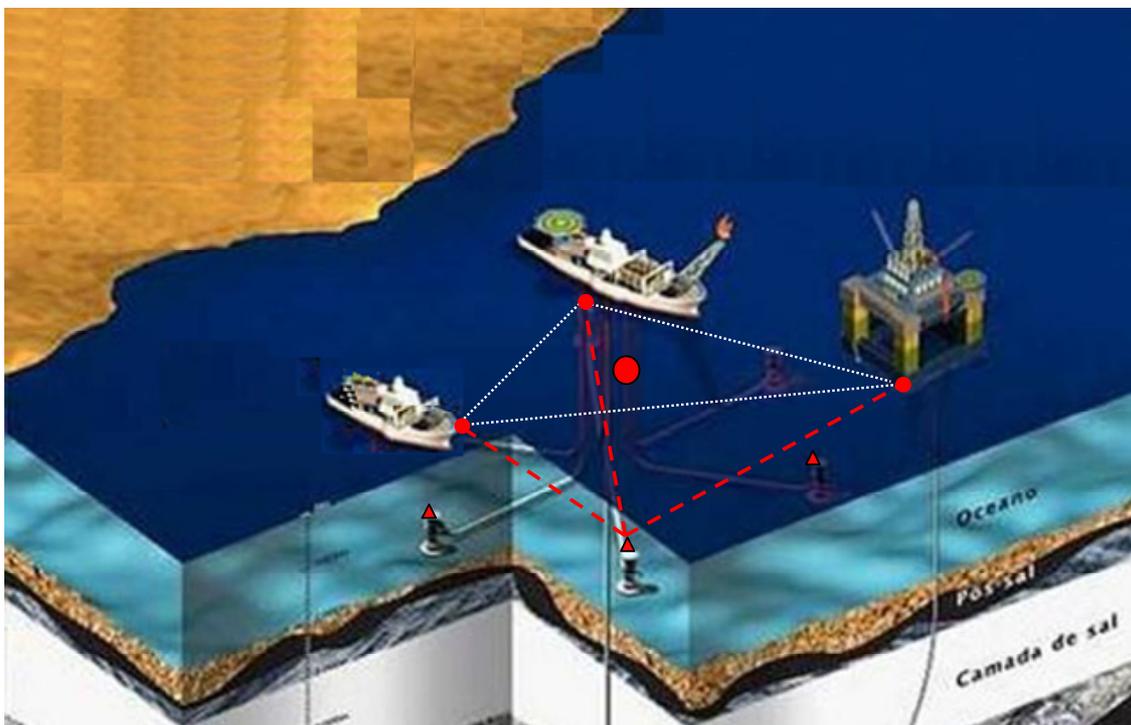


Figura 4.6: Processo de posicionamento.

A Figura 4.6 representa o processo de localização realizado pelo sistema de posicionamento subaquático, onde as referências para o posicionamento foram dadas por uma embarcação de suporte logístico, um FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) e uma plataforma de produção. O ponto no centro do triângulo na superfície é a representação da posição do sensor subaquático em coordenadas geográficas. Essa representação em conjunto com a informação da profundidade permite mapear objetos subaquáticos seguindo um modelo de localização bem conhecido.

É possível ativar o sensor enviando uma mensagem de controle a fim de iniciar o processo de cálculo do posicionamento. Uma vez que o sensor é ativado, ele estima as distâncias e calcula a posição com as coordenadas dos pontos de referência.

As estimativas das distâncias serão realizadas através do método TOA (*Time of Arrival*), respeitando o modelo de propagação de ondas acústicas no oceano. A utilização deste método se deve a sua maior simplicidade, sem acarretar na implementação de *hardwares* adicionais ao sensor. De acordo com a Figura 4.7, o sensor subaquático P tem distâncias estimadas d_{pa} , d_{pb} e d_{pc} das referências A, B e C, este ponto pode ser rebatido até a superfície através da decomposição de triângulos. Este ponto na superfície estará no mesmo plano dos pontos de referência, sendo possível determinar as suas coordenadas (x, y) por trilateração.

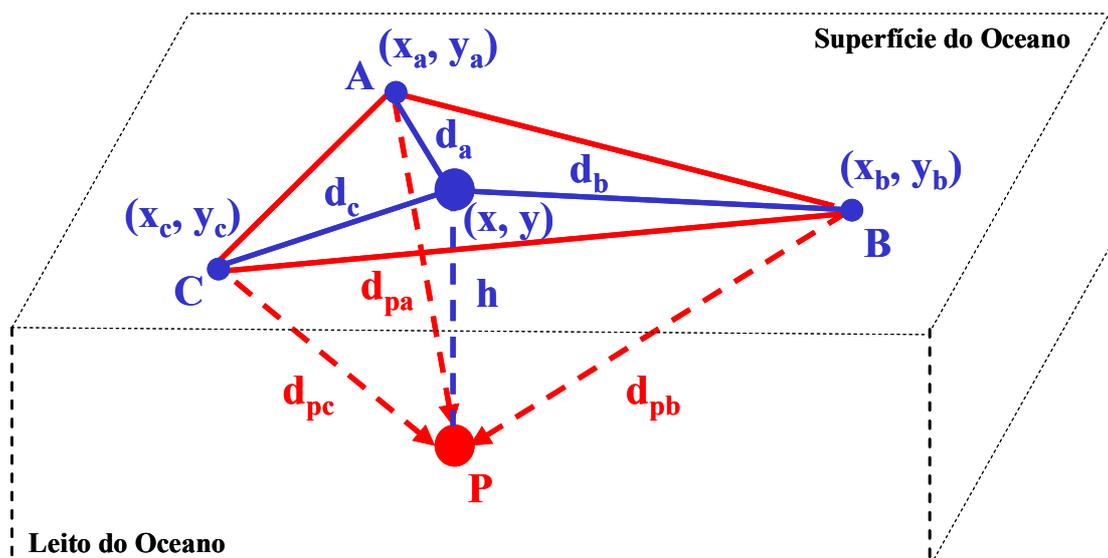


Figura 4.7: Processo de definição das coordenadas e profundidade.

As coordenadas para os pontos A, B, C e P são respectivamente (x_a, y_a) , (x_b, y_b) , (x_c, y_c) e (x_p, y_p) . As distâncias do ponto na superfície para os três pontos de referência A, B e C são d_a , d_b , d_c e podem ser representadas através das Equações 4.1, 4.2 e 4.3.

$$(x_p - x_a)^2 + (y_p - y_a)^2 = d_a^2 \quad (4.1)$$

$$(x_p - x_b)^2 + (y_p - y_b)^2 = d_b^2 \quad (4.2)$$

$$(x_p - x_c)^2 + (y_p - y_c)^2 = d_c^2 \quad (4.3)$$

As distâncias d_a , d_b , d_c são obtidas pela decomposição dos triângulos. Portanto, temos três equações para duas incógnitas, tornando viável a determinação do posicionamento do ponto P na superfície. Assim, é possível posicionar um objeto subaquático através das coordenadas geográficas e profundidade.

4.6. Vantagens sobre Outros Sistemas

O sistema de monitoramento proposto foi projetado para se adaptar às características do ambiente *offshore* de exploração de petróleo, especialmente o encontrado na Bacia de Campos. Portanto, a utilização de uma rede DTN que utiliza as embarcações de suporte logístico tem como principal vantagem a realização da captura dos dados dos sensores por unidades móveis não dedicadas que trabalham autonomamente (Figura 4.8). Ao contrário de outros sistemas cabeados que utilizam boias para captura de dados, a utilização dessas embarcações como mulas de dados simplifica a coleta dos dados dos sensores, sem agregar custos adicionais ao sistema.

A utilização de boias ancoradas fornece uma alternativa para o monitoramento nos oceanos, fornecendo uma plataforma para sensores executarem a coleta de dados ao longo da coluna d'água com grande autonomia energética. No entanto, os benefícios obtidos com estes equipamentos se contrapõem aos altos custos dos equipamentos e manutenção devido a seu alto nível de complexidade (TAFT *et al.*, 2009). Estas boias são compostas por uma série de equipamentos como cabos de ancoragem, cabos de comunicação, boias de sustentação, e modems indutivos.

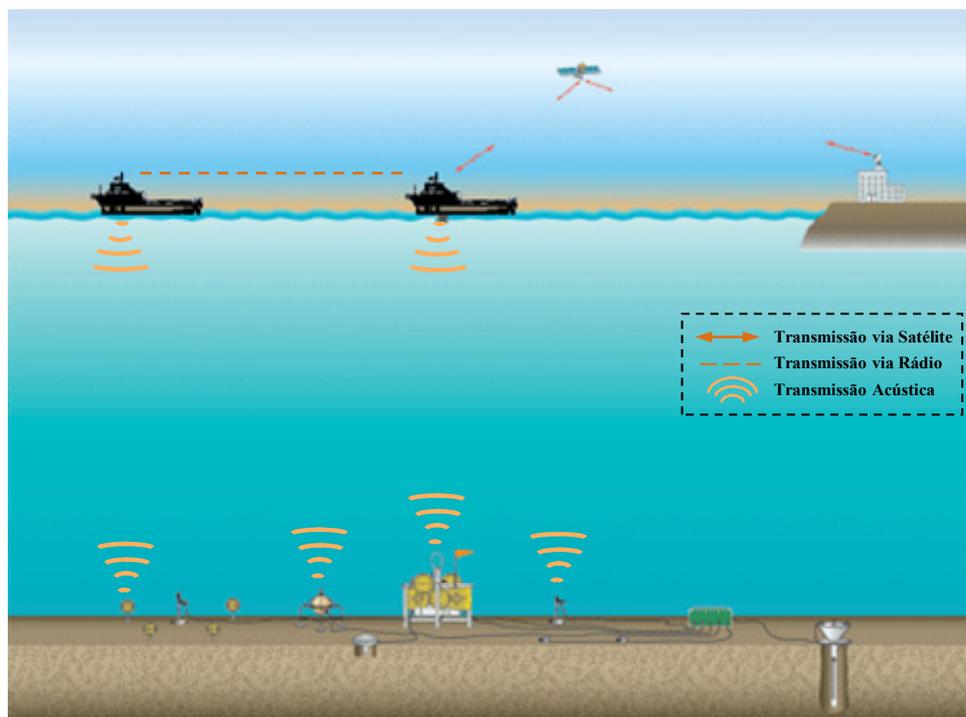


Figura 4.8: Monitoramento subaquático através de embarcações.

As boias ficam na superfície fixadas no leito oceânico, nos locais de interesse, ou ficam submersas a determinada profundidade, atadas a ancoras através de cabos, conforme mostrado na Figura 4.9. Em ambos os casos essas sondas são programadas para adquirir dados durante um período predefinido, após o qual são resgatadas para recuperação e análise dos dados registrados. Embora seja a fonte da maior parte dos dados oceanográficos hoje disponíveis, essa forma de aquisição de dados tem diversos inconvenientes como a não monitoração em tempo real, a limitada amostragem de um ponto por vez, a limitada capacidade de armazenamento e autonomia de operação. Além disso, não é possível identificar defeitos nos sensores durante a operação, sendo esses apenas constatados ao final do ciclo de operação, com prejuízo irrecuperável a coleta de informações.

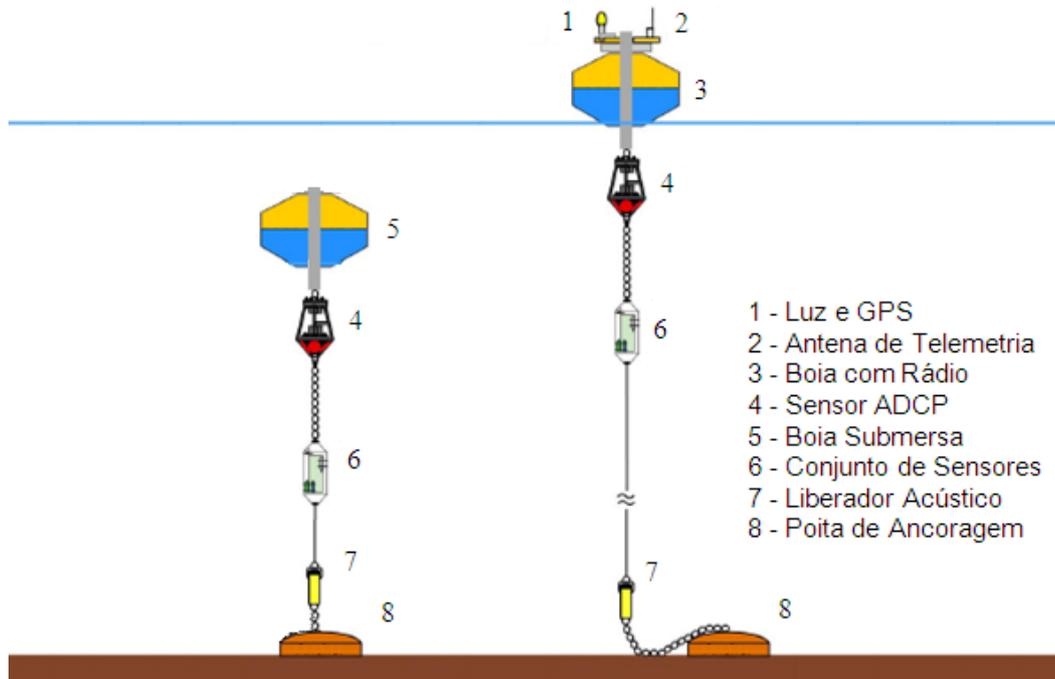


Figura 4.9: Sonda com boia submersa e de superfície.

Há experiências conectando essas sondas através de cabos a boias com interface de rádio (BROWN *et al.*, 2010), 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 boia na superfície através de cabos, seja por limitações operacionais, como o tráfego de embarcações e vandalismos ou pela própria profundidade em que certas sondas precisam ser instaladas. A Figura 4.10 mostra o arranjo para aquisição convencional com boia flutuante com GPS e interface de rádio.

Mesmo com a vantagem da utilização dos cabos para comunicação proporcionando taxas de transmissão de dados praticamente ilimitadas a um custo baixo, esses cabos são propensos a falhas mecânicas e existe a necessidade de manutenção periódica. Os cabos eletro-óptico-mecânicos (EOM - *Electro-optical mechanical*), instalados ao longo de uma linha de amarração, têm baixa resistência a falhas mecânicas com custo na ordem de US\$ 6.250,00 por cada 100 metros de cabo. Os modems também fazem uso de um fio rígido ao longo da linha de amarração e,

4. Sistema de Monitoramento Subaquático

portanto, também são suscetíveis a falhas mecânicas. O custo total depende da profundidade da amarração e dos custos dos equipamentos na boia.



Figura 4.10: Boia com GPS e antena de telemetria.

Considerando o uso de boias para a transmissão dos dados coletados onde a amarração está localizada na profundidade de 80 m de lâmina d'água e seu conjunto de sensores, o custo somente da amarração com um cabo eletro-óptico-mecânico de qualidade custaria cerca de US\$ 5.000,00 (não incluindo o custo dos conectores submarinos). Neste caso, é possível verificar que o custo desta solução é maior em comparação com a utilização de sensores subaquáticos sem fio.

Geralmente a abrangência das soluções de monitoramento subaquático com boias é limitada, sendo incompatíveis com as necessidades e características da área de exploração de petróleo *offshore*. Estes sistemas são muito suscetíveis às condições

climáticas da superfície, tendo enorme dificuldade de transmissão de dados a longas distâncias devido à própria movimentação da boia, o que impede a utilização de sistemas estabilizados de comunicação via satélite. Assim, a diferença primordial das soluções que utilizam boias em relação ao sistema proposto pode ser demonstrada através do maior custo e complexidade referente à implantação e manutenção do sistema. Na implantação devem ser incluídos novos custos com toda infraestrutura necessária para a fixação e realização da comunicação da boia. Já na manutenção, é possível verificar um custo maior devido à complexidade e ao desgaste dos componentes externos devido à movimentação constante.

4.7. Considerações Finais

Neste capítulo, foi apresentado o sistema de monitoramento subaquático, sendo descritos os componentes responsáveis pela coleta das informações e a metodologia de obtenção do posicionamento dos sensores. Assim, foram descritas as características do ambiente de exploração de petróleo da Bacia de Campos que contribuíram para a utilização dos navios de suporte logístico na tarefa de coleta das informações dos sensores e, por conseguinte, a implementação de uma arquitetura de comunicação tolerante a atrasos e desconexões. A rede é composta pelos domínios subaquático e não subaquático. No domínio subaquático, os sensores acústicos geram mensagens que serão capturadas pelos nós acústicos móveis (embarcações). Essas mensagens são encaminhadas pelo domínio não subaquático, movendo-se na rede DTN até atingir o destino localizado em uma rede externa. Além disso, foram apresentadas as vantagens do sistema proposto em relação à utilização de boias de monitoramento.

No capítulo seguinte, é apresentada a análise da viabilidade do sistema proposto e os resultados obtidos nas simulações.

Capítulo 5

Procedimento de Análise e Resultados

5.1. Introdução

A análise do sistema de monitoramento subaquático proposto é feita através de uma série de simulações destinadas a verificar a comunicação na rede com relação à movimentação dos navios. O objetivo é mostrar o comportamento da rede em um cenário real a fim de verificar a viabilidade do sistema de comunicação usando a frota de navios de suporte logístico da área de exploração de petróleo da Bacia de Campos na tarefa de capturar dados dos sensores subaquáticos (RIBEIRO *et al.*, 2011) e de prover, através dos navios em conjunto com as unidades de produção, os pontos de referência para o cálculo da posição dos sensores.

Para avaliar e comparar o desempenho do sistema foi utilizado o simulador ONE (KERANEN *et al.*, 2009). Este simulador usa um modelo de comunicação específico para redes tolerantes a atrasos e interrupções, onde os nós fazem a recepção, o armazenamento e o envio de mensagens com diferentes algoritmos de roteamento. Além disso, parâmetros específicos que refletem a dinâmica do ambiente de exploração de petróleo foram incluídos no simulador ONE a fim de estabelecer um cenário tão realista quanto possível. Esses parâmetros têm o objetivo de modelar a comunicação e a movimentação executada pelas embarcações como rotas marítimas, paradas, velocidades e pontos de interesse.

Devido à importância dos cenários e dos deslocamentos dos navios no sistema de monitoramento, todas as simulações foram baseadas na área de exploração de petróleo da Bacia de Campos. As rotas dos nós móveis foram definidas de acordo com as rotas marítimas utilizadas pelos navios a fim de obter um cenário realista. Estes caminhos marítimos percorridos pelos navios de suporte logístico foram obtidos através do Sistema de Gerenciamento de Frotas da Petrobras (BENTZ *et al.*, 1994), o que permitiu a inclusão das movimentações executadas por estes navios no simulador.

Foi utilizado nas simulações o padrão de mobilidade “*Shortest Path Map Based Movement*”, que usa o algoritmo de Dijkstra para definir o caminho mais curto para os destinos, que são escolhidos através das rotas disponíveis. Estes parâmetros têm impacto nos tempos de contato dos nós na rede.

O sincronismo da rede é fornecido pelos navios, que ao comunicar-se com os sensores, sincronizam a comunicação antes de ser efetuada a transmissão das informações. O canal de comunicação foi simulado sem erros devido às limitações da ferramenta ONE. Atualmente, os modems acústicos utilizam modulações específicas que permitem que a taxa de erros na comunicação seja menor que 10^{-9} (UWM, 2012).

5.2. Cenário

As simulações consideram uma rede móvel com 25 sensores na região de exploração e até 400 nós móveis (navios) comunicando-se com um centro de controle fora da rede DTN. Os nós móveis, no início de cada simulação, são distribuídos aleatoriamente sobre as rotas marítimas e se movem de acordo com o modelo de mobilidade “*Shortest Path Map Based Movement*” com velocidades entre 10 a 25 km/h e tempos de pausa entre 1-3 horas, representando as características da movimentação dos navios de suporte logístico na Bacia de Campos. Os nós móveis participam dos dois grupos que representam os tipos de navios de suporte logístico, de acordo com o tipo disponível de comunicação, VHF ou VHF/Satélite (RIBEIRO *et al.*, 2011a). Cada simulação foi executada dez vezes (com diferentes sementes geradoras de números aleatórios para os modelos de mobilidade utilizados). Todos os resultados apresentados nos gráficos são médias dos resultados obtidos, com barras de erro que representam intervalos de confiança de 95%.

Os navios percorrem movimentos específicos em cada tipo de região:

- região de traslado: contendo um total de 5 sensores, que equivale a ter um sensor a cada 20 km nos dutos submarinos, onde as embarcações geralmente percorrem grandes distâncias sem paradas e em velocidades praticamente constantes;
- região de exploração: contendo 20 sensores espalhados na malha de dutos submarinos, onde as embarcações percorrem pequenas distâncias com paradas constantes nas unidades de produção (plataformas fixas, plataformas semissubmersíveis e FPSOs - *Floating Production Storage and Offloading*), permanecendo ancoradas em pontos determinados a espera de novos planos de operação.

Atualmente, existem 254 navios de suporte logístico operando para a Petrobras, mas a expectativa é que esse número aumente para 465 até 2013. Essa informação é baseada na apresentação do plano de negócios da Petrobras 2010 – 2014, feita por GABRIELLI e BARBASSA (2010). Como a Bacia de Campos atualmente trabalha com quase 80% da frota de navios da Petrobras, optou-se por utilizar este número nas simulações.

Outra característica importante do modelo de movimento refere-se à importância das paradas que são executadas durante o deslocamento navios, variando de 1 a 3h dependendo do processo de suprimento executado. Estes pontos de interesse representam as unidades de produção *offshore* e áreas de ancoragem concentradas na região de exploração. A Figura 5.1 apresenta o cenário básico das simulações, onde podem ser identificados os pontos de interesse, os sensores distribuídos nas regiões de traslado e exploração, assim como as rotas dos navios (RIBEIRO *et al.*, 2011a).

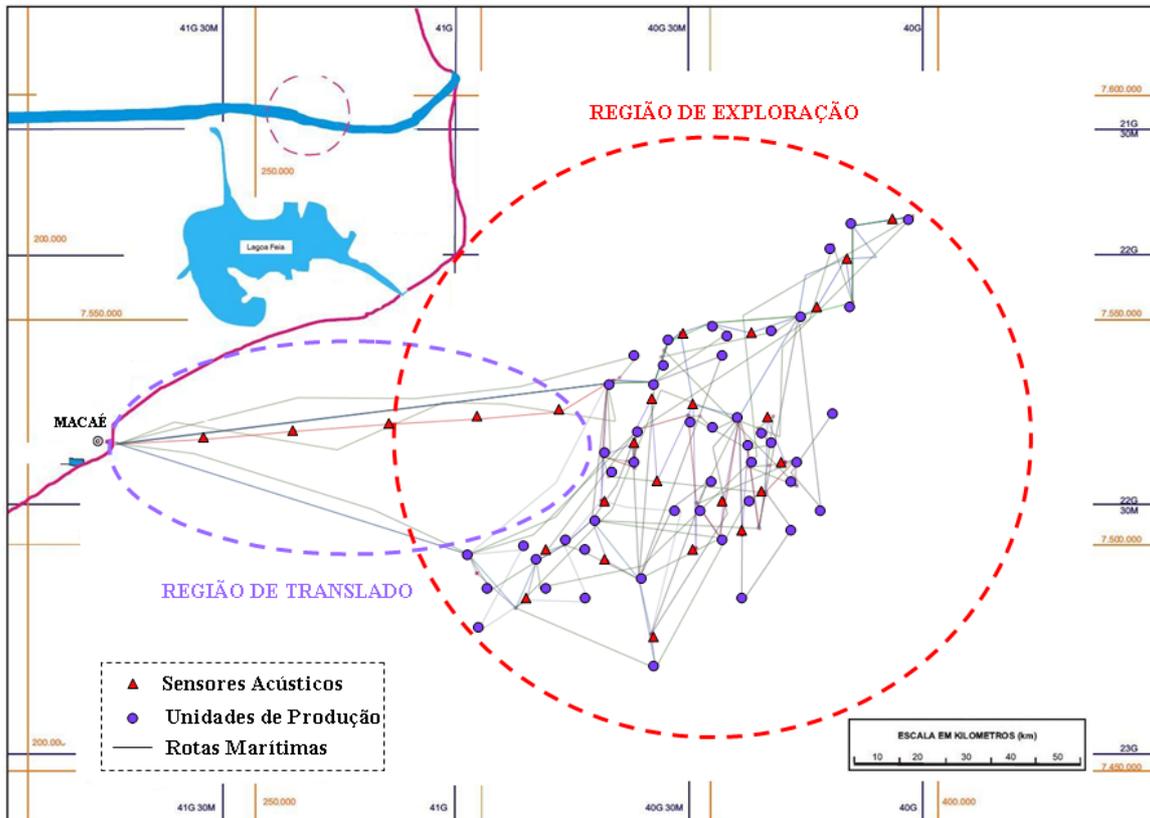


Figura 5.1 Cenário das simulações.

A definição dos parâmetros das simulações foi baseada nas características da área de exploração de petróleo da Bacia de Campos:

- área simulada de 250 km x 250 km (região de translado e de exploração);
- os pontos de interesse são 48 na região de exploração representando as unidades de produção, não existindo na região de translado;
- cinco sensores distribuídos em pontos estratégicos na região de translado;
- vinte sensores distribuídos em pontos estratégicos na região de exploração de petróleo;
- o número de nós móveis foi definido respeitando um cenário real com até 400 navios;
- a porcentagem de navios com sistema de satélite foi de 27%, seguindo a proporção encontrada atualmente na Bacia de Campos;
- a velocidade dos navios pode variar entre 10 e 25 km/h (MAERSK, 2012);

- período de simulação de 24 horas.

Toda conexão é realizada somente se os nós (sensores e navios) estiverem dentro do alcance. Assim, o comportamento da rede depende das características da comunicação acústica, da comunicação via rádio, do tamanho dos buffers e da frequência de geração das mensagens, apresentadas a seguir:

- o alcance das comunicações acústicas foi definido como 5 km;
- a velocidade de transmissão de dados para a comunicação acústica foi de 5 kbps;
- o alcance dos rádios VHF foi definido como 20 km;
- a velocidade de transmissão de dados para os rádios VHF foi de 20 kbps;
- a capacidade de armazenamento foi definida como 10 Mbytes, respeitando as características dos modems acústicos;
- as mensagens foram geradas com distribuição uniforme entre 60s e 300s;
- o tamanho das mensagens variou de 1 a 2 kbytes.

Como o tamanho da mensagem pode variar de 1 a 2 kbytes, pode representar a troca de arquivos de texto com informações sobre pressão, vazão, temperatura, coletadas de sensores instalados nos oleodutos, de acordo com dados obtidos a partir de medições feitas no aplicativo de monitoramento de oleodutos terrestres.

Para simular um cenário de monitoramento realista, foram consideradas as características específicas de cada região, o que normalmente influencia o tipo de movimento e a densidade de navios. Com exceção das unidades de produção (plataformas), os sensores e os navios podem se movimentar. Os sensores têm um perfil de movimentação bem limitado (10 a 50 m) a fim de representar deslocamentos causados por movimentação do leito marinho. Já os navios se deslocam de acordo com a necessidade de navegação, através das rotas estabelecidas na área monitorada. Em uma operação típica, os navios atravessam a região de traslado encaminhando-se para a região de exploração, onde permanecem por longos períodos executando tarefas de suporte e logística. Durante esta operação, os navios podem realizar a aquisição dos dados sempre que um sensor estiver dentro do alcance.

5.3. Análise dos Protocolos de Roteamento

A avaliação foi focada na verificação do comportamento do sistema nas duas regiões de movimentação, utilizando os protocolos Epidemic (MUNDUR e SELIGMAN, 2008) e Prophet (LINDGREN *et al.*, 2010) para verificar o encaminhamento de mensagens nos domínios de comunicação. Esses protocolos foram escolhidos devido a mecanismos específicos de comunicação que eles representam.

As simulações procuraram verificar as seguintes informações do sistema:

- porcentagem dos sensores alcançados pelas embarcações;
- contatos realizados na rede;
- tempo médio que as mensagens ficam armazenadas até a transmissão;
- probabilidade de entrega das mensagens;
- latência na rede;
- relação entre mensagens entregues e criadas.

5.4. Análise dos Pontos de Referência

A análise pretende verificar a disponibilidade dos pontos de referência na rede provida pelo uso da frota de navios de suporte logístico em conjunto com as unidades de produção. Essas referências devem ser capazes de permitir que os sensores subaquáticos obtenham as informações de posição com um período de amostragem adequado com as necessidades da operação da Baía de Campos. O encaminhamento de mensagens nos domínios de comunicação foi feito com o protocolo Epidemic (MUNDUR e SELIGMAN, 2008).

As simulações visam verificar as seguintes informações do sistema:

- porcentagem dos sensores alcançados por três referências;
- número de contatos realizados na rede;
- tempo médio para obtenção da posição.

5.5. Resultados da Rede de Monitoramento

O sistema de monitoramento deve equilibrar a disponibilidade de recursos da rede com o uso efetivo dos sensores. Logo, a forma de monitoramento também pode afetar a quantidade de informações e mensagens enviadas. Assim, cada simulação foi realizada a fim de verificar o comportamento do sistema em relação à movimentação e o aumento da frota de navios.

A imprevisibilidade do contato é uma condição quase obrigatória nas redes DTN, sendo o comportamento da rede dependente dessa primeira etapa de comunicação. Portanto, a verificação dos contatos realizados pode demonstrar o desempenho da rede, permitindo visualizar a capacidade do sistema em iniciar a comunicação.

A forma de monitoramento pode ter impacto na quantidade de informação e mensagens enviadas. Assim, foi possível verificar que mesmo com a geração de mensagens a cada 60 segundos nos sensores, o número de mensagens enviadas é muito inferior a capacidade da rede.

Considerando o modelo apresentado, é possível avaliar dois cenários distintos:

- embarcações na região de traslado: nesse caso, a disponibilidade das embarcações é baixa, onde o monitoramento pode ser comprometido pela escassez de embarcações, mas aumentando a vida útil dos sensores;
- embarcações na região de exploração: nesse caso, a presença maciça de embarcações na área de produção de petróleo, aumenta a disponibilidade da rede, mas diminui a vida útil dos sensores.

5.5.1. Sensores Alcançados

A cada simulação, foi possível verificar a capacidade dos navios em alcançar os sensores e captar as mensagens. Neste caso, foi determinada a fração de sensores contatados em cada cenário, como mostrado na Figura 5.2.

Pode-se observar que o sistema, mesmo contando com poucos navios (25), alcançou 96% dos sensores, devido à coincidência das rotas marítimas com os dutos

submarinos. Para a varredura total dos sensores é necessário pelo menos 50 navios, permitindo a captura de todas as mensagens geradas. Isso demonstra que o sistema de monitoramento é capaz de obter informações de toda infraestrutura monitorada (oleodutos submarinos), mesmo sofrendo a influência da grande área de monitoramento e distribuição dispersa de sensores (RIBEIRO *et al.*, 2011).

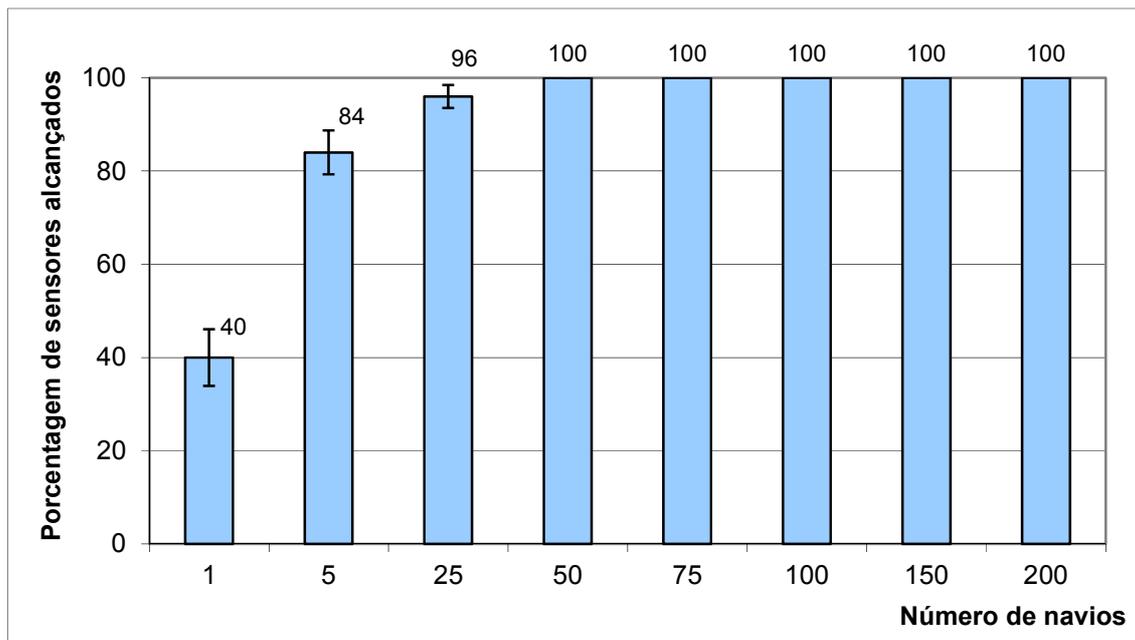


Figura 5.2: Porcentagem de sensores alcançados.

O resultado obtido é um indicativo da viabilidade da utilização dos navios de suporte logístico para a coleta de informações de monitoramento, alcançado devido à distribuição dos sensores em pontos estratégicos, que levam em conta a necessidade de monitoramento e as rotas marítimas.

5.5.2. Contatos na Rede e Tempo de Espera dos Sensores

O número de contatos realizados por hora na rede pode influenciar no comportamento da rede. A Figura 5.3 mostra o crescimento de contatos com o número de navios na rede, indicando o aumento da frequência da varredura dos sensores. Esta informação também está relacionada com os tempos médios de espera nos sensores para o encaminhamento das mensagens, apresentados na Figura 5.4. Esse tempo é

fundamental para definir que tipo de monitoramento pode-se realizar com o número de navios disponíveis no sistema.

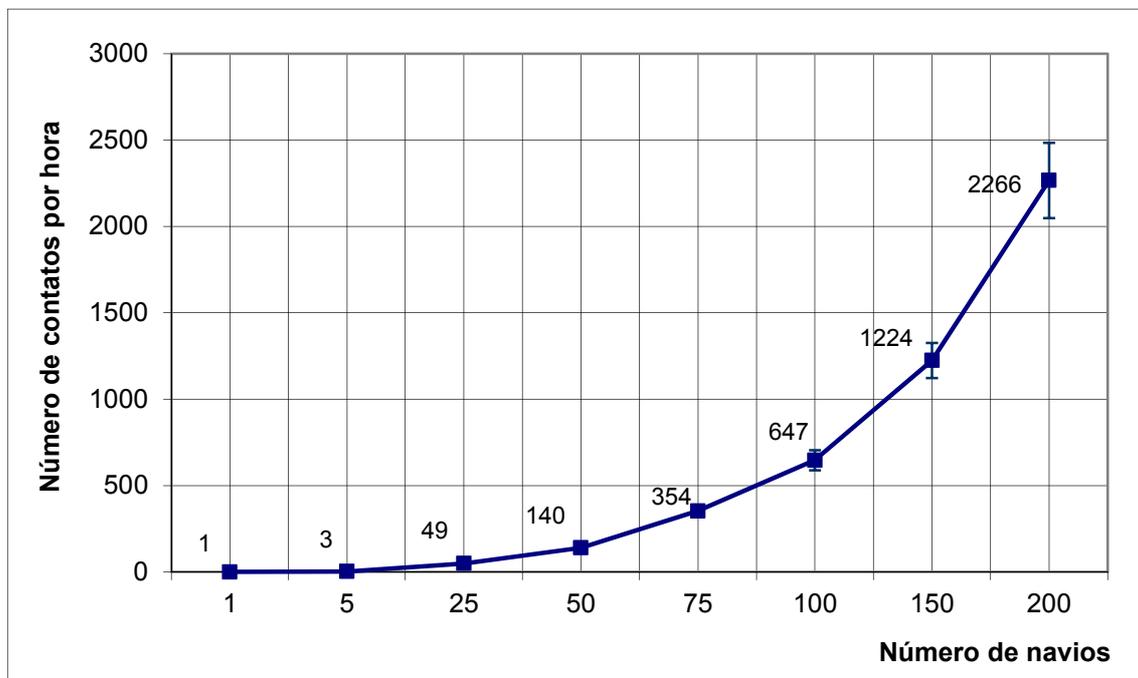


Figura 5.3: Número de contatos na rede.

O monitoramento da posição da infraestrutura submarina é um exemplo típico, pois varia pouco em um dia e pode ser implementado a partir de 25 navios (Figura 5.4). Neste cenário, os dados dos sensores são coletados em média a cada 735 min (12 h e 15 min). O nível de amostragem necessário para o monitoramento de vazão, temperatura e pressão é alcançado a partir de 150 navios obtendo um tempo médio de espera de 29 min. No cenário com 200 navios este tempo pode chegar a 16 min, o que torna o sistema de monitoramento totalmente viável (RIBEIRO *et al.*, 2011a).

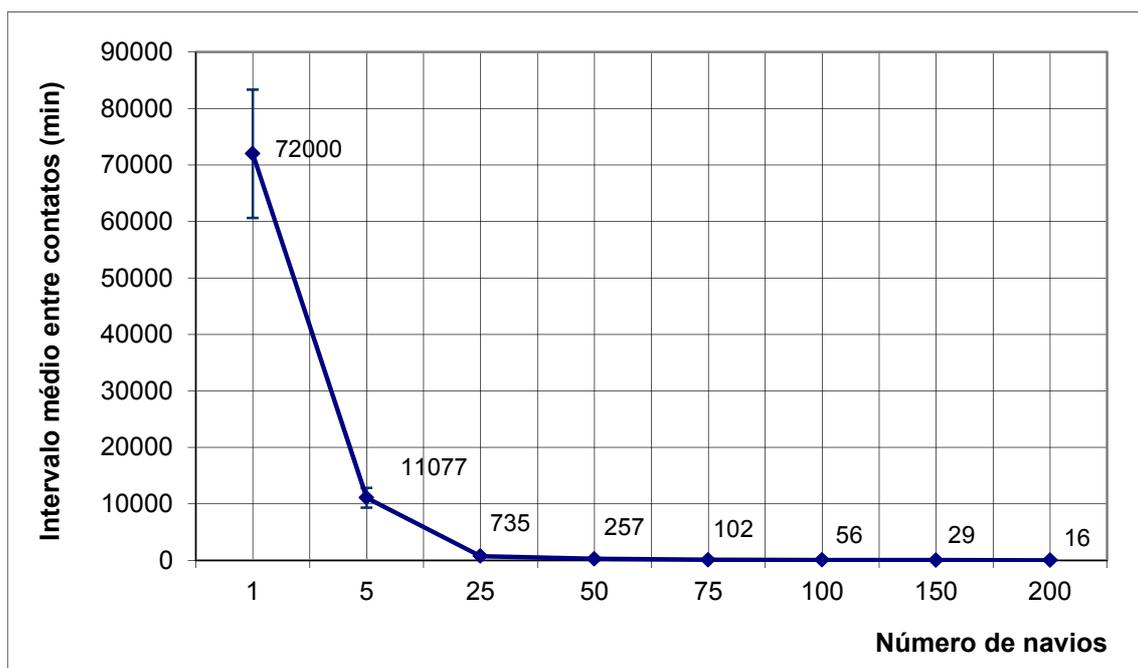


Figura 5.4: Intervalo de espera para enviar as mensagens.

Os resultados obtidos do sistema de monitoramento em relação a movimentação dos navios mostrados nas Figuras 5.3 e 5.4, não variam com a utilização dos protocolos Epidemic e Prophet. No entanto, a escolha do protocolo influencia na probabilidade de entrega e latência das mensagens que são importantes para verificação do comportamento da rede após a captura das mensagens dos sensores, conforme apresentado nas Figuras 5.5 e 5.6.

5.5.3. Probabilidade de Entrega e Latência da Rede

Os algoritmos dos protocolos Epidemic e Prophet apresentaram probabilidade de entrega de mensagens crescente e latência na rede decrescente em relação ao aumento do número de navios. Isso ocorre devido ao aumento dos contatos e mensagens transmitidas na rede, o que pode acarretar descarte nos buffers. Entretanto, um sensor pode guardar uma mensagem por aproximadamente 20 horas (1250 mensagens), levando em consideração o tamanho das mensagens de 1 kbyte, a capacidade dos buffers de 10 MB e o intervalo de geração de 60 segundos.

O gráfico da Figura 5.5 mostra um aumento da probabilidade a partir do cenário com 25 navios, atingindo mais de 90% com 50 navios. Neste caso, o sistema apresenta um comportamento semelhante para os protocolos Epidemic e Prophet. No entanto, o desempenho do protocolo Epidemic é maior nos cenários com menos navios. Tornando-se cada vez melhor, quanto menor for à quantidade de navios. Tal fato ocorre devido à política de inundação da rede, que aumenta o número de mensagens no destino (RIBEIRO *et al.*, 2011a).

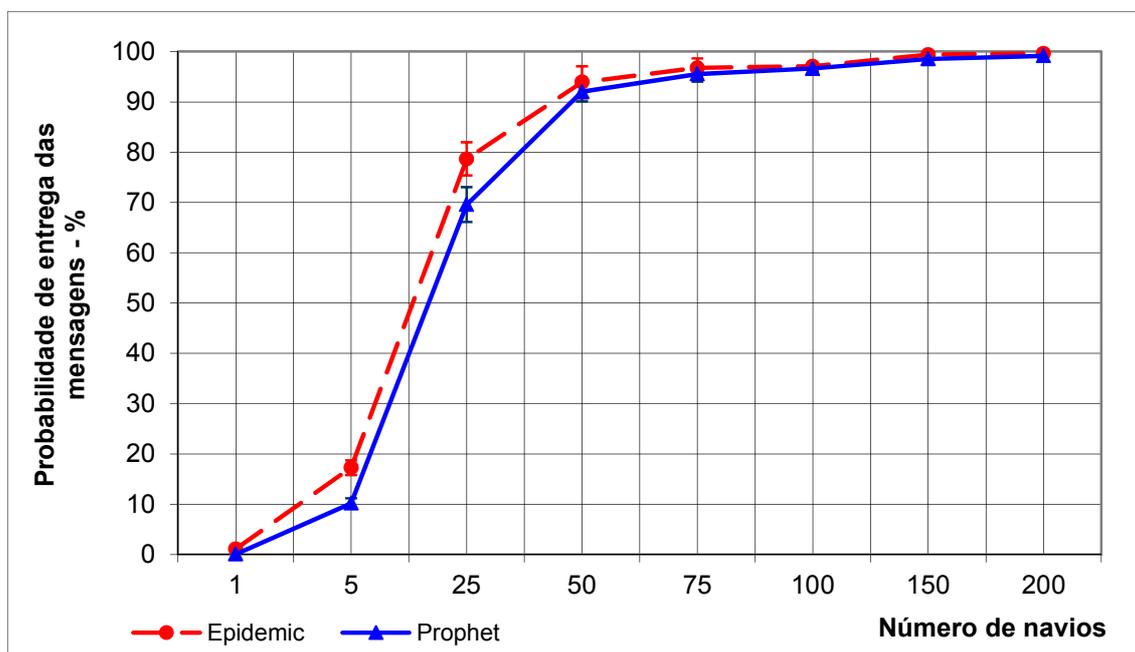


Figura 5.5: Probabilidade de entrega de mensagem.

Outro parâmetro importante do sistema é a latência da rede, que também sofre influência do número de navios disponíveis. Assim, pode ser observado no gráfico da Figura 5.6, que o crescimento do número de navios provoca a redução da latência na rede. Este comportamento é causado pelo aumento dos contatos que proporciona a diminuição do tempo de espera e o aumento do encaminhamento das mensagens na rede.

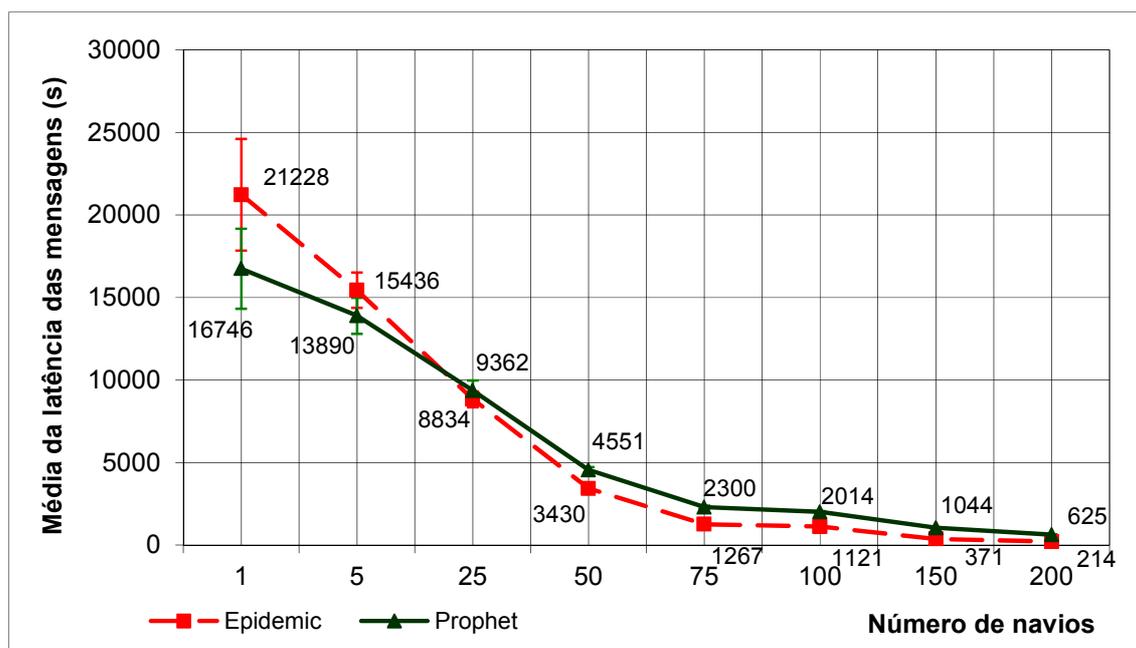


Figura 5.6: Latência da rede.

Como apresentado na Figura 5.6, a latência da rede diminui para níveis mais baixos a partir de 50 navios, mostrando que a rede se torna mais eficiente na entrega de mensagens. Podemos também observar que a latência da rede com o protocolo Prophet é menor do que com o protocolo Epidemic em cenários com poucos navios, devido ao número menor de mensagens na rede. Esta situação se inverte no cenário com 25 navios. Neste caso, mesmo utilizando a inundação da rede, a latência da rede fica menor devido ao maior número de navios, causando a entrega mais rápida das mensagens (RIBEIRO *et al.*, 2011a).

A latência da rede cai para níveis muito baixos a partir do cenário com 150 navios, alcançando no cenário com 200 navios uma latência em média de 214 s (protocolo Epidemic) e 625 s (protocolo Prophet). Neste caso, a inundação da rede ocasionada pelo protocolo de roteamento Epidemic, acarreta em uma latência menor na rede.

5.5.4. Taxa de Entrega das Mensagens

A capacidade do sistema em realizar a entrega das mensagens geradas é uma característica importante para a avaliação do comportamento da rede. Neste caso, quando são transmitidas todas as mensagens geradas nos sensores, esta relação é 1 e indica que a rede está trabalhando de forma eficiente. A relação entre mensagens enviadas e criadas é influenciada pelo protocolo de roteamento e pelo número de navios disponíveis na rede. Assim, esse comportamento da rede pode ser analisado com relação à variação do número de navios disponíveis no sistema, através das Figuras 5.7, 5.8 e 5.9.

A Figura 5.7 apresenta o resultado obtido da taxa de entrega das mensagens da rede operando com o protocolo Epidemic e a Figura 5.8 com o protocolo Prophet. Já a Figura 5.9 apresenta a comparação entre estes dois protocolos. Em todos os três casos, as barras de erro foram incluídas somente em alguns pontos a fim de facilitar a visualização das informações.

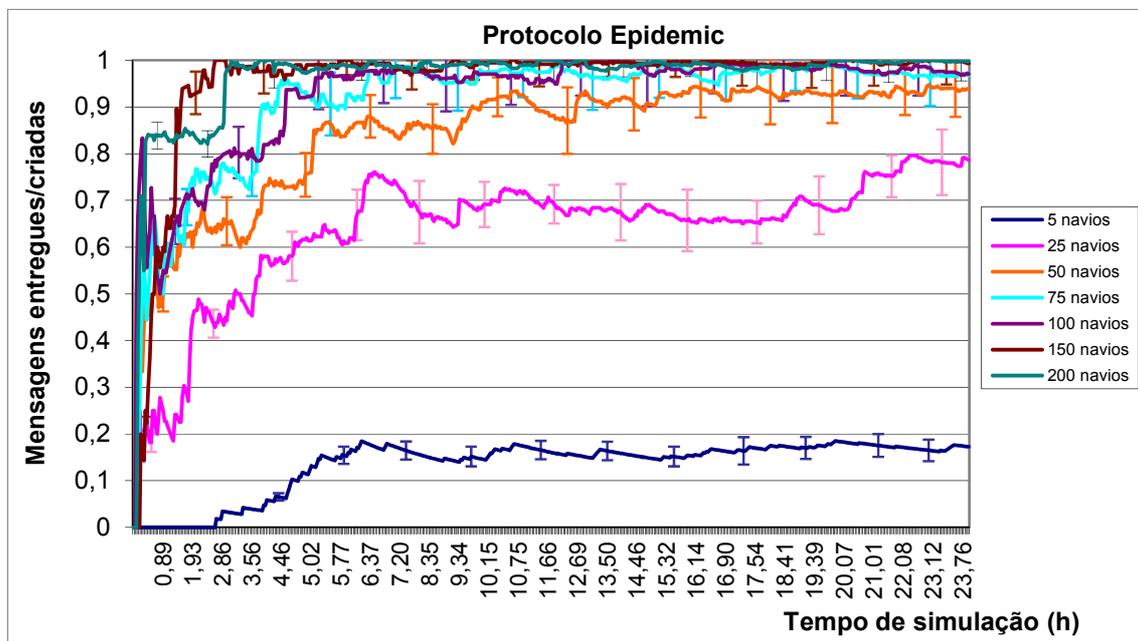


Figura 5.7: Taxa de entrega da rede – protocolo Epidemic.

Os resultados demonstram que o aumento do número de navios tem a capacidade de influenciar positivamente a entrega das mensagens. É possível identificar que o sistema obteve um comportamento aceitável a partir do cenário com 75 navios e atingindo valores médios muito próximos de 1 com 200 navios.

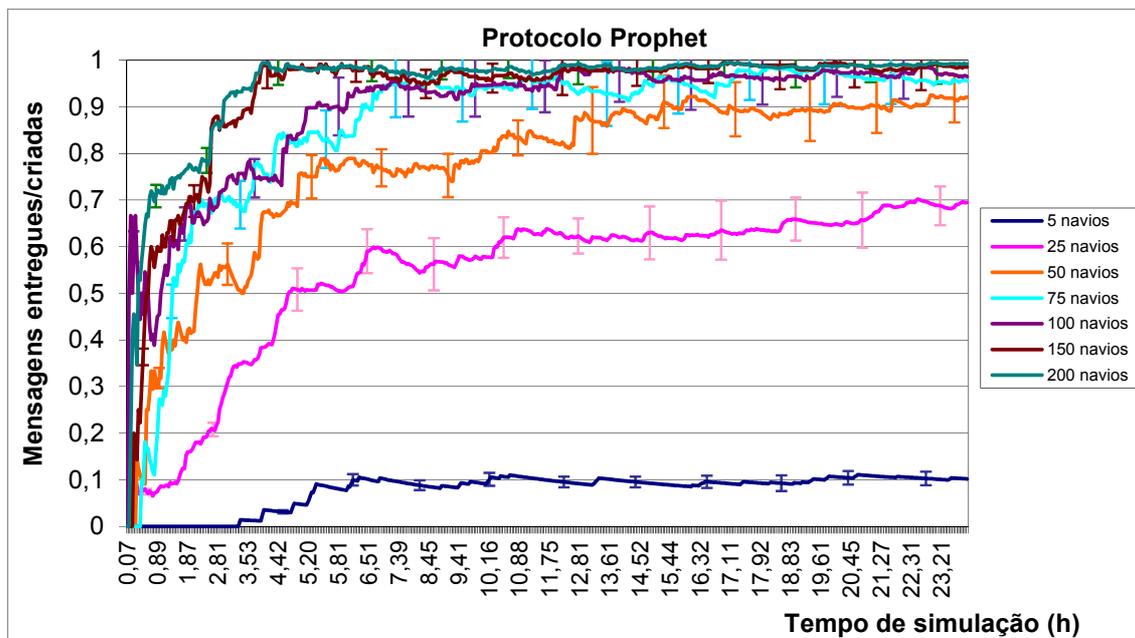


Figura 5.8: Taxa de entrega da rede – protocolo Prophet.

Os gráficos das Figuras 5.7 e 5.8 mostram que, independentemente do protocolo de roteamento adotado e do número de navios na rede, o sistema leva um tempo para estabilizar. Este comportamento era esperado, devido à forma de geração das mensagens, o posicionamento inicial dos navios e do tempo necessário para iniciar a movimentação nas rotas marítimas. Após esta estabilização, a eficiência de entrega se estabiliza, permitindo que a rede encaminhe as mensagens geradas ao destino.

A comparação entre o comportamento da rede com o tipo de protocolo de roteamento utilizado e número de navios na rede pode ser visto na Figura 5.9. Além disso, este gráfico mostra que a rede tem um encaminhamento de mensagens melhor com protocolo Epidemic. Isso acontece devido ao menor número de navios simultaneamente disponíveis para cada sensor, fazendo com que o mecanismo de encaminhamento mais simples usado pelo protocolo Epidemic alcance melhores resultados na entrega das mensagens.

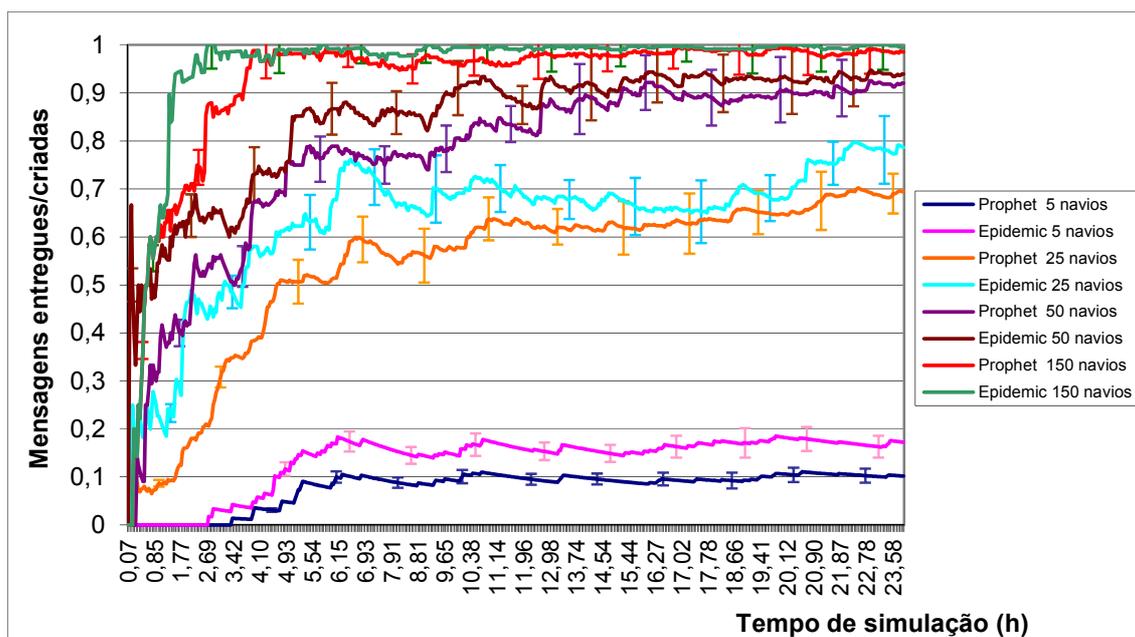


Figura 5.9: Taxa de entrega da rede para os protocolos Epidemic e Prophet.

No cenário com 200 navios os resultados obtidos com os protocolos Epidemic e Prophet são muito semelhantes (Figura 5.9), pois o processo de entrega do protocolo Prophet aumenta sua eficiência quando há um número maior de navios disponíveis na rede.

Todos os resultados apresentados demonstraram que é possível utilizar uma rede DTN subaquática para realizar monitoramento da infraestrutura submarina de exploração de petróleo da Bacia de Campos, em especial para oleodutos submarinos. Outro fato importante verificado é a capacidade da rede em utilizar os navios de suporte logístico para coletar as mensagens armazenadas nos sensores subaquáticos. Esta capacidade depende da densidade desses navios que consequentemente influencia a definição do melhor protocolo de roteamento para a rede de monitoramento.

5.6. Resultados para o Cálculo do Posicionamento

O desempenho do sistema de monitoramento depende da disponibilidade dos recursos da rede (navios). Logo, a forma de deslocamento dos navios pode afetar o cálculo da posição do sensor. Assim, cada simulação foi realizada a fim de verificar o comportamento do sistema em relação à movimentação e ao aumento da frota de navios.

Como os navios se deslocam em função das atividades de suporte e logística e ao mesmo tempo prestam um serviço de referência para o sistema de posicionamento, existe a imprevisibilidade do contato que é uma condição quase obrigatória neste sistema. Portanto, a verificação da disponibilização das três referências pela rede indicará qual a probabilidade de se obter o posicionamento dos sensores.

5.6.1. Sensores alcançados por três referências

A cada simulação, foi possível verificar a capacidade dos navios em conjunto com as unidades de produção em disponibilizar três referências para os sensores. A evolução desta informação com o aumento do número de navios pode ser verificada na Figura 5.10. Neste caso, é possível observar que o sistema permitiu que 100% dos sensores obtivessem três referências a partir de 200 navios, indicando que é possível verificar o posicionamento de todos os sensores da rede. Entretanto, para que a rede seja verdadeiramente eficaz, esta informação deve ser disponibilizada com uma frequência que permita o acompanhamento das condições subaquáticas reais. Por isso, o número de contatos e o tempo médio para obter o posicionamento são importantes.

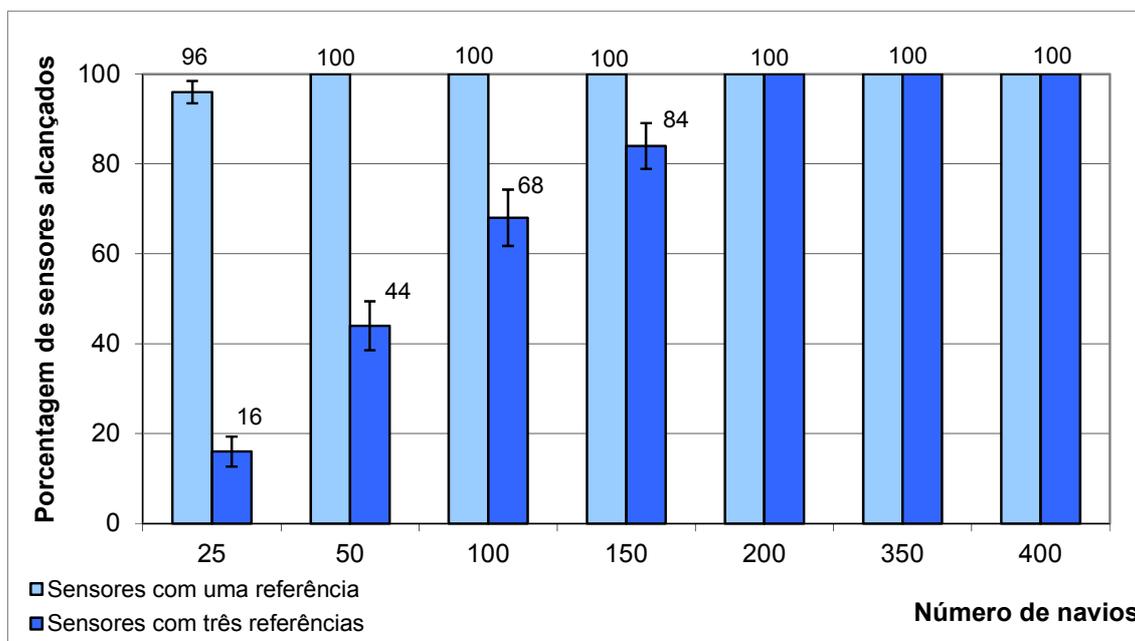


Figura 5.10: Porcentagem dos sensores alcançados.

5.6.2. Contatos na Rede e Tempo de Espera dos Sensores

O crescimento do número de navios proporcionou um crescimento do número de contatos na rede (Figura 5.11). Este comportamento esperado indica que a quantidade de navios influencia a capacidade do sistema em disponibilizar três referências para os sensores, permitindo que mais sensores sejam capazes de calcular o posicionamento. Todavia esta informação só é relevante se for associada com o tempo médio que o sensor espera para obter essas referências.

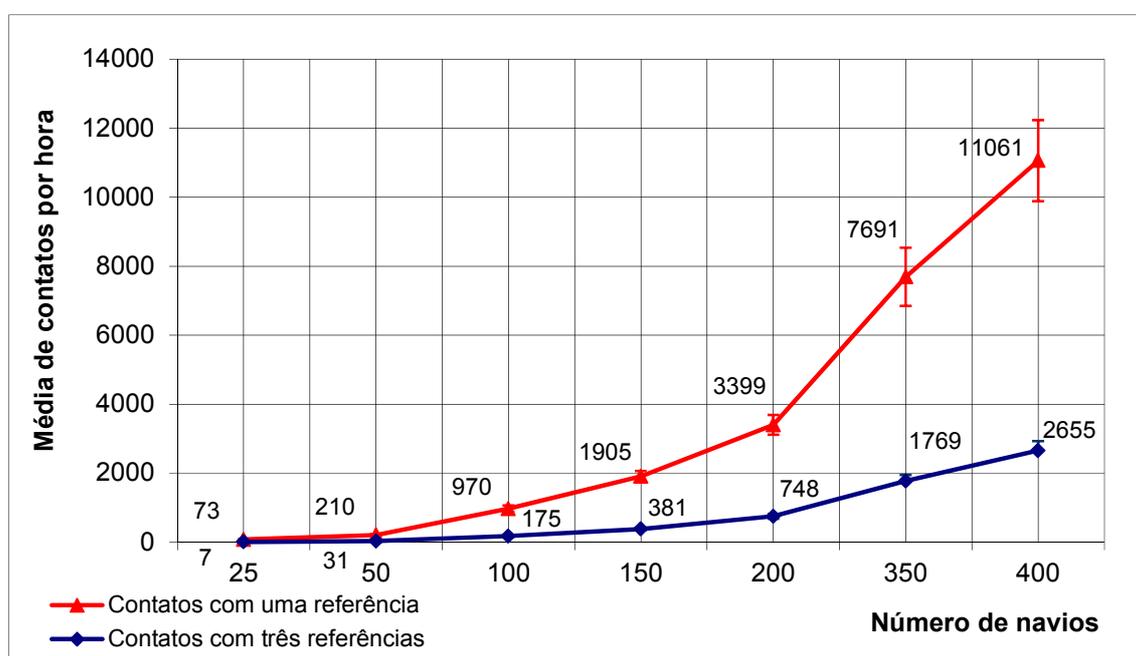


Figura 5.11: Média de contatos na rede por hora.

A frequência com que os sensores atualizam o seu posicionamento é fundamental para definir que tipo de aplicação será suportado pelo sistema. Pode-se observar na Figura 5.12 que a partir do cenário encontrado atualmente na Baía de Campos (200 navios), os sensores esperam em média 48 min para obter três referências, permitindo acompanhar o posicionamento da infraestrutura submarina, sendo possível alcançar 20 min em 2013 (350 navios) e 14 min em 2020 (400 navios).

Os valores obtidos mesmo sendo altos comparados com sistemas de monitoramento convencionais, representam um ganho significativo nos tempos de detecção da movimentação causada por deslizamentos no leito marinho, que atualmente giram em torno de dias. Portanto, o sistema proporcionará a diminuição no tempo de resposta a situações que possam causar danos a infraestrutura submarina, já que atualmente não há este tipo de monitoramento na Bacia de Campos. Neste caso, seria possível acionar as equipes de emergência e de manutenção em um curto intervalo de tempo, diminuindo os prejuízos ambientais causados por possíveis vazamentos.

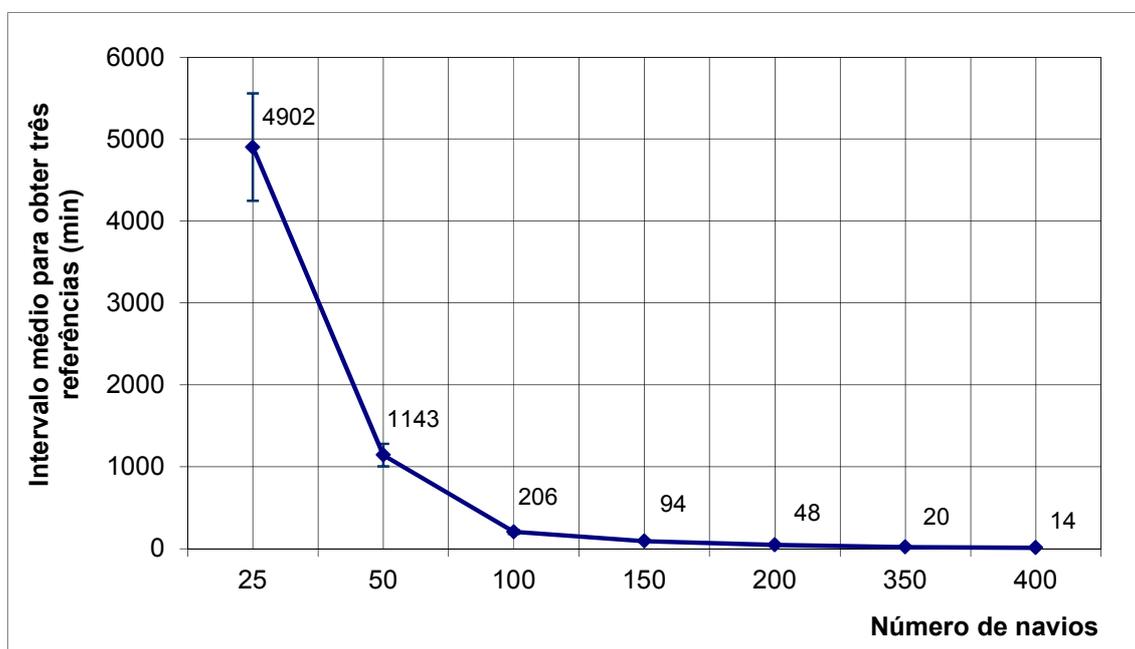


Figura 5.12: Tempos médios para obtenção do posicionamento.

Foi possível observar que o desempenho do sistema de posicionamento é afetado pela disponibilidade das unidades de referência ao alcance dos sensores. Entretanto, a utilização de unidades fixas de referência (unidades de produção) permite que em determinadas áreas os sensores sejam menos dependentes dos navios e em alguns casos necessitem de apenas um ponto de referência móvel. Verificou-se que este comportamento é exclusivo da região de exploração, sendo a região de traslado dependente dos navios devido à falta de unidades fixas de referência.

5.7. Considerações Finais

Neste capítulo, foram analisados os resultados obtidos com as simulações realizadas para verificação da viabilidade do sistema com a utilização dos navios de suporte logístico na tarefa de coletar as informações dos sensores e prover em conjunto com as plataformas os pontos de referência necessários para a obtenção do posicionamento dos sensores.

No próximo capítulo, é apresentado um plano de implantação e operação, visando disponibilizar informações complementares que corroborem a decisão de implementação do sistema de monitoramento subaquático.

Capítulo 6

Implantação e Operação

6.1. Introdução

Para verificar a viabilidade do sistema de monitoramento subaquático proposto é necessário analisar além do comportamento da rede, as características que influenciarão a implantação e a operação desse sistema. Estas características podem ser agrupadas em dois fatores primordiais, tempo e custo. O plano de implantação e operação descreve os objetivos, custos e cronograma que compõem essas atividades. No planejamento das atividades foram levadas em consideração as características da exploração de petróleo da Bacia de Campos que influenciam nas formas específicas de trabalho no ambiente *offshore*.

O objetivo principal deste plano é efetuar o levantamento dos requisitos de negócio, balizados pelo planejamento estratégico da Petrobras, com a finalidade de definir os procedimentos necessários para execução do projeto de implantação e operação do sistema de monitoramento subaquático. Assim, os resultados deste trabalho visam subsidiar a decisão sobre a implantação desta solução e sua subsequente operação, baseada em estimativas de custos e tempo referentes às instalações e manutenções dos modems acústicos e sensores na infraestrutura submarina, levando em conta os custos de contratação dos serviços especializados para o ambiente *offshore* em diferentes lâminas d'água.

6.2. Plano de Implantação

O plano de implantação do projeto de monitoração subaquática será obtido com base no escopo a ser cumprido, nos custos (aquisição e instalação) e no cronograma associado ao plano de recursos disponíveis para o projeto. Obviamente, alterações em um destes itens durante o projeto acarretam em revisões nas estimativas dos custos.

Para a formação de uma estimativa confiável e objetivando o menor desvio possível do realizado ao final do projeto, foi consultada opinião especializada para cada atividade, possibilitando assim minimizar as variações em relação aos tempos e custos adotados no projeto.

A fase de implantação do projeto tem como objetivos principais:

- desenvolver um plano de implantação que documente o custo do projeto e como e quando o sistema estará disponível para os usuários;
- validar o sistema através dos resultados obtidos em relação às expectativas do cliente. Esse objetivo é conquistado através de testes pilotos, onde um subconjunto de usuários pode testar uma versão preliminar do sistema e dar um *feedback* do produto, e testes de homologação, que visam garantir que o sistema desenvolvido satisfaz completamente os critérios de aceitação do cliente;
- operacionalizar o sistema a fim de deixá-lo operacional, tanto em ambiente de desenvolvimento quanto de produção.

O propósito é gerar informações sobre o tempo e o custo referentes às atividades de instalação dos equipamentos, de maneira que o sistema de monitoramento possa ser efetivamente colocado em operação no ambiente subaquático. Essa atividade deve se preocupar em avaliar as condições de implantação do sistema completo. Além disso, deverá comparar os resultados com alternativas existentes.

Os dois principais equipamentos do sistema de monitoramento, que deverão ser instalados respectivamente nos navios de suporte logístico e na infraestrutura

submarina, são os modems acústicos e sensores. A especificação dos modems acústicos e sensores subaquáticos encontram-se no apêndice A e B respectivamente.

6.2.1. Atividades de Implantação

O projeto de implantação do sistema de monitoramento abrange uma série de atividades que estão relacionadas com a instalação dos sensores na infraestrutura submarina e dos modems acústicos nas embarcações. Portanto, essas atividades devem ser planejadas para que haja um controle de tempo e custo que influencia diretamente no andamento do projeto.

6.2.1.1. Implantação dos Modems Acústicos

O planejamento da implantação dos modems acústicos deverá levar em conta a programação de operação das embarcações de suporte logístico para não acarretar impactos nos processos e programações de reabastecimento, vistoria e carga dessas embarcações. As instalações dos modems devem ser executadas respeitando rigorosamente o período de atracação nos portos, e em especial no porto de Imbetiba, Macaé-RJ (Figura 6.1). Esta atividade poderá ser realizada simultaneamente nas embarcações dependendo da disponibilidade e a capacidade dos portos.

Algumas características das embarcações e do porto atualmente disponível na Baía de Campos devem ser consideradas no processo de instalação dos modems acústicos:

- o tempo para instalação dos modems acústicos;
- o tempo de permanência no porto;
- a atracação simultânea de embarcações no porto de Imbetiba, Macaé-RJ;
- a existência de 200 embarcações de suporte logístico operando atualmente na Baía de Campos.



Figura 6.1: Porto da Petrobras em Macaé.

A duração da instalação do modem acústico nas embarcações pode levar em média 12 h de trabalho, podendo variar de acordo com a infraestrutura das embarcações. Neste caso, mesmo que seja necessário até 2 vezes mais tempo para a execução desta atividade, o período de atracação destas embarcações, que é em média de 1 dia, é maior do que o tempo necessário para a instalação dos modems acústicos. Assim, é possível calcular o tempo necessário para a execução desta atividade nas 200 embarcações existentes, levando em consideração que as instalações serão realizadas no porto de Imbetiba, Macaé-RJ.

6.2.1.2. Implantação dos Sensores

Os sensores serão instalados na infraestrutura submarina (equipamentos e dutos) que está distribuída em uma grande área que se estende do litoral até as áreas de exploração de petróleo da Bacia de Campos. Esta área tem como característica principal a variação da profundidade do leito marinho, podendo a lâmina d'água variar de 50 m a 2.000 m. Assim, a instalação dos sensores deverá ser o momento mais crítico com relação ao cronograma e custo de implantação, devendo esta atividade seguir um planejamento específico de forma a diminuir o custo do projeto, trabalhando com dois cenários básicos de implantação:

- instalação dos sensores durante a instalação de equipamentos ou lançamentos de novas linhas de dutos. Neste caso, a instalação dos sensores não deverá interferir (retardar) a instalação dos dutos e/ou equipamentos, para não acarretar em custos adicionais com a embarcação especial (Figura 6.2);
- instalação dos sensores nos dutos e/ou equipamentos submarinos que já se encontram instalados e em operação. Neste caso, as características do local de instalação dos sensores terá grande relevância no tempo e custo de implantação, sendo maiores de acordo com o tamanho da lâmina d'água de operação.

Algumas características podem influenciar no tempo de instalação dos sensores, como o tipo de sensor, de como ele será posicionado e "colocado"/"fixado" no duto ou equipamento. Assim, é necessário realizar uma adaptação dos sensores para cada tipo de equipamento/duto a fim de evitar perdas de tempo durante a instalação. O planejamento prévio das atividades submarinas e o desenvolvimento de sensores totalmente adaptados à infraestrutura são fundamentais para diminuir o tempo de instalação e consequentemente o custo do projeto.



Figura 6.2: Implantação de novas linhas de dutos.

Em todo caso, a estimativa dos custos de instalação é obtida através de um cronograma macro, isto é, considerando apenas as principais etapas, que englobam a mobilização da embarcação, o posicionamento na locação, a instalação dos sensores propriamente dita e desmobilização dos recursos. Portanto, se forem considerados os tipos de serviços oferecidos pelas empresas de suporte à exploração de petróleo e as características da área de Exploração da Bacia de Campos, é possível avaliar dois cenários que determinam o custo básico da implantação:

- águas rasas, com lâmina d'água de até 300 m. Nesse caso, o serviço de instalação dos sensores deverá ser realizado através de mergulhadores, sendo contratado em conjunto com a embarcação que disponibiliza este serviço especializado para instalação dos 13 sensores posicionados nessas áreas;
- águas intermediárias, profundas e até ultras profundas, com lâmina d'água acima de 300 m. Nesse caso, o serviço de instalação dos sensores só poderá ser realizado através de veículos remotamente operados (ROV - *Remotely Operated Vehicle*), sendo este serviço contratado em conjunto com a embarcação para instalação dos 12 sensores posicionados nessas áreas.

Atualmente, todo serviço seja de instalação de novas linhas de dutos ou instalações pontuais são executadas por embarcações especiais, cujas especificações encontram-se no apêndice C:

- embarcações para o lançamento de linhas de dutos;
- embarcações que atuam com mergulhadores (DSV - *Dive Support Vessel*);
- embarcações que atuam com ROV (RSV - *ROV Support Vessel*).

6.2.2. Cronograma

O cronograma de implantação do sistema de monitoramento subaquático é baseado nas estimativas dos prazos adotados para cada atividade que deverá ser realizada no ambiente *offshore* devendo ser executadas em diferentes regiões com grande variação da lâmina d'água para instalação dos sensores. O objetivo é planejar as

atividades a fim de verificar o custo e o tempo necessário para entrega do projeto, garantindo que os processos de implantação sejam realizados dentro do custo e prazo esperados. Este planejamento e controle das atividades do cronograma dependem principalmente do gerenciamento do tempo.

Na etapa de planejamento é importante identificar os fatores que criam alterações no cronograma do projeto, de forma que se estabeleça a formalização das alterações e quando podem ocorrer. Assim, a implantação do sistema de monitoramento subaquático foi dividida em duas fases principais que tratam dos serviços especializados de instalação dos modems acústicos e sensores nas áreas submarinas. Estas atividades necessitam de um alto grau de conhecimento além de recursos de alta tecnologia, concentrando a maior parte dos custos deste projeto.

As atividades realizadas no ambiente *offshore* devem conter uma margem de tempo para que seja utilizada caso o ambiente não esteja favorável. Isso ocorre porque essas atividades são afetadas diretamente pelas condições climáticas do oceano. Assim, as atividades mais afetadas por estes efeitos devem constar do caminho crítico do cronograma do projeto.

Existem vários fatores no ambiente *offshore* que podem gerar atrasos na implantação do sistema e influenciar diretamente no custo do projeto:

- condições ambientais desfavoráveis;
- disponibilidade dos recursos (Embarcações Especiais);
- utilização de mão de obra não especializada;
- atrasos de fornecedores.

6.2.2.1. Estimativas da duração das atividades

O processo de estimativa define o número de períodos de trabalho que serão necessários para terminar as atividades específicas, levando em conta o escopo do projeto, tipos e quantidades dos recursos disponíveis. As estimativas de duração de cada atividade se baseiam na análise de especialistas mais familiarizados com a natureza do trabalho a ser realizado.

A opinião de pessoas especializada nas estimativas foi necessária devido às características que envolvem os trabalhos no ambiente *offshore*. Estas pessoas têm treinamento, conhecimento especializado e habilidades que ajudaram a avaliar as informações e determinar as estimativas. A Tabela 6.1 apresenta a duração estimada para cada atividade, considerando o tempo de mobilização dos recursos (embarcações especiais) necessários para execução das atividades.

Tabela 6.1: Tempo estimado para execução das atividades.

Atividade	Tempo Médio
Instalação de Modems Acústicos nas Embarcações	12 h ± 2 h
Instalação dos Sensores na implantação de novos equipamentos/dutos submarinos	1 h ± 30 min
Instalação dos 13 Sensores em Lâmina d'água < 300 m	2 dias ± 0,5 dia cada
Instalação dos 12 Sensores em Lâmina d'água > 300 m	3 dias ± 1 dia cada

6.2.2.2. Sequência das Atividades

O cronograma foi representado através de um gráfico de Gantt (ou mapa de Gantt) que é usado para ilustrar o avanço das diferentes etapas de um projeto, sendo mais adequado a apresentações gerenciais (Figura 6.3). O desempenho de cada atividade, os recursos necessários podem ser avaliados através dos custos resultantes do consumo dos recursos necessários para a conclusão de cada uma das tarefas. Portanto, o cronograma é uma forma de balizar o desempenho do projeto, por medição relativa entre o tempo decorrido, e o grau atual de conclusão das atividades perante o previsto, o que permite tirar conclusões sobre o seu desempenho em termos de custo e prazo.

6. Implantação e Operação

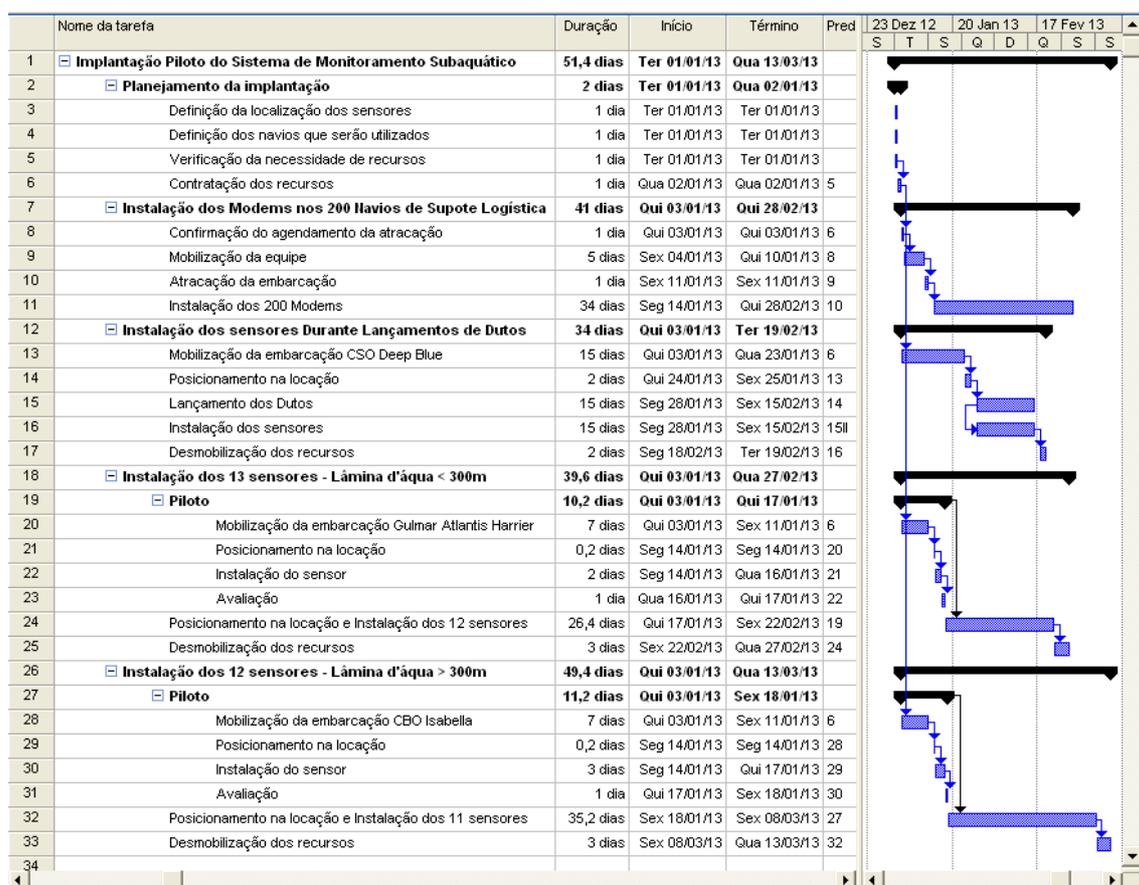


Figura 6.3: Cronograma de implantação.

A estratégia de implantação foi realizar as instalações dos modems acústicos e sensores simultaneamente. No caso dos sensores, como será necessária a utilização de embarcações específicas para as duas faixas de lâmina d'água (<300 m e >300m), estes serviços podem também ser realizados simultaneamente. Já a instalação de sensores durante a implantação de novas linhas de dutos ou equipamentos submarinos será sempre feita por demanda aproveitando as oportunidades, pois o impacto no custo desta implantação é muito baixo.

As atividades de instalação dos modems acústicos tiveram que ser planejadas levando em consideração a capacidade simultânea de operação do porto de Imbetiba, que é de 6 embarcações e a duração média de 1 dia de atracação. Assim, a estimativa mínima de duração da instalação dos modems acústicos nas 200 embarcações ficou em 34 dias corridos. Esta estimativa leva em conta que todas as embarcações estarão operando neste período e realizarão a atracação no porto de Imbetiba, Macaé-RJ.

Nas instalações dos sensores foi necessário aumentar a eficiência na contratação

das embarcações especiais, incluindo no planejamento a execução de uma instalação piloto para a avaliação dos procedimentos de implantação em cada faixa de lâmina d'água definidas neste plano de implantação. No caso da instalação a lâminas d'água abaixo de 300 m foi programada a instalação de um sensor piloto que tem duração estimada de 2,2 dias e os 12 sensores restantes de 26,4 dias. Já para a instalação em lâminas d'água acima de 300 m foi programada a instalação de um sensor piloto que tem duração estimada de 3,2 dias e os 11 restantes de 35,2 dias. O tempo total de 51,4 dias para a implantação do projeto depende da disponibilidade dos recursos e da possibilidade de execução dos serviços simultaneamente, além das condições ambientais.

6.2.3. Custos de Implantação

A estimativa do custo de implantação do projeto foi obtida com base no escopo e no cronograma das atividades (Figura 6.3) e expressa em dólares americanos a fim de manter a uniformidade das informações. Para que seja possível a realização dessas atividades, será necessária a prévia análise da estimativa de custos e dos recursos disponíveis. Assim, possíveis mudanças nas condições ambientais ou nos quesitos de segurança referentes a atividades *offshore* devem ser consideradas. Nos casos onde forem detectadas essas ocorrências, o cronograma e os custos deverão ser refeitos de forma que reflitam o novo cenário.

Para a formação de uma estimativa confiável foi utilizada uma série de documentações, assim como entrevistas com as equipes técnicas especializadas responsáveis pelas atividades. O custo total do projeto é majoritariamente impactado pelos custos dos serviços contratados para o trabalho *offshore*. Assim, o uso de opinião especializada na estimativa dos tempos e custos necessários para cada atividade fornece uma pequena granularidade e, por conseguinte, maior acurácia nas estimativas.

O orçamento do projeto será determinado através da obtenção dos custos referentes à aquisição dos equipamentos (modems e sensores), à instalação dos modems acústicos nos navios, à instalação dos sensores e ao tempo estimado para a execução de cada atividade. A localização dos equipamentos a serem monitorados é um fator que influencia tanto nos custos de aquisição como de instalação dos sensores, devido às

diferentes lâminas d'água de operação. Os custos de aquisição dos equipamentos do projeto são apresentados na Tabela 6.2, enquanto os custos dos serviços de instalação destes equipamentos são apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.2: Custos de aquisição dos equipamentos.

Equipamento	Quantidade	Custo individual (US\$)	Custo Total (US\$)
Modem Acústico	200	10.000,00	2.000.000,00
Sensores TPV <300m	13	17.000,00	221.000,00
Sensores TPV >300 e <1000m	7	26.000,00	182.000,00
Sensores TPV >1000m	5	38.000,00	190.000,00
Custo Total com Equipamentos (US\$)			2.593.000,00

O custo total com a aquisição dos equipamentos do projeto será de US\$ 2.593.000,00, sendo que 77% deste custo são referentes à aquisição dos 200 modems acústicos que deverão ser instalados nos navios de suporte logístico.

Tabela 6.3: Custos de instalação dos modems acústicos e sensores.

Atividade	Duração	Quantidade	Custo (US\$)	Custo Total (US\$)
Instalação dos Modems nos Navios	8h	200	6.000,00	1.200.000,00
Instalação dos Sensores – lâmina d'água <300m	2,2 dias	13	120.000,00	3.432.000,00
Instalação dos Sensores – lâmina d'água >300m	3,2 dias	12	90.000,00	3.456.000,00
Total com serviços de instalação (US\$)				8.088.000,00

As atividades de implantação dos modems acústicos e sensores totalizaram US\$ 8.088.000,00, representando a maior parte dos custos do projeto. Isto se deve à necessidade da utilização de embarcações especializadas na execução de serviços nas diferentes lâminas d'água de instalação. Se as instalações dos sensores fossem realizadas durante os serviços de implantação de novos equipamentos/dutos (Tabela 6.4), os custos com a implantação do projeto de monitoramento seriam muito menores, pois os custos com as instalações dos sensores seriam absorvidos pelo processo principal. Todavia, esta opção somente seria viável em novas áreas de exploração. Mesmo assim, este tipo de instalação pode ser usado pontualmente, aproveitando os processos de manutenção que normalmente executam a troca de equipamentos e dutos.

Tabela 6.4: Custos de instalação de sensores durante a implantação de equipamentos e dutos submarinos.

Atividade	Quantidade	Duração	Custo/h	Custo Total (US\$)
Instalação dos sensores em lançamentos de dutos	25	1 h	8.000,00	200.000,00
Instalação dos sensores em implantação de equipamentos	25	1 h	3.700,00	92.500,00

Considerando a implantação dos sensores nos equipamento/dutos atualmente em operação, o custo total para a implantação do sistema de monitoramento subaquático com 25 sensores submarinos distribuídos na área de exploração de petróleo da Bacia de Campos e 200 navios de suporte logístico equipados com modems acústicos seria de US\$ 10.681.000,00, conforme a Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Custo total de implantação do sistema de monitoramento subaquático.

Item	Custo (US\$)
Equipamentos (modems e sensores)	2.593.000,00
Serviços de instalação (modems e sensores)	8.088.000,00
Custo Total do Projeto	10.681.000,00

6.3. Plano de Operação

O plano de operação tem como objetivo principal descrever os possíveis custos para a manutenção do sistema. A manutenção compreende o conjunto de atividades que visam manter o equipamento ou material em condições de emprego eficiente, evitando seu desgaste antecipado. O estabelecimento de um programa de manutenção é fundamental para o controle operacional do sistema. Estes custos são impactados por dois pontos principais que afetam diretamente a operação da rede de monitoramento:

- consumo das baterias dos sensores;
- desgastes dos modems acústicos dos navios.

O programa de manutenção do sistema de monitoramento subaquático foi elaborado com a ajuda de especialistas mais familiarizados com os processos de operação e manutenção *offshore* e leva em consideração a autonomia das baterias dos sensores e o desgaste dos modems acústicos no ambiente submarino. Assim, a manutenção preventiva é o processo principal para que o sistema mantenha-se operando.

6.3.1. Consumo das Baterias dos Sensores

As baterias têm vida limitada sendo necessária a implementação de um plano de manutenção rigoroso visando à troca das baterias dos sensores que estão instalados em locais com diferentes lâminas d'água. Portanto, para definir o quanto a troca das baterias irá influenciar no custo da operação do sistema, é importante verificar o tempo de vida das baterias.

Para estimar o consumo da bateria do sensor devem ser verificadas as condições de consumo de energia. Neste caso, os resultados do sistema de monitoramento subaquático obtidos no cenário atual com 200 navios na rede podem ser utilizados para definir o modo de operação dos sensores. Assim, é possível verificar que os sensores realizam neste cenário em média um contato a cada 16 min, o que equivale a ter aproximadamente 3 contatos por hora. Se for considerada a transmissão de um pacote de 1 kbyte a uma taxa de 5kbps, serão necessários 1,6 s para completar o envio de todo

o pacote. Isto indica que o sensor estará em operação para transmissão ou recepção 4,8 segundos por hora. Supondo que será necessária somente uma tentativa de transmissão e recepção a cada contato é possível estimar o consumo da bateria do sensor, utilizando, por exemplo, as características de consumo de energia de um modem UWM10000 da LinkQuest que tem consumo durante a transmissão de 40W, recepção de 0,9W e em repouso de 9 mW.

Com a hipótese de ser utilizada uma bateria de 52 Ah, com a mesma capacidade média das que existem em carros, o cálculo da autonomia da bateria pode ser obtido para cada operação do sensor (TX, RX e Repouso) através da Equação 6.1, onde a autonomia é dada pela voltagem da bateria (V) multiplicada pela capacidade da bateria (Ah) dividida pela potência de consumo. Este resultado é multiplicado por 60 para que a autonomia seja dada em minutos.

$$\text{Autonomia} = V \times \text{Ah} \times 60 / \text{potência W} \quad (6.1)$$

O consumo de energia na transmissão é de 40 W, se for utilizada uma bateria de 52 Ah a autonomia seria de 936 min ou 56.160 s. Todavia, a transmissão só ocorre em 4,8 segundos de 1 hora de operação, levando a autonomia de uma bateria de 52 Ah nestas condições a 11.700 h ou 478,5 dias (Equação 6.2).

$$\text{Autonomia TX} = 56160 / 4,8 = 11.700 \text{ h} = 478,5 \text{ dias} \quad (6.2)$$

O consumo de energia na recepção pode ser estimado da mesma forma, considerando um consumo de 0,9 W e bateria de 52 Ah obtemos uma autonomia de 41.600 min ou 2.496.000 s. Como também só utilizamos 4,8 s/h, a autonomia da bateria de 52 Ah passa a ser de 520.000 h ou 21.666,6 dias (Equação 6.3).

$$\text{Autonomia RX} = 2.496.000 / 4,8 = 520.000 \text{ h} = 21.666,6 \text{ dias} \quad (6.3)$$

Do mesmo modo pode ser calculado o consumo no repouso, desde que seja retirando os tempos de transmissão e recepção (9,2s), o que equivale a estar em repouso 99,7 % do tempo ou 3590,8 s por hora (Equação 6.4).

$$\text{Tempo de Repouso por hora} = 1 \text{ h} - 9,2 \text{ s} = 3600 \text{ s} - 9,2 = 3590,8 \text{ s/h} \quad (6.4)$$

O consumo de energia no repouso é de 0,009 W, considerando uma bateria de 52 Ah obtém-se uma autonomia de 4.160.000 min ou 249.600.000 s. Se em 1 hora utilizamos 3590,8 s, a autonomia de uma bateria de 52 Ah nestas condições chega a 69.510,97 h ou 2896,3 dias (Equação 6.5).

$$\text{Autonomia Repouso} = 249.600.000 / 3590,8 = 69.510,97 \text{ h} = 2896,3 \text{ dias} \quad (6.5)$$

Todos estes cálculos de autonomia foram feitos para cada consumo isoladamente utilizando uma bateria de 52 Ah. Entretanto, se for necessário que a bateria do sensor tenha autonomia de 1 ano, deve ser verificado a necessidade de Ah de cada operação (TX, RX e Repouso) do sensor durante os 365 dias do ano:

- transmissão – 36,66 Ah;
- recepção – 0,87 Ah;
- repouso – 6,55 Ah.

Para que o sensor tenha autonomia de 1 ano executando uma transmissão de TX, RX a cada contato de 16 min seria necessário ter uma bateria de capacidade de 44,08 Ah. Assim, usando a mesma analogia, uma bateria de 52 Ah teria uma autonomia de 430 dias ou aproximadamente 1 ano e 2 meses. Todavia, pode haver casos onde serão necessárias mais de uma transmissão, o que influenciaria na autonomia do sensor, levando a necessidade de utilizar baterias com maior capacidade, conforme podemos observar na Tabela 6.6.

Tabela 6.6: Capacidade das baterias para autonomia de 1 ano dos sensores.

Número de TX e RX por contato a cada 16 min	Bateria para Autonomia de 1 Ano			
	TX	RX	Repouso	Total
1	36,66 Ah	0,87 Ah	6,55 Ah	44,08 Ah
2	77,87 Ah	1,75 Ah	6,53 Ah	86,15 Ah
3	116,8 Ah	2,63 Ah	6,51 Ah	125,94 Ah

A troca das baterias dos sensores subaquáticos não é uma atividade simples devido às lâminas d'água de operação. Entretanto, esta atividade submarina pode ser feita de maneira relativamente rápida e eficiente desde que as baterias sejam projetadas para serem operadas por ROVs, o que levaria a duração do serviço para algo em torno de 1 h, contando a desacoplagem da bateria antiga e acoplagem da nova. Assim, a realização desta atividade depende de contratação dos serviços de embarcações especiais RSV (*ROV Support Vessel*), sendo seu custo muito relevante para o custo total de operação do sistema.

O processo de troca das baterias deve estar relacionado no programa de manutenção, visando estabelecer o cronograma para a realização dos procedimentos de troca ou recarga das baterias. Portanto, as baterias devem ser dimensionadas para que o procedimento de troca seja executado, por exemplo, uma vez a cada ano, a fim de diminuir os custos de operação.

6.3.2. Desgastes dos modems acústicos dos navios

Os modems acústicos instalados nas embarcações devem ter um programa de manutenção preventiva que auxilie no acompanhamento dos desgastes oriundos da operação no ambiente subaquático. Além disso, a própria operação dos navios pode sujeitar estes equipamentos a diversas avarias decorrentes do processo de atracação tanto nos portos quanto nas plataformas.

Manter a operação desses modems é fundamental para a rede de comunicação, sendo de extrema importância que todos os navios estejam em condições de executar a captura das informações dos sensores. Neste sentido, foi definido que as preventivas serão executadas rigorosamente ao menos duas vezes por ano, aproveitando as paradas de vistorias exercidas pelos órgãos de controle das atividades de navegação.

6.3.3. Custos de Operação

Os custos de operação aqui abordados englobam as duas principais atividades de manutenção do sistema, que são a troca das baterias dos sensores subaquáticos e a

manutenção preventiva dos modems nos navios. Assim, o cronograma de manutenção (Figura 6.4) foi elaborado para contemplar todas as tarefas destas duas atividades.

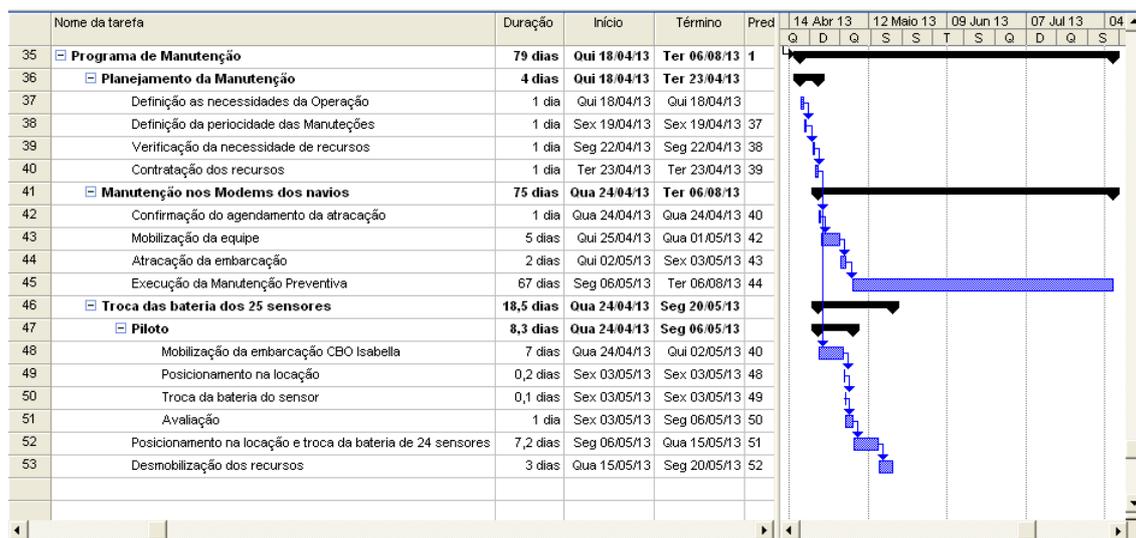


Figura 6.4: Cronograma de manutenção.

Os custos relativos das atividades de manutenção dos modems acústicos foram baseados nos custos já estimados para as atividades de implantação destes mesmos modems. Já as atividades de troca de baterias levaram em conta os custos da contratação de embarcações especiais RSV. Assim, o custo total anual para a operação do sistema de monitoramento subaquático com 25 sensores submarinos distribuídos na área de exploração de petróleo da Bacia de Campos e 200 navios de suporte logístico equipados com modems acústicos é de US\$ 875.000,00, conforme a Tabela 6.7.

Tabela 6.7: Custos anuais de operação do sistema de monitoramento subaquático.

Atividade	Duração	Quant.	Periodicidade	Custo (US\$)	Custo Total (US\$)
Manutenção dos Modems nos Navios	2,5h	200 navios	2 vezes por ano	500,00 por execução	200.000,00
Troca das Baterias	0,3 dias	25 sensores	1 vez por ano	90.000,00 por dia	675.000,00
Custo Total Anual com o Programa de Manutenção (US\$)					875.000,00

6.4. Considerações Finais

Neste capítulo, foi apresentado o Plano de Implantação e Operação do Sistema proposto que apresentou os custos estimados dos sensores e modems acústicos subaquáticos além dos custos referentes à implantação destes equipamentos na Bacia de Campos. O cronograma foi elaborado com base nas atividades já amplamente empregadas neste ambiente, levando em consideração os recursos mais adequados para trabalhar em cada lâmina d'água.

No capítulo seguinte, é apresentada a conclusão do trabalho e suas considerações com relação à viabilidade do sistema de monitoramento proposto.

Capítulo 7

Conclusões

Este trabalho propôs um sistema de monitoramento subaquático para a infraestrutura composta por equipamentos e dutos submarinos, em uma rede tolerante a atrasos e interrupções, específico para o ambiente *offshore* da Bacia de Campos (Ribeiro *et al.*, 2011). O objetivo foi verificar o comportamento da rede com os protocolos Epidemic e Prophet e a viabilidade do uso dos navios de suporte logístico na tarefa de coletar as mensagens dos sensores no sistema de monitoramento subaquático (RIBEIRO *et al.*, 2011a) e a utilização destes navios, em conjunto com as plataformas, na tarefa de disponibilizar as referências necessárias para a obtenção do posicionamento dos sensores subaquáticos (RIBEIRO *et al.*, 2012a).

O aumento do número de navios na rede torna o sistema mais eficiente, permitindo o aumento da frequência de captura das informações dos sensores, influenciando na diminuição do tempo de espera para o encaminhamento das mensagens armazenadas. Essa mesma característica também acarreta na diminuição da latência na rede e no aumento da probabilidade e da taxa de entrega das mensagens.

Os protocolos Epidemic e o Prophet apresentaram resultados diferentes, com variações de acordo com o número de navios disponíveis. Isso sugere que a utilização de um protocolo que explore as características distintas de movimentação nas regiões de translado e exploração (RIBEIRO *et al.*, 2010), fornece resultados melhores a fim de diminuir os tempos de coleta das mensagens dos sensores.

Apesar da imprevisibilidade de comunicação do sistema de monitoramento baseado em uma rede DTN, verificou-se que a localização dos sensores é uma parte importante do sistema, que influencia diretamente a capacidade dos navios em alcançar os sensores. Assim, um pequeno número de navios pode implementar a varredura de todos os sensores subaquáticos. Outra característica importante é a possibilidade de realizar o monitoramento de aplicações que podem tolerar um período maior de amostragem, mesmo considerando um número baixo de navios, a área de 115.000 km² e a dispersão dos equipamentos submarinos.

Mesmo que estes navios não estejam operando especificamente para o sistema de monitoramento, verificou-se que, em conjunto com as unidades de produção (plataformas), podem disponibilizar as referências necessárias para que os sensores sejam capazes de calcular a sua posição.

O patamar de monitoramento pleno foi alcançado com um número de navios que é totalmente consistente com o cenário atualmente encontrado na região de exploração de petróleo da Bacia de Campos, o que permite a reprodução destes resultados na prática. Portanto, com esse tipo de monitoramento, é possível obter informações de vazão, pressão e temperatura dos oleodutos e gasodutos submarinos com uma frequência adequada às exigências de segurança operacional.

O comportamento geral do sistema foi satisfatório, apresentando resultados consistentes que demonstram a viabilidade do uso da frota de suporte logístico, no monitoramento subaquático da área de exploração de petróleo no Brasil. Assim sendo, este sistema permite o monitoramento de possíveis deslocamentos causados pelo leito marinho instável, visando à detecção de situações que possam ocasionar vazamentos e consequentemente danos ao meio ambiente.

O estudo de viabilidade inicial apresentado mostrou-se um valioso instrumento para o aprofundamento da análise técnica e econômica do projeto, estimulando o aprofundamento dos seguintes pontos que exercem grande influência nos estudos adicionais:

- crescimento do número de áreas de exploração *offshore*, devido ao investimento no pré-sal;
- novas formas de operação das área de exploração do pré-sal, devido a maior

distância da costa;

- necessidade crescente de monitoramento para garantir a segurança dos processos de exploração e operação das novas áreas;
- busca por uma maior automação nos processos de produção para diminuir a necessidade de operação manual.

A partir dessa avaliação da solução, com base nas estimativas preliminares do projeto e devido à qualidade dos resultados alcançados, o estudo apresentado pôde ser tratado como um estudo prévio de viabilidade, em razão do seu nível de detalhamento e da riqueza de informações proporcionada.

Como trabalhos futuros, existem diferentes possibilidades de continuidade do trabalho apresentado nesta tese. Pode-se expandir o estudo a fim de incluir novos parâmetros na análise do comportamento da rede:

- o tempo de espera de contato dos sensores pode ser obtido especificamente para cada região (translado e exploração), apresentando de forma pontual a frequência dos contatos de cada sensor subaquático;
- o gasto de energia dos sensores nas regiões de translado e exploração pode ser utilizado na definição da melhor forma de transmissão das mensagens no domínio subaquático, sendo avaliado os impactos na vida útil das baterias, causados principalmente pelo número de contatos;
- uma tática diferenciada de entrega de dados dos sensores pode ser implementada para se adequar as áreas com maior densidade de navios, a fim de prover um menor consumo de energia;
- apesar da baixa taxa de erros dos modems acústicos comerciais, os resultados podem variar com a perda do meio físico e com a lâmina d'água de operação, sendo necessário a inclusão desta variável na verificação do processo de comunicação no domínio subaquático.

Outro ponto que pode ser abordando é a ampliação do estudo de viabilidade com a inclusão das características de movimentação e de operação das novas áreas de exploração de petróleo do pré-sal. Estas características podem exercer grande influência no sistema de monitoramento devido a novas rotas e distribuição da infraestrutura. A maior distância da costa também implicará em uma maior automação dos processos de produção, devido ao maior custo dos postos de trabalhos nas unidades de produção.

A utilização de diferentes métodos de comunicação subaquática pode prover novas aplicações para o sistema de monitoramento. A comunicação ótica, por exemplo, mesmo com o alcance restrito pode ser utilizada para implementar sorvedouros de dados com grande capacidade de transmissão. Assim, um sistema híbrido de transmissão acústico-ótico pode ser implementado para a obtenção dos dados gerados pelas operações sísmicas de avaliação das estruturas geológicas. Neste caso, os sensores são posicionados no leito do oceano a fim de coletar as informações geradas pelas explosões subterrâneas realizadas nas proximidades das possíveis reservas de petróleo. A grande massa de dados pode ser coletada por veículos de operação remota (ROV - *Remotely Operated Vehicle*) e veículos subaquáticos autônomos (AUV- *Autonomous Underwater Vehicle*) através da comunicação ótica enquanto a comunicação acústica provê o posicionamento e controle da navegação subaquática.

A pesquisa iniciada nessa tese também pode evoluir para a etapa de testes experimentais, visando à avaliação do desempenho do comportamento das comunicações acústicas subaquáticas entre sensor e navio em ambiente operacional *offshore*. O teste piloto poderá ser constituído por sensores dispostos no leito marinho em águas rasas nos locais de fundeio próximo do porto de Imbetiba, Macaé-RJ.

Referências Bibliográficas

- AKYILDIZ, I. F., POMPILI, D., MELODIA, T., 2007, “State of the art in protocol research for underwater acoustic sensor networks”. In: *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun*, v. 11, n. 4, pp. 11-22, Montreal, Canadá.
- AQUACOMM, *Underwater Wireless Modem of DSPComm*. Disponível em: http://www.dspscomm.com/products_aquacomm.html. Acesso em: 08 out. 2012.
- AQUAMODEM, *Underwater Acoustic Modem of Aquatec Group*. Disponível em: <http://www.aquatecgroup.com/index.php/products/aquamodem>. Acesso em: 08 out. 2012.
- ATM, *Underwater Acoustic Modem of Teledyne Benthos*. Disponível em: <http://www.benthos.com/acoustic-teselonar-modem-product-comparison.asp>. Acesso em: 08 out. 2012.
- BENTZ, C, FONSECA, L., MIRANDA, F. P., *et al.*, 1994, “The GIS and image processing state of the art in PETROBRAS. In: *Proceedings of International Symposium on Resource and Environmental Monitoring Conference*, Rio de Janeiro, Brasil.
- BOUKERCHE, A., OLIVEIRA, H. A. B. F., NAKAMURA, E. F., *et al.*, 2008,. “Vehicular Ad Hoc Networks: A New Challenge for Localization-Based Systems”, *Elsevier Computer Communications*, v. 31, n. 12 (Jul.), pp. 2838-2849.
- BREKHOVSKIKH, L. M., LYSANOV Y. P., 2003, *Fundamentals of Ocean Acoustics*. 3^a ed. New York, Springer-Verlag.

- BROWN, H. C., PURCELL, H. L., MEADOWS, G. A., 2010, “The Upper-Great Lakes Observing System”. In: *Proceedings MTS/IEEE Oceans Conference*, pp. 1-6, Seattle, Washington, EUA.
- CARMINATTI, M., WOLFF, B., GAMBOA, L., 2008, “New exploratory frontiers in Brazil”. In: *19th World Petroleum Congress*, pp. 1-11, Madri, Espanha.
- CERF, V., BURLEIGH, S., HOOKE, A., *et al.*, 2007, “Delay-Tolerant Networking Architecture”. RFC 4838, *DTN Research Group*.
- FALL, K., 2004, “Messaging in difficult environments”. In: *Intel Research Berkeley, IRB-TR-04-019*.
- FRAGA, C. T. C., BORGES, F. A., BELLOT, C., *et al.*, 2003, “Campos Basin - 25 Years of Production and its Contribution to the Oil Industry”. In: *Offshore Technology Conference (OTC-2003)*, pp. 1-20, Houston, Texas, EUA.
- GABRIELLI, J. S., BARBASSA, A., 2010. *Plano de Negócios 2010 – 2014*. Disponível em: <http://www.investidorpetrobras.com.br/pt/apresentacoes/plano-de-negocios-2010-2014.htm>. Acesso em: 08 out. 2012.
- GIBSON, J. D., 1999, *The Mobile Communication Handbook*. 2ª ed. CRC Press, Springer-Verlag e IEEE Press.
- GUO, Y., KONG, F., ZHU, D., *et al.*, 2010, “Sensor Placement for Lifetime Maximization in Monitoring Oil Pipeline”. In: *Proceedings of 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems*, pp. 61-68, Estocolmo, Suécia.
- GUSTAFSSON, F., GUNNARSSON, F., 2005, “Mobile positioning using wireless networks: possibilities and fundamental limitations based on available wireless network measurements”, *IEEE Signal Processing Magazine*, v. 22, n. 4 (Jul.), pp. 41-53.
- HEIDEMANN, J., YE, W., WILLS, J., *et al.*, 2006 “Research challenges and applications for underwater sensor networking”. In: *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 228-235, Las Vegas, EUA.

- ISLAM, A., WALDVOGEL, M., 2008, “Reality-Check for DTN Routing Algorithms”. In: *28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, pp. 204-209, Pequim, China.
- JAIN, S., FALL, K., PATRA, R., 2004, “Routing in a Delay Tolerant Network”. In: *Proceedings of ACM SIGCOMM'04*, pp. 145-158, Portland, Oregon, EUA.
- KAPLAN, E., 1996, *Understanding GPS Principles and Applications*. 2^a ed. Artech House.
- KEBKAL, K. G., KEBKAL, O. G., BANNASCH, R., *et al.*, “Experimental Study of a Hydro-Acoustic Hybrid System for Simultaneous Underwater Communication and Positioning”. In: *22nd International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference – ISOPE'2012*, v. 2, pp. 521-526, Rodes, Grécia.
- KERANEN, A., OTT, J., KARKKAINEN, T., 2009, “The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation”. In: *2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques - SIMUTools'09*, pp.1-10, Roma, Itália.
- LEE, U., WANG, P., NOH, Y., *et al.*, 2010, “Pressure Routing for Underwater Sensor Networks”. In: *Proceedings of the 29th conference on Information communications INFOCOM'10*, pp. 1676-1684, San Diego, CA, EUA.
- LINDGREN, A., DORIA, A., SCHELÉN, O., 2004, “Probabilistic Routing in Intermittently Connected Networks”. In: *Proceedings of International Workshop on Service Assurance with Partial and Intermittent Resources (SAPIR)*, pp. 239-254, Fortaleza, Brasil.
- LIU, L., ZHOU, S., CUI, J., 2008, “Prospects and Problems of Wireless Communication for Underwater Sensor Networks”, *Journal Wireless Communications & Mobile Computing - Underwater Sensor Networks: Architectures and Protocols*, v. 8, n. 8 (Out.), pp. 977-994.
- MAERSK, *Maersk Subsea Support Vessels*. Disponível em: <http://www.maersksupplyservice.com/Activities/Fleet/Pages/SubseaSupportVessels.aspx>. Acesso em: 08 out. 2012.

- MICRO, Underwater Acoustic Modem of Woods Hole Oceanographic Institute. Disponível em: <http://acomms.whoi.edu/umodem/>. Acesso em: 08 out. 2012.
- MICRON, Underwater Acoustic Modem of Trittech. Disponível em: <http://www.tritech.co.uk/product/micron-data-modem>. Acesso em: 08 out. 2012.
- MUNDUR, P., SELIGMAN, M., 2008, “Delay tolerant network routing: Beyond epidemic routing”. In: *3rd International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC)*, pp. 550-553, Santorini, Grécia.
- NICULESCU, D., NATH, B., 2003, “Ad Hoc Positioning System (APS) Using AOA”. In: *Proceedings of Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications - INFOCOM 2003*, v. 3, pp. 1734-1743, San Francisco, CA, EUA.
- OLIVEIRA, C. T., DUARTE, O. C. M. B., 2007, “Uma Análise da Probabilidade de Entrega de Mensagens em Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões”. In: *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*, pp. 293-305, Belém, Pará, Brasil.
- PATWARI, N., JOSHUA, N., KYPEROUNTAS, S., *et al.*, 2005. “Locating the nodes - cooperative localization in wireless sensor networks”, *IEEE Signal Processing Magazine*, v. 22, n. 4 (Jul.), pp. 54-69.
- PENTEADO, D., COSTA, L. H. M. K., PEDROZA, A. C. P., 2010, “Deep-ocean Data Acquisition Using Underwater Sensor Networks”. In: *20th International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference - ISOPE-2010*, v. 1, pp. 383-389, Pequim, China.
- POMPILI, D., MELODIA, T., AKYILDIZ, I. F., 2006, “A Resilient Routing Algorithm for Long-term Applications in Underwater Sensor Networks”. In: *Proceedings of the 5th Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)*, pp. 1-8, Lipari, Sicília, Itália.
- PROAKIS, J. G., SOZER, E. M., RICE, J. A., *et al.*, 2001, “Shallow water acoustic networks”, *IEEE Communications Magazine*, v. 39, n. 11 (Nov.), pp. 114-119.

- RIBEIRO, F. J. L., PEDROZA, A. C. P., COSTA, L. H. M. K., 2010, “Protocolo de Roteamento para Sistemas Subaquáticos de Comunicação”. In: *9th International Information and Telecommunication Technologies Symposium Symposium - I2TS'2010*, v. 1, pp. 1-7, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- RIBEIRO, F. J. L., PEDROZA, A. C. P., COSTA, L. H. M. K., 2011, “Deepwater Monitoring System Using Logistic-Support Vessels in Underwater Sensor Networks”. In: *21st International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference – ISOPE'2011*, v. 2, pp. 327-333, Maui, Havaí, EUA.
- RIBEIRO, F. J. L., PEDROZA, A. C. P., COSTA, L. H. M. K., 2011a, “Sistema de Monitoramento Subaquático Usando Navios de Suporte Logístico em uma Rede de Sensores Acústicos Tolerante a Atrasos e Interrupções”. In: *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos- SBRC'2011*, pp. 133-146, Campo Grande, MS, Brasil.
- RIBEIRO, F. J. L., PEDROZA, A. C. P., COSTA, L. H. M. K., 2011b, “Deepwater Monitoring System in Underwater Delay/Disruption Tolerant Network”. In: *10th International Information and Telecommunication Technologies Conference - I2TS'2011*, v. 1, pp. 191-198, Florianópolis, SC, Brasil.
- RIBEIRO, F. J. L., PEDROZA, A. C. P., COSTA, L. H. M. K., 2012, “Deepwater Monitoring System in Underwater Delay/Disruption Tolerant Network”, *IEEE Latin America Transactions*, v. 10, n. 1 (Jan.), pp. 1324-1331.
- RIBEIRO, F. J. L., PEDROZA, A. C. P., COSTA, L. H. M. K., 2012a, “Deepwater Applications for Brazilian Pre-Salt Exploration Using Underwater Sensor Networks”. In: *22nd International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference – ISOPE'2012*, v. 2, pp. 508-514, Rodes, Grécia.
- ROWLEY, U., 2008, “COBIA: The Next Generation Buoy a Modular Approach”. In: *Proceedings MTS/IEEE Oceans Conference*, pp. 1-6, Quebec, Canadá.
- S2CR, *Underwater Acoustic Modem of EvoLogics*. Disponível em: <http://www.evologics.de/en/products/acoustics/index.html>. Acesso em: 08 out. 2012.

- SAVVIDES, A., HAN, C. C., SRIVASTAVA, M. B., 2001, “Dynamic fine grained localization in ad-hoc sensor networks”. In: *Proceedings of 5th International Conference on Mobile Computing and Networking – MobiCom 2001*, pp. 166-179, Roma, Itália.
- SCHNEIDER, A., 2006, “Near shore wireless communication system for sensor buoy”. In: *Proceedings MTS/IEEE Oceans Conference*, pp. 1-5, Boston, Massachusetts, EUA.
- SOLANO, R. F., GENAIO, M. C., AYRES, A., *et al.*, 2007, “Design and Installation Challenges of Jubarte Gas Pipeline in the Shore Approach Area”. In: *17th International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference – ISOPE’2007*, pp. 995-1001, Lisboa, Portugal.
- SONG, H. L., 1994, “Automatic vehicle location in cellular communications systems”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 43, n. 4 (Nov.), pp. 902–908.
- SOZER, E., STOJANOVIC, M., PROAKIS, J., 2000, “Underwater acoustic networks”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 25, n. 1 (Jan.), pp. 72–83.
- STOJANOVIC, M., 2003, “Acoustic (underwater) Communications”. In: *Encyclopedia of Telecommunications*, v. 1, John Wiley & Sons pp. 36-47.
- STOJANOVIC, M., 2006, “On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic channel”. In: *1st ACM International Workshop on Underwater Networks (WUWNet)*, pp. 41-47, Los Angeles, CA, EUA.
- SU, R., VENKSTESAN, R., LI, C., 2010, “A Review of Channel Modeling Techniques for Underwater Acoustic Communications”. In: *Proceedings of 19th IEEE Newfoundland Electrical and Computer Engineering Conference*, pp. 1-5.
- TAFT, B., RILEY, R., CROUT, R., *et al.*, 2009, “Measuring Current Profiles on a Moored Buoy Through an Acoustic Window”. In: *Proceedings MTS/IEEE Oceans Conference*, pp. 1-9, Biloxi, Mississippi, EUA.
- TAN, H. P., DIAMANT, R., SEACH, W. K. G., *et al.*, 2011, "A Survey of Techniques and Challenges in Underwater Localization", *Elsevier Journal of Ocean Engineering*, v. 38, n. 14-15 (Out.), pp. 1663-1676.
- URICK, R., 1983, *Principles of Underwater Sound*. 3^a ed. McGraw-Hill.

- UWM, *Underwater Acoustic Modem of LinkQuest*. Disponível em: <http://www.linkquest.com/html/models1.htm>. Acesso em: 08 out. 2012.
- VARSHAVSKY, A., CHEN, M. Y., LARA, E., *et al.*, 2006, “Are GSM phones the solution for localization?”. In: *Proceedings of 7th IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications - WMCSA '06*, pp. 20-28, Washington, EUA.
- VASILESCU, I., KOTAY, K., RUS, D., *et al.*, 2005, “Data collection, storage, and retrieval with an Underwater Sensor Network”. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems - SenSys '05*, pp. 154-165, San Diego, CA, EUA.
- WU, S., JANG, J., CHEN, H., 2012, “Design of a New Seafloor Acoustic Transponder System”. In: *22nd International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference – ISOPE'2012*, v. 2, pp. 462-466, Rodes, Grécia.
- XIE, G., GIBSON, J., DIAS-GONZALES, L., 2006, “Incorporating Realistic Acoustic Propagation Models in Simulation of Underwater Acoustic Networks: A Statistical Approach”. In: *Proceedings MTS/IEEE Oceans Conference*, pp. 1-9, Boston, EUA.
- ZHANG, Z., 2006, “Routing in Intermittently Connected Mobile Ad Hoc Networks and Delay Tolerant Networks: Overview and Challenges, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 8, n. 1 (Jan.), pp. 24-37.

Apêndice A

Modems Acústicos

Os modems acústicos subaquáticos são equipamentos mais adequados para realizar a comunicação no ambiente submarino, sendo usados pelas maiores empresas de petróleo, empresas de pesquisa, agências governamentais e universidades. Esses modems acústicos comerciais são empregados em diversas atividades e se destacam de acordo com as aplicações e cenários. Atualmente os principais fabricantes do mercado são:

- LinkQuest;
- EvoLogics;
- DSPComm;
- Aquatec Group;
- Teledyne Bents;
- TriTech International;
- Woods Hole Oceanographic Institute.

A LinkQuest é o principal fabricante de modems subaquáticos do mercado, produzindo uma variedade de modems da série UWM (2012). O modem UWM1000 foi projetado para águas rasas, possuindo um baixo consumo de energia (2W TX e 0,75 W RX), com um alcance de 350 metros e taxa de transmissão de 9.600 a 19.200 bps. Já o UWM10000 é um modem acústico específico para aplicações a grandes profundidades, mas com um alto consumo de energia (40 W TX e 0,9 W RX) o que permite transmitir a até 10 km de distância com uma taxa de transmissão de 2.500-5.000 bps (Figura A.1). A comparação das características destes dois modelos é mostrada na Tabela A.1.



Figura A.1: Modem acústico UWM10000.

Tabela A.1: Especificação dos modems UWM1000 e UWM10000.

Modems Acústicos	UWM1000	UWM10000
Taxa de transmissão RS-232	9600 bits/s	2500 bits/s
Taxa útil <i>Payload</i>	6600 bits/s	2000 bits/s
Taxa de transmissão no enlace acústico	17800 bits/s	5000 bits/s
Taxa de Erro (bit)	Menor que 10 ⁻⁹	Menor que 10 ⁻⁹
Alcance	350 m	7000 m (omnidirecional) 10000 m (direcional)
Profundidade máxima	200 m	2000, 4000 ou 7000 m
Consumo de potência TX	2 W	40 W
Consumo de potência RX	0,75 W	0,9 W
Consumo de potência em espera	8 mW	9 mW
Campo de radiação do transdutor:	210 ° (omnidirecional) 120 ° (faixa larga) 70 ° (faixa estreita)	210 ° (omnidirecional) 70 ° (direcional)
Frequência de operação	26,77 - 42,62 kHz	7,5 – 12,5 kHz
<i>Buffer</i> de entrada RS-232	900 kbytes	900 kbytes
Temperatura de operação	-5 a 45°C	-5 a 45°C
Comprimento total	235,7 mm	580 mm
Diâmetro	87,2-126,2 mm	150 mm
Peso fora d'água	4,2 kg	21 kg
Peso na água	2,3 kg	12,3 kg
Custo	US\$ 6.500,00	US\$ 10.000,00

A sua linha de produção oferece uma grande variedade de opções, como apresentado na Figura A.2, permitindo que seus modems sejam utilizados em diversas aplicações. Entretanto, estes modelos apresentam um custo considerável. Seu modem mais barato, o UWM1000, custa em média US\$ 6.500,00. Outro problema é o uso de sinalização proprietária, que dificulta a interoperabilidade com modems de outros fabricantes.



Figura A.2: Modems acústicos da LinkQuest.

A EvoLogics desenvolveu a linha S2CR (2012) de modems acústicos subaquáticos que fazem uso de uma tecnologia patenteada S2C (*Sweep Spread Carrier*) para transmissão subaquática. Esta tecnologia foi desenvolvida para utilizar o padrão do som emitido pelos golfinhos, que continuamente espalha a energia do sinal em uma vasta gama de frequências. Este processo é realizado para que os componentes dos múltiplos caminhos não interfiram uns com os outros. Esses modems variam de alta velocidade (28 kbps) para aplicações de pequeno e médio alcance (1.000 m) em águas rasas a modems de longo alcance (8 km) com taxas menores de transmissão (6,5 kbps) para águas profundas. Os custos variam de acordo com as configurações dos modems chegando a US\$ 12.500,00.

A DSPComm produz o AQUACOMM (2012), que é um modem subaquático que fornece ao usuário a capacidade de definir a potência de transmissão e recepção,

promovendo uma solução de baixo consumo para aplicações de curto alcance. O AquaComm tem alcance de 3 km e taxa de transmissão de dados de 100 ou 480 bps. O modelo que alcança taxas de transmissão de 100 bps custa US\$ 2.800,00 e o modelo que obtém taxas de 480 bps custa US\$ 3.500,00.

A Teledyne Bents fabrica modems acústicos utilizados largamente em redes subaquáticas, incluindo o programa SeaWeb da Marinha dos EUA (PROAKIS *et al.*, 2001). Os modems da série ATM (2012) são comercializados principalmente para comunicação vertical ponto-a-ponto em águas profundas, conseguindo prover comunicação a mais de 1 km de lâmina d'água com taxas de transmissão de 10.240 bits/s sem erros em condições ideais. No entanto, alcançam taxas de transmissão de dados em torno de 2.400 bits/s em ambientes reais. Esses modems também não são eficientes em relação ao consumo de energia, sendo necessários 28 a 84 W de potência na transmissão e 0,7 W na recepção. Além disso, os modems são muito caros, custando mais de US\$ 7.000,00.

O Grupo Aquatec é uma empresa que desenvolve modems acústicos sob medida. A série AQUAMODEM (2012) de longo alcance foi configurada para proporcionar uma taxa de transmissão de 300 a 2.000 bps com um alcance de até 20 km. Os modems AquaModem500 de curto alcance, oferecem uma taxa de transmissão de 25 a 100 bps, com um alcance de até 250 m, tendo custo inicial de US\$ 7.600,00.

A TriTech desenvolve modems acústicos específicos para comunicações com ROVs (*Remotely Operated Vehicle*) da linha MICRON (2012). Estes modems foram projetados para serem mais adequados para aplicações que tenham limitação de tamanho e peso, como os usados em AUVs e ROVs. O custo desses modems chega a ser a metade de outros modems, custando no varejo US\$ 3.360,00, tendo consumo de energia moderado de 7,92 W na transmissão e 720 mW na recepção e alcance máximo de até 1 km com taxa de transmissão muito baixas em torno de 40 bps.

O Woods Hole Oceanographic Institute (WHOI) projetou o modem MICRO (2012) que é um modem de arquitetura aberta para soluções comerciais. Atualmente é utilizado para comunicação e navegação de veículos submarinos autônomos, veículos autônomos de superfície, boias de telemetria e sensores de monitoramento de águas profundas. Este modem utiliza modulação na camada física FH (*frequency-hopping frequency*)/FSK (*shift keying*) ou PSK (*phase-shift keying*).

A modulação FH/FSK é usada em meios onde a comunicação é mais difícil, como por exemplo, em águas rasas, zonas litorais, comunicação com AUVs, apresentando baixas taxas de transmissão em torno de 80 bps. A modulação PSK por sua vez é usada em canais de comunicação relativamente simples, como por exemplo, lâminas d'águas profundas, apresentando taxas de transmissão mais elevadas de até 5.400 bps. Os componentes eletrônicos do modem (sem o invólucro de proteção da água) custam US\$ 4.900,00 com um adicional de US\$ 1.200,00 para o coprocessador PSK.

A Tabela A.2 apresenta uma comparação entre os modems acústicos de cada fabricante acima mencionados. As estimativas de custos variam de acordo com os componentes de *hardware* de cada modem.

Tabela A.2: Comparação de modems acústicos subaquáticos.

Fabricante / Modelo	Freq. (kHz)	Pot. TX e RX (W)	Alcance (km)	Modulação	Taxa (bps)	Custo (US\$)
LinkQuest / UWM10000	7,5-12,5	40 e 0,3	7	Proprietária	5.000	10.000
EvoLogics / S2CM48/78	48-78	2.5-80 e 0.5	1	S2C	15.000	12.500
DSPComm / AquaComm	16-30	Variada	3	DSSS/ OFDM	480	6.600
Teledyne Bents / ATM885	16-21	28-84 e 0.7	2-6	FSK/PSK	140-15.360	7.200-11.000
Aquatec / AquaModem	8-16	20 e 0.6	10	DSSS	300-2.000	> 7.600
TriTech / MicronModem	20-24	7.92 e 0.72	0.5	DSSS	40	3.500
WHOI / MicroModem	25	<50 e 0.23/2	1-10	FSK/PSK	80/ 5.400	8.100 / 9.400

Apêndice B

Sensores Subaquáticos

Os sensores são dispositivos projetados para responder a estímulos físico-químicos de maneira específica, convertendo a energia recebida em um sinal mensurável. A especificação dos sensores varia de acordo com as especificações de cada aplicação e, de maneira geral, funcionam como transdutores convertendo o valor medido (grandeza física) em um sinal elétrico, o que permite a comunicação e conseqüentemente o monitoramento à distância.

O monitoramento confiável de variáveis como pressão, temperatura e vazão é imprescindível para assegurar o bom funcionamento da infraestrutura submarina, o que garante a segurança operacional. No caso dos sensores utilizados na indústria de petróleo, especificamente para dutos, podem-se destacar os sensores micro processados de pressão (capacitivo), vazão (turbina) e temperatura (RTD - *Resistance Temperature Detector*). No caso de sensores de vazão a variedade é muito ampla, devido à tecnologia, características do fluido e diâmetro das tubulações. Estas características influenciam diretamente na estrutura mecânicas destes sensores.

No ambiente submarino esses sensores podem ser amplamente utilizados, mas as especificações desses instrumentos de medida devem ser definidas de acordo com o tipo de equipamento ou duto a ser monitorado. Assim, podem-se destacar alguns fabricantes que possuem linhas de sensores para este segmento de mercado, como a Honeywell, Emerson /Daniel e Pepperl Fuchs.

A Tabela B.1 apresenta os custos de alguns sensores empregados na área de petróleo e gás. Os sensores foram divididos pelo tipo, temperatura, pressão, vazão e TPV (Conjunto Temperatura, Pressão e Vazão) e pelo seu uso, terrestres, subaquáticos que trabalham em lâmina d'água de até 300 m, até 1.000 m e acima de 1.000 m.

Tabela B.1: Custos dos sensores.

Sensores	Custo US\$ (terrestre)	Custo US\$ (subaquático)		
		P < 300 m	300 m < P < 1000 m	P > 1000 m
Temperatura (RTD)	1.500,00	5.000,00	7.000,00	12.000,00
Pressão (capacitivos)	2.500,00	7.000,00	10.000,00	16.000,00
Vazão (ultrassom)	4.000,00	10.000,00	14.000,00	23.000,00
Conjunto (TPV)	6.000,00	17.000,00	26.000,00	38.000,00

Os sensores de temperatura são os mais utilizados na indústria de petróleo devido à importância do acompanhamento deste tipo de informação para o auxílio na prevenção de acidentes. Estes sensores são os mais simples de serem instalados, pois geralmente são acoplados em conjunto com outros sensores devido a seu menor tamanho.

Os medidores de temperatura são divididos em dois tipos básicos:

- mecânico, que mede a temperatura e gera na saída uma variável mecânica, como movimento ou força. Exemplos de sensores mecânicos: bimetal e elemento de enchimento termal;
- elétrico, que mede a temperatura e gera na saída uma variável elétrica, como tensão ou variação da resistência elétrica. Exemplos de sensores elétricos:

termopar (Figura B.1) e detector de temperatura a resistência (RTD - *Resistive Temperature Detector*).



Figura B.1: Sensores de temperatura termopares.

Os sensores mecânicos são mais simples e podem funcionar sem alimentação externa, utilizando a própria energia do processo para sua operação. Já os sensores elétricos são mais fáceis de serem condicionados e associados a sistemas de transmissão eletrônica e de telemetria.

A medição de pressão ocorre sempre de maneira comparativa, diferenciando-se apenas pela referência em questão. A medição da pressão absoluta do gás/óleo se dá pela soma da pressão barométrica com a pressão manométrica do gás/óleo. De maneira geral, são utilizados manômetros de precisão e transmissores de pressão, como os sensores capacitivos ou piezelétricos (Figura B.2).



Figura B.2: Sensor de pressão piezelétrico.

Inúmeros tipos de manômetro podem ser utilizados na medição de pressão, como o manômetro de coluna, que é constituído por um tubo com uma escala graduada e diâmetro constante onde há uma quantidade pré-estabelecida de fluido incompressível no qual a força é aplicada, e assim a indicação na escala do valor de pressão é efetuada. Já o manômetro Bourdon consiste em um tubo em configuração elíptica no qual uma ponta é livre e a outra fixa. Quando é aplicada a pressão, existe uma tendência de o tubo se tornar circular, assim gerando um deslocamento que pode ser medido.

Para transferência da pressão em uma determinada região interna do duto (normalmente central) são utilizados tubos de Pitot, que são sondas compostas simplesmente por um tubo que fica alinhado com o fluxo de modo a transferir a pressão existente para uma parte externa, e assim realizar a medição por um manômetro. No tubo de Pitot simples a pressão medida é a soma da pressão estática com a pressão dinâmica.

Os sensores de pressão podem utilizar ainda os *Strain Gauges*, que são pequenas células de silício que possuem resistência elétrica variável de acordo com o nível de esforço mecânico ao qual são submetidas. Normalmente são montados em uma membrana que é submetida ao nível de pressão que deseja ser medido.

O medidor diferencial capacitivo consiste em um dispositivo com duas membranas nas quais as pressões serão aplicadas. É provido de dutos que transferem as grandezas até seu interior por meio de um óleo viscoso, onde as placas metálicas são encontradas. A diferença entre estas duas placas altera o valor da capacitância entre as placas, o que determina a diferença de pressão coletada e tratada por um circuito. A indicação do valor da pressão normalmente é muito preciso.

Os sensores de vazão utilizam varias formas de medição como venturi, placas de orifício, ultrassônico e turbinas etc. Estes medidores utilizam os princípios de medição da velocidade do fluido ou da variação de energia cinética, devendo ser instalados em um trecho reto de tubulação.

O tubo de venturi é um medidor de velocidade do escoamento e vazão através da variação da pressão durante a passagem do líquido por um tubo de seção mais larga e depois por outro de seção mais estreita. Se o fluxo de um fluido é constante, mas sua área de escoamento diminui, então necessariamente sua velocidade aumenta. Para o teorema a conservação da energia se a energia cinética aumenta, a energia determinada pelo valor da pressão diminui.

O medidor tipo placa de orifício consiste em uma placa com uma passagem circular no meio que é colocada de modo a promover o estrangulamento do fluxo, alterando assim o perfil de velocidade do escoamento. Seu princípio de funcionamento é similar ao medidor venturi, porém necessita de um acabamento de usinagem, além de gerar uma menor perda de carga.

O medidor tipo ultrassônico utiliza o conceito físico de propagação de ondas em um meio para determinar a vazão, existindo duas classificações possíveis para sensores deste tipo, efeito Doppler e tempo de trânsito.

O efeito Doppler se baseia no princípio Doppler da variação da frequência de ondas entre células emissoras e receptoras estando em movimento relativo. A faixa de frequência utilizada é de 150 kHz a 5 MHz, porém para ser utilizado, o fluido deve possuir uma quantidade de partículas em suspensão maior que 1% e menor que 10%. O emissor e receptor ficam instalados externamente alinhados nas laterais da tubulação, sendo assim realizada a emissão do sinal e captação devido a reflexão nas partículas em suspensão do fluido.

O tempo de trânsito possui uma abordagem diferente do efeito Doppler, pois a vazão é medida através da detecção do tempo que a onda emitida leva para chegar ao receptor passando pelo fluxo. Neste caso, os sensores são compostos de um conjunto emissor/receptor colocado sobre a tubulação com uma distância pré-estabelecida emitindo e recebendo os sinais, onde o tempo de propagação será calculado. Este tipo de sensor é utilizado para medição de fluidos limpos com nível de partículas em suspensão menor que 3%, e portanto é mais aplicado em medições de gás natural.

O medidor de vazão tipo turbina consiste basicamente de um rotor, montado entre buchas em um eixo, que gira a uma velocidade proporcional à velocidade do fluido dentro do corpo do medidor. Um sensor eletromagnético (*pick-up*) detecta a velocidade de giro do rotor gerando um trem de pulsos que serão transmitidos para um indicador eletrônico que fornecerá uma leitura em vazão instantânea e totalização nas unidades de engenharia ou transmitindo um sinal analógico.

O medidor tipo turbina da Emerson/Daniel Serie 1500 (Figura B.3) é um medidor de fluxo volumétrico usado extensivamente na indústria do petróleo. Este medidor é utilizado para medições precisas de hidrocarbonetos líquidos e outros fluidos deste processo, sendo desenvolvido para dar confiabilidade e disponibilidade a processos de automação.



Figura B.3: Sensor de vazão tipo turbina.

Apêndice C

Embarcações Especiais

O lançamento de novas linhas de dutos submarinos é executado por embarcações específicas como o CSO Deep Blue (Figura C.1), que tanto pode instalar *flowlines* e umbilicais, como fazer o apoio a campos em desenvolvimento, podendo trabalhar em lâmina d'água variando de 75 m a 2.500 m. Os serviços disponibilizados por este tipo de embarcação têm custo estimado de US\$ 200.000,00 por dia (US\$ 8.000,00 por hora).



Figura C.1: Embarcação CSO Deep Blue.

O navio pode realizar o lançamento de linhas rígidas de até 5.500 T de 4" a 18" ou linhas de 4.000 t de 4" a 26". Alternativamente, pode lançar linhas flexíveis de 5.700 t de 2" a 16". Sua carga máxima de 11.023 t pode consistir em qualquer uma das duas bobinas de linhas rígidas (5.511 t), nos dois carrosséis de linhas flexíveis (2.000 t e 1.500 t), nos oito *reels* portáteis 300 t, 4.000 t de linhas rígidas ou 3.000 t de estruturas e equipamentos submarinos.

As embarcações DSV (*Dive Support Vessel*) são especializadas no apoio aos serviços executados por mergulhadores. O custo destas embarcações, que já incluem os serviços dos mergulhadores, está estimado em US\$ 120.000,00 por dia (US\$ 5.000,00 por hora). Neste caso, os serviços são mais especializados, porém mais demorados devido à limitação física da jornada de trabalho que os mergulhadores são submetidos.

O navio Gulmar Atlantis Harrier (Figura C.2), foi especialmente projetado para operações de mergulho, bem como construção, instalação e manutenção submarina. Ele possui um sistema totalmente integrado de saturação de mergulho, que tem uma capacidade para 18 mergulhadores e guindastes com capacidade de 400 toneladas. Este navio pode oferecer suporte a uma grande variedade de operações submarinas como reparo de dutos submarinos e instalações de equipamentos e manutenção em geral.



Figura C.2: Embarcação Gulmar Atlantis Harrier.

As embarcações RSV (*ROV Support Vessel*) são especializadas em serviços que necessitem a utilização de ROV (*Remote Operate Vehicle*). Os ROVs são operados da embarcação para o manuseio e montagem de equipamentos submarinos, atuando através de braços mecânicos, luzes e lentes. Esse tipo de embarcação, como a CBO Isabella, mostrada na Figura C.3, é utilizada nas atividades em lâmina d'água acima de 300 m (+300 m), tendo o custo estimado de US\$ 90.000,00 por dia ou US\$ 3.750,00 por hora (Embarcação + ROV).



Figura C.3: Embarcação CBO Isabella.