

# Deepwater Monitoring System in Underwater Delay/Disruption Tolerant Network

F. J. L. Ribeiro, A. C. P. Pedroza and L. H. M. K. Costa

**Abstract**— This paper proposes a deepwater monitoring system built with sensors distributed in Campos Basin offshore area. The underwater communications are undertaken by underwater acoustic modems installed on the sensors 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 Monitoring system feasibility, analyzing the network behavior using ONE (Opportunistic Network Environment) simulator, adjusting the simulation scenarios to the characteristics of the Brazilian oil exploration area.

**Keywords**— Underwater communications, acoustic, sensor networks, deepwater monitoring.

## I. INTRODUÇÃO

**A**UTO-SUFICIÊNCIA na produção de petróleo buscada nas últimas décadas pelo Brasil foi baseada em avanços tecnológicos alcançados na exploração e operação de petróleo em águas profundas, possibilitando inúmeras descobertas na plataforma oceânica continental. As atividades dessa indústria são complexas e perigosas, necessitando de uma infraestrutura robusta e confiável, distribuída em uma grande área a 70 km da costa, com lâminas d'água variando de 120 até 2800 m [1].

A complexidade do processo de operação e manutenção dessa infraestrutura é reflexo das condições severas do ambiente subaquático. No Brasil este ambiente apresenta, em alguns pontos, uma extrema inclinação, sujeitando as estruturas a uma grande instabilidade que impõe a necessidade de um monitoramento constante. No entanto, a abordagem atual limita os pontos de observação excluindo do monitoramento grande parte dos equipamentos submarinos.

As redes subaquáticas podem proporcionar a ampliação do monitoramento, permitindo a verificação constante das condições dessa infraestrutura submarina. 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 [2], sendo necessária a implementação de sistemas tolerantes a falhas e interferências a fim de se adequar às características do meio de comunicação.

O uso de uma arquitetura de comunicação subaquática baseada em redes tolerantes a atrasos e desconexões [3] torna-se imperativo, 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.

O sistema de monitoramento subaquático é composto por sensores acústicos e navios de suporte e logística. Os sensores acústicos são responsáveis por armazenar e transmitir as informações obtidas dos vários equipamentos submarinos instalados na área *offshore* da Bacia de Campos. Os navios de suporte e logística por sua vez são responsáveis pela coleta das mensagens geradas nos sensores e pelo consequente encaminhamento para o centro de controle.

Este trabalho investiga o comportamento da rede a fim de analisar a viabilidade do sistema de monitoramento subaquático. Essa análise é feita utilizando o simulador ONE (*Opportunistic Network Environment*) [4], que foi adaptado para descrever as condições de comunicação subaquática. Além disso, foram configurados cenários compatíveis com as características da área *offshore* da Bacia de Campos, para verificar se os navios de suporte logístico podem realizar a aquisição dos dados gerados nos sensores subaquáticos.

O restante deste artigo está organizado nas seguintes seções: a Seção II apresenta os trabalhos relacionados e a Seção III, as características da comunicação subaquática. A Seção IV define o sistema de monitoramento subaquático e sua arquitetura. Na Seção V mostramos os procedimentos adotados para a análise do sistema proposto. A Seção VI apresenta os resultados obtidos, enquanto que a Seção VII contém as conclusões sobre o sistema de monitoramento.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

A evolução da comunicação subaquática vem refletindo diretamente no número de novas aplicações no ambiente submarino, em especial no que se refere a aplicações de monitoramento. Dentre os trabalhos sobre sistemas de monitoramento subaquático, a proposta de aquisição de dados de Vasilescu et al. [5] apresenta uma rede de sensores para monitoramento de corais e recifes que utilizam AUVs (*Autonomous Underwater Vehicle*) para a coleta dos dados dos sensores, mesclando comunicação óptica de curto alcance com comunicação acústica. Já em Penteadó et al. [6] é proposta uma rede de sensores para obtenção de dados oceanográficos para o monitoramento de correntes marítimas. Esta rede

---

F. J. L. Ribeiro, GTA/PEE/COPPE - DEL/POLI Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Petrobras, Rio de Janeiro, Brasil, fabriciojorge@gta.ufrj.br

A. C. P. Pedroza, GTA/PEE/COPPE - DEL/POLI Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil, aloysio@gta.ufrj.br

L. H. M. K. Costa, GTA/PEE/COPPE - DEL/POLI Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil, luish@gta.ufrj.br

acústica é composta de sensores fixos que se comunicam com um sorvedouro que é responsável pela comunicação externa.

Liu et al. [7] descrevem uma análise dos problemas das redes subaquáticas de sensores. Este trabalho apresenta os tipos de comunicação possíveis no meio subaquático, discutindo as alternativas de transmissão eletromagnética, óptica e acústica. Uma visão geral dos desafios da comunicação subaquática também pode ser observada em Heidemann et al. [8], onde são destacadas as dificuldades impostas pelo meio de comunicação e as restrições do canal acústico, como interferência, largura de banda, reflexões, taxa de erros e alcance. Uma arquitetura para redes subaquáticas e seus requisitos foram propostos por Akyildiz et al. [9]. O estudo detalha algumas propostas para as camadas de controle de acesso ao meio, rede e transporte, apresentando uma avaliação bem consistente dos protocolos desta arquitetura.

As redes tolerantes a atrasos e desconexões (DTN) foram utilizadas no ambiente subaquático, permitindo que os nós se comunicassem através de mensagens assíncronas, sem o estabelecimento do caminho fim a fim. Zhang [10] analisa alguns protocolos propostos para redes DTN, tais como Epidemic e Prophet. Estes protocolos podem ser utilizados no roteamento, dependendo da redundância de mensagem desejada. O protocolo Epidemic usa uma abordagem de inundação. 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 para determinar o nó com maior probabilidade de entrega da mensagem, reduzindo o número de mensagens duplicadas na rede.

Islam e Waldvogel [11] 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 de 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 [12].

A análise dos protocolos de roteamento Epidemic e Prophet em um sistema de monitoramento específico para dutos submarinos foi realizada por Ribeiro et al. [13]. Este sistema é composto de uma rede subaquática de sensores que utiliza navios para coleta dos dados.

O presente trabalho propõe a avaliação do sistema de monitoramento subaquático baseado em [13], 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 [14], escolhido por sua simplicidade e desempenho. 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.

### III. COMUNICAÇÃO SUBAQUÁTICA

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 [5].

A implementação mais eficaz de uma comunicação subaquática é feita através de ondas acústicas [7], mesmo considerando as limitações do canal acústico. No entanto, o canal acústico tem características que restringem seu uso, tais como a velocidade de propagação baixa e variável, a baixa largura de banda e o alto consumo de energia. Estas limitações devem ser consideradas na análise de viabilidade das aplicações neste ambiente.

#### A. Transmissões Acústicas no Oceano

As transmissões acústicas são diretamente influenciadas pela velocidade do som, que na água é de 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. Além disso, a velocidade do som na água é variável e dependente da pressão (profundidade), densidade, temperatura e salinidade [15]. A combinação destas características faz com que a velocidade do som na água varie desde a superfície ao fundo [16], propagando-se através de caminhos curvos, devido à refração causada por camadas com diferentes velocidades. A propagação do som na água do mar é feita através de linhas curvas, devido à refração da onda sonora causada pela velocidade diferente das camadas adjacentes.

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 Fig. 1 [17].

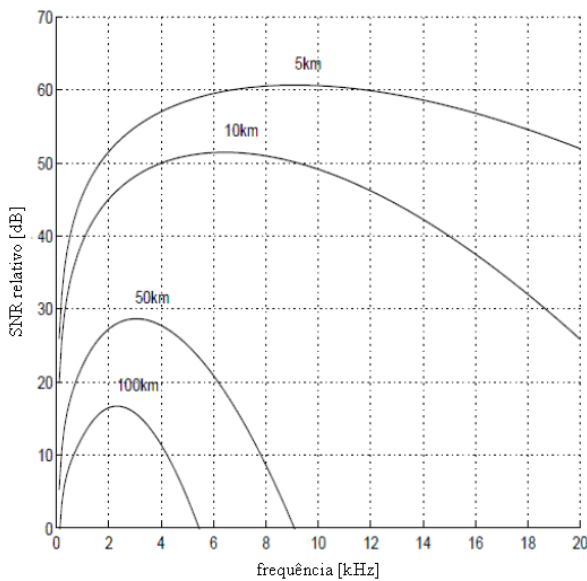


Figura 1. Alcance dependente da frequência e o sinal/ruído.

A relação entre o SNR e a frequência é apresentada na Fig. 1 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 I [17] mostra a relação entre a largura de banda do canal acústico e a distância.

TABELA I  
RELAÇÃO ENTRE ALCANCE E LARGURA DE BANDA.

ALCANCE ( KM )	LARGURA DE BANDA ( KHZ )
1000	MENOS QUE 1
10 – 100	2 – 5
1 – 10	APROXIMADAMENTE 10
0,1 – 1	20 – 50
MENOS QUE 0,1	MAIOR QUE 100

Ondas acústicas sofrem interferência de ruídos causados por reflexões, obstáculos e turbulências. A perda causada pela absorção do som é outra característica importante, fazendo com que a largura de banda do canal acústico diminua com a distância. Essa limitação restringe o alcance, as frequências de transmissão e as taxas de transmissão [18].

O controle do acesso ao meio de comunicação é prejudicado pela alta latência do canal de comunicação. Assim, algumas propostas como FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), TDMA (*Time Division Multiple Access*) e CDMA (*Code Division Multiple Access*) tornaram-se alternativas para ambientes subaquáticos. No entanto, o controle de acesso ao meio mais utilizado é o TDMA, devido ao método simples para a transmissão de cada nó na rede.

O método TDMA é realizado por atribuição cíclica de um *slot* de tempo para cada transmissão na rede. Durante cada intervalo de tempo, o canal é reservado para a transmissão de um único nó. Estes intervalos devem ser separados por um tempo de guarda para evitar a sobreposição das transmissões.

### B. Requisitos de 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. A dependência da largura de banda com a distância é o principal fator que limita o alcance da rede, podendo chegar a até 5 km.

Os dados transmitidos devem ser compatíveis com a taxa de transmissão disponível. Assim, 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. Esta quantidade de dados pode transportar muita informação, o que é totalmente adequado as aplicações de monitoramento.

## IV. SISTEMA DE MONITORAMENTO SUBAQUÁTICO

A área de exploração de petróleo da Bacia de Campos é de aproximadamente 115.000 km<sup>2</sup> [1] (Fig. 2) e composta por inúmeras plataformas e navios, além de diversas estruturas submarinas pertencentes a várias unidades de produção. As embarcações de suporte e logística deslocam-se por toda essa área, realizando a distribuição de recursos através de uma rotina específica de ancoragem e deslocamento, a fim de executar o abastecimento das unidades.

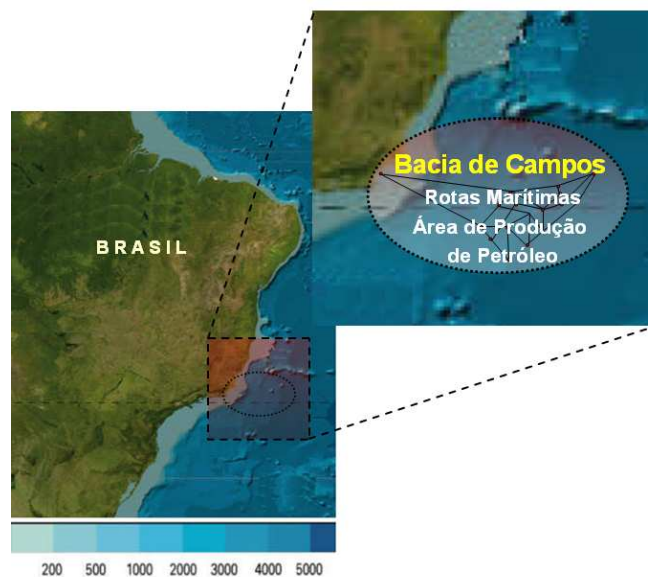


Figura 2. Área de navegação dos navios de suporte e logística.

O uso de redes acústicas de monitoramento em ambientes subaquáticos foi impulsionado pelo avanço dos modems acústicos atuais, que fornecem maior alcance com taxas de transmissão adequadas às necessidades das aplicações de monitoramento. Portanto, é possível utilizar sensores acústicos subaquáticos instalados na infraestrutura submarina para monitorar pressão, temperatura e fluxo além de proporcionar o controle de posicionamento. Esta última opção é especialmente importante para monitoramento do lançamento de novas linhas de dutos submarinos [19].

Os navios de suporte e logística possuem comunicação via rádio e/ou satélite e as suas rotas são distribuídas por toda a área de exploração, 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 Fig. 3.

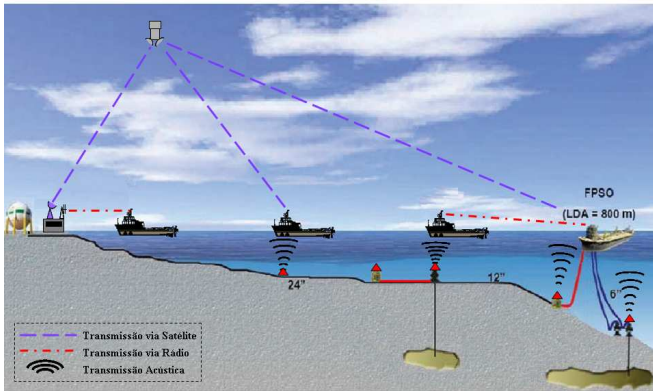


Figura 3. Sistema de monitoramento subaquático.

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.

#### A. 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. [20]. Os nós podem se comunicar com os outros nós para enviar os seus dados e receber comandos até alcançar um nó coletor. Este nó coletor de borda capta as mensagens no domínio subaquático e encaminha para o domínio não subaquático [9]. Neste tipo de rede, os nós mantêm uma operação autônoma de transmissão de dados, sendo responsabilidade do sensor a decisão de transmissão das informações, o que sempre ocorre quando um nó móvel está ao alcance. Assim, os sensores podem ser utilizados para o 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 nos dutos submarinos e programados para 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 [21] e oceanográfico [6].

A rede DTN necessita transmitir mensagens sem o estabelecimento de um caminho fim a fim. Esta característica está relacionada com os atrasos e desconexões existentes. Em ambientes subaquáticos, essas condições são causadas por mudanças constantes no meio acústico, que afetam a operação dos nós móveis, tais como interferências, hibernação de sensores para a conservação de energia ou as condições marítimas de navegação.

#### B. Arquitetura de 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. Estes 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 [3]. 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 (navios). Essas mensagens são encaminhadas pelo domínio não subaquático, movendo-se na rede DTN até atingir o destino localizado em uma rede externa (Fig. 4).

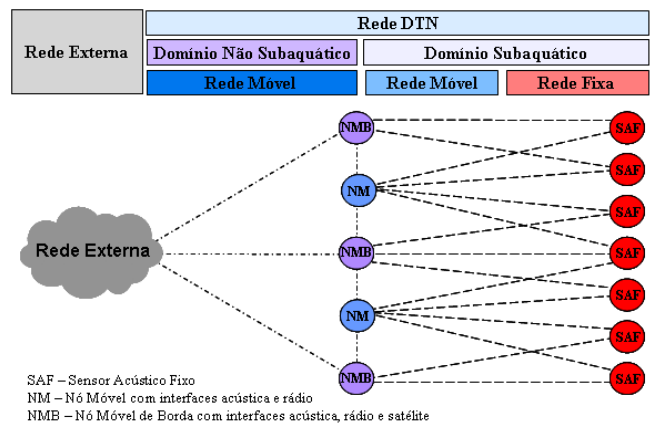


Figura 4. Comunicação entre nós móveis e sensores.

Os nós móveis (navios) 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 estas 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 Fig. 5.

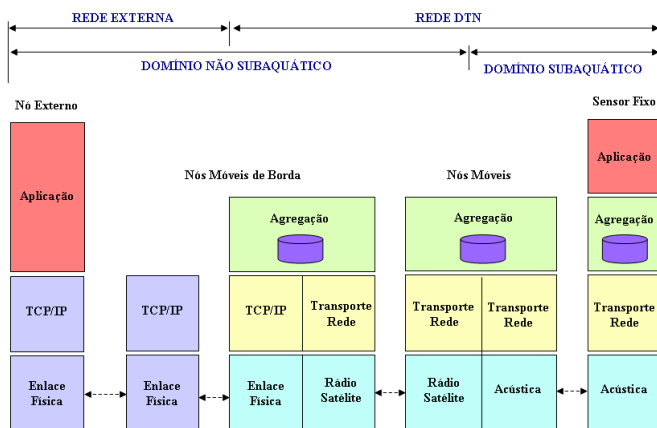


Figura 5. Arquitetura proposta para o sistema de comunicação subaquático.

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. Assim, o protocolo de roteamento pode ser baseado no algoritmo Epidemic [14], a fim de garantir menor complexidade e aumentar a taxa de sucesso no encaminhamento das mensagens.

## V. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE

A análise do sistema de monitoramento subaquático proposto é feita através de uma série de simulações destinadas a verificar a qualidade do sistema de comunicação em relação à movimentação dos navios. O objetivo é mostrar o comportamento da rede em cada cenário a fim de verificar a viabilidade do uso da frota de navios de suporte e logística da área de exploração de petróleo da Bacia de Campos para capturar dados dos sensores subaquáticos.

Para avaliar e comparar o desempenho do sistema foi utilizado o simulador ONE, proposto por Keränen, et al. [4]. 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.

### A. Cenário

Devido à importância do cenário 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 mais realista possível. Utilizou-se 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 aleatoriamente através das rotas disponíveis.

As simulações consideram uma rede móvel com 25 sensores na região de exploração e até 200 nós móveis (navios) comunicando-se com um centro de controle fora da rede DTN. Os nós móveis são distribuídos aleatoriamente sobre a rede e se movem de acordo com o modelo de mobilidade. Os nós participam dos dois grupos que representam os tipos os navios de suporte e logística, de acordo com o tipo disponível de comunicações (via satélite ou rádio).

Atualmente, existem 254 navios de suporte e logística 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 [22]. A Bacia de Campos trabalha atualmente com cerca de 80% dessa frota, portanto, optamos 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. Estes pontos de interesse representam as unidades de produção *offshore* e áreas de ancoragem concentradas na região de exploração. A Fig. 6 apresenta o cenário básico das simulações, onde podem ser identificados os pontos de interesse, os sensores distribuídos na região de exploração e as rotas dos navios.

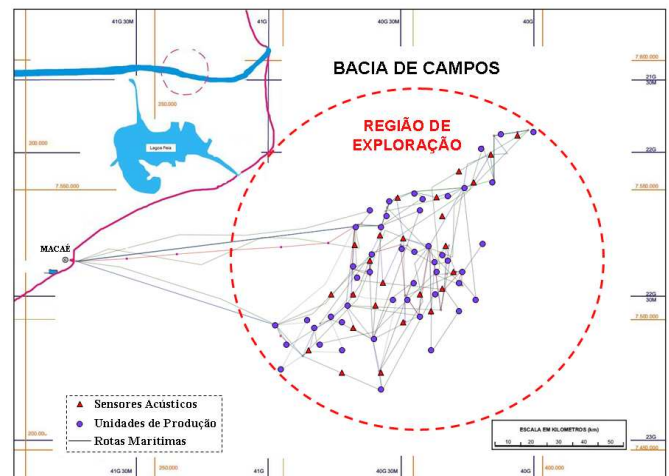


Figura 6. Cenário básico das simulações.

Nossa avaliação foi focada na verificação do comportamento do sistema, usando o protocolo de roteamento Epidemic [14] para verificar o encaminhamento de mensagens nos domínios de comunicação.

### B. Configuração do Cenário

Para simular um cenário de monitoramento realista, foram consideradas as características específicas da região, o que normalmente influencia o tipo de movimento e a densidade de navios. Com exceção dos sensores, os nós móveis (navios) movem-se de acordo com rotas marítimas pré-estabelecidas. Em uma operação típica, os navios saem do porto e se encaminham 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.

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

- Área simulada de 250 km x 250 km (região de exploração);
- 48 pontos de interesse, representando as unidades de produção;
- 25 sensores distribuídos em pontos estratégicos na região de exploração de petróleo.
- Número de nós móveis variando de 5 até 200 navios;
- Velocidade dos navios variando em média de 5 a 14 nós;
- Período de simulação de 24 horas.

Toda conexão é realizada somente se os nós (sensores e os navios) estiverem dentro do alcance. Assim, o comportamento da rede depende das características da comunicação acústica, da comunicação via rádio, o tamanho de *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 e posicionamento coletadas de equipamentos submarinos.

## VI. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

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 desta 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 evolução dos contatos na rede por hora é apresentada no gráfico da Fig. 7. É possível observar o crescimento desses contatos com o aumento do número de navios na rede. Este comportamento indica que o crescimento do número de navios influencia a capacidade do sistema em alcançar os sensores, permitindo que mais mensagens sejam coletadas.

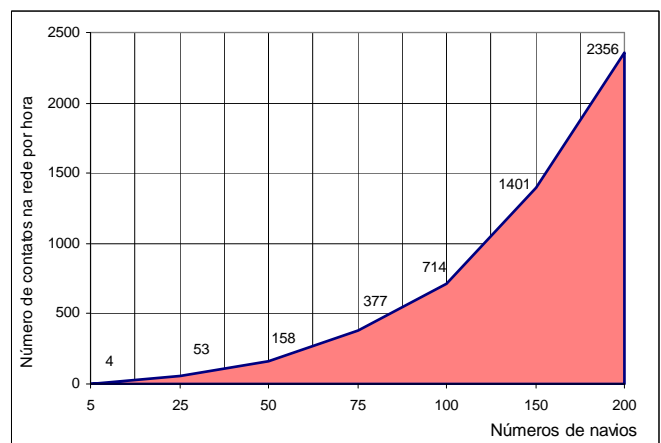


Figura 7. Número de contatos na rede.

A porcentagem dos sensores alcançados em cada cenário pode ser verificada na Tabela II, onde pode ser observado que o sistema, mesmo com poucos navios (25), atingiu 97% dos sensores subaquáticos. A totalidade dos sensores foi contatada a partir do cenário com 50 navios, o que indica a viabilidade da utilização dos navios de suporte e logística para a coleta de informações de monitoramento.

TABELA II  
PORCENTAGEM DOS SENSORES CONTATADOS.

NÚMERO DE NAVIOS	PORCENTAGEM DE SENSORES CONTATADOS
5	85 %
25	97 %
50	100 %
75	100 %
100	100 %
150	100 %
200	100 %

A varredura total dos sensores, mesmo tendo equipamentos submarinos dispersos por essa grande área, ocorre devido à distribuição dos sensores em pontos estratégicos, que levam em conta a necessidade de monitoramento e as rotas marítimas.

O número de contatos e a varredura total dos sensores estão relacionados com o tempo que o sensor espera para enviar as mensagens. Esse tempo é crucial para definição da capacidade do sistema em realizar o monitoramento de determinada informação. O monitoramento do posicionamento dos equipamentos submarinos é um exemplo típico, que tem uma variação pequena ao longo do tempo e pode ser implementado com 25 navios na rede (Fig. 8). Neste caso, os dados são coletados em média a cada 686 min ou 11 h e 26 min, um período de amostragem aceitável para o monitoramento deste tipo de informação.

O monitoramento das informações de vazão, temperatura e pressão necessitam de um período de varredura menor e este tempo é alcançado a partir de 150 navios, onde se obtém um intervalo de espera em média de 26 min. Já no cenário com 200 navios, este intervalo pode chegar a 15 min, tornando o sistema de monitoramento totalmente viável para este tipo de informação.

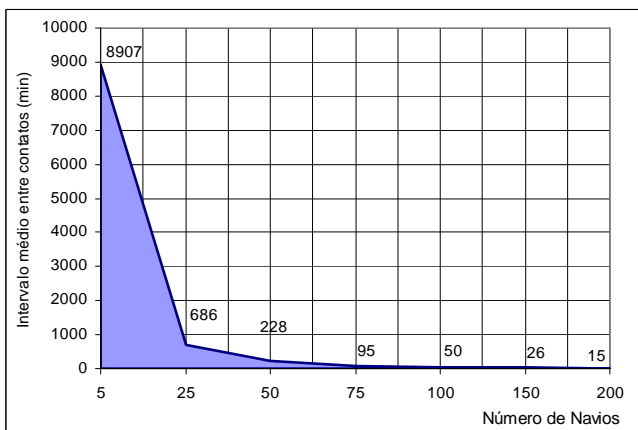


Figura 8. Intervalo de espera para enviar as mensagens.

Outro parâmetro importante do sistema é a latência da rede, que também sofre influência do número de navios disponíveis. Pode ser observado no gráfico da Fig. 9, 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 na rede.

A latência da rede cai para níveis muito baixos a partir do cenário com 150 navios, alcançando uma latência em média de 202 s no cenário com 200 navios. Neste caso, mesmo com a inundação da rede ocasionada pelo protocolo de roteamento Epidemic, a latência diminui com o maior número de navios, fazendo com que as mensagens sejam entregues mais rapidamente.

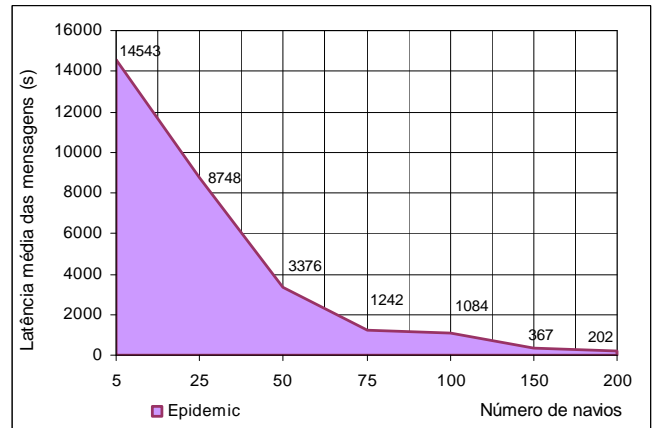


Figura 9. Latência da rede.

## VII. CONCLUSÃO

Este trabalho propôs um sistema de monitoramento subaquático em uma rede tolerante a atrasos e interrupções, específico para o ambiente *offshore* da Bacia de Campos. O objetivo foi verificar o comportamento do sistema e analisar a viabilidade do uso dos navios de suporte e logística na tarefa de coletar as mensagens dos sensores subaquáticos.

Apesar da imprevisibilidade de comunicação da rede DTN, verificou-se que um pequeno número de navios pode implementar a varredura de todos os sensores subaquáticos. Além do monitoramento de aplicações que tolerem um período amostragem maior, mesmo considerando uma área de 115.000 km<sup>2</sup> e a dispersão dos equipamentos submarinos.

O patamar de monitoramento pleno pôde ser alcançado com um número de navios totalmente consistente com a realidade encontrada na Bacia de Campos, permitindo que seja implementado o monitoramento de uma ampla gama de informações específicas da infraestrutura submarina responsável pela exploração de petróleo.

O comportamento geral do sistema foi satisfatório, apresentando resultados consistentes que demonstram a viabilidade do uso da frota de suporte e logística para obtenção dos dados dos sensores subaquáticos.

## REFERÊNCIAS

- [1] C. T. C. Fraga, F. A. Borges, C. Bellot, R. Beltrão e M. I. Assayag, "Campos Basin - 25 Years of Production and its Contribution to the Oil Industry", *Offshore Technology Conference - OTC*, Houston, Texas, EUA, Maio, 2003.
- [2] K. Fall, "Messaging in difficult environments", *Intel Research Berkeley*, 2004.
- [3] V. Cerf, S. Burleigh, A. Hooke, L. Torgerson, R. Durst, K. Scott, K. Fall e H. Weiss, "Delay-Tolerant Networking Architecture, RFC 4838", *DTN Research Group*, 2007.
- [4] A. Keränen, J. Ott e T. Kärkkäinen, "The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation", *International Conference on Simulation Tools and Techniques - SIMUTools'09*, Roma, Itália, 2009.
- [5] I. Vasilescu, K. Kotay, D. Rus, M. Dunbabin e P. Corke, "Data collection, storage, and retrieval with an Underwater Sensor Network", *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Embedded Networked Sensor Systems - SenSys '05*, pp. 154-165, Nova York, NY, EUA, 2005.

- [6] D. Penteado, L. H. M. K. Costa e A. C. P. Pedroza, "Deep-ocean Data Acquisition Using Underwater Sensor Networks", *The 20<sup>th</sup> International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference - ISOPE-2011*, vol. 1, pp. 383-389, Pequim, China, Junho, 2010.
- [7] L. Liu, S. Zhou e J. Cui, "Prospects and Problems of Wireless Communication for Underwater Sensor Networks", *Wiley Wireless Communications and Mobile Computing, Special Issue on Underwater Sensor Networks*, vol. 8, no. 8, pp. 977-994, 2008.
- [8] J. Heidemann, W. Ye, J. Wills, A. Syed e Y. Li, "Research challenges and applications for underwater sensor networking", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, vol. 1, pp. 228-235, Las Vegas, EUA, Abril, 2006.
- [9] I. F. Akyildiz, D. Pompili e T. Melodia, "State of the art in protocol research for underwater acoustic sensor networks", *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun.*, Rev., vol. 11, no. 4, pp. 11-22, Nova York, NY, EUA, Agosto, 2007.
- [10] Z. Zhang, "Routing in Intermittently Connected Mobile Ad Hoc Networks and Delay Tolerant Networks: Overview and Challenges", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 8, pp. 24-37, 2006.
- [11] A. Islam e M. Waldvogel, "Reality-Check for DTN Routing Algorithms", *The 28<sup>th</sup> International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, pp. 204 - 209, Pequim, China, Junho, 2008.
- [12] F. J. L. Ribeiro, A. C. P. Pedroza e L. H. M. K. Costa, "Protocolo de Roteamento para Sistemas Subaquáticos de Comunicação", *9<sup>th</sup> International Information and Telecommunication Technologies Symposium - I2TS'2010*, vol. 1, pp. 1-7, Rio de Janeiro, Brasil, Dezembro, 2010.
- [13] F. J. L. Ribeiro, A. C. P. Pedroza e L. H. M. K. Costa, "Deepwater Monitoring System Using Logistic-Support Vessels in Underwater Sensor Networks", *The 21<sup>st</sup> International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference - ISOPE-2011*, vol. 2, pp. 327-333, Maui, Havaí, EUA, Junho, 2011.
- [14] P. Mundur, e M. Seligman, "Delay tolerant network routing: Beyond epidemic routing", *3<sup>rd</sup> International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC)*, Santorini, Grécia, Maio, 2008.
- [15] R. Urick, "Principles of Underwater Sound", *McGraw-Hill*, 1983.
- [16] L. M. Brekhovskikh e Y. P. Lysanov, "Fundamentals of Ocean Acoustics", *Springer-Verlag*, 2<sup>a</sup> edição, 1991.
- [17] M. Stojanovic, "Acoustic (underwater) Communications", *J.G. Proakis, editor, Encyclopedia of Telecommunications. John Wiley and Sons*, 2003.
- [18] M. Stojanovic, "On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic channel", *The 1<sup>st</sup> ACM International Workshop on Underwater Networks (WUWNet)*, pp. 41-47, Los Angeles, CA, EUA, Setembro, 2006.
- [19] R. F. Solano, M. C. Genai, A. Ayres e G. S. Cezar, "Design and Installation Challenges of Jubarte Gas Pipeline in the Shore Approach Area", *The 17<sup>th</sup> International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference - ISOPE-2007*, pp. 995-1001, Lisboa, Portugal, Julho, 2007.
- [20] I. Vasilescu, K. Kotay, D. Rus, M. Dunbabin e P. Corke, "Data collection, storage, and retrieval with an Underwater Sensor Network", *Sensys'95: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 154-165, San Diego, CA, EUA, Novembro, 2005.
- [21] Y. Guo, F. Kong, D. Zhu, A. Tosun e D. Quingxu, "Sensor Placement for Lifetime Maximization in Monitoring Oil Pipeline", *Proceedings of 1<sup>st</sup> ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems*, Estocolmo, Suécia, Abril, 2010.
- [22] J. S. Gabrielli e A. Barbassa, "Business Plan 2010 - 2014", <http://www.petrobras.com.br/ri/Download.aspx?id=10932>, 2010.

se concentram na área de comunicação subaquática, protocolos de roteamento, redes de sensores e redes tolerantes a atrasos e desconexões utilizadas em sistemas de monitoramento voltados para a área de exploração de petróleo, tópico no qual tem escrito e revisado artigos.



**Aloysio de Castro Pinto Pedroza** graduado em Engenharia Eletrônica, em 1975 e Mestrado em Engenharia Elétrica, em 1980 pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil. Obteve o título de Doutor em Automática Informática Industrial pela Université Toulouse III Paul Sabatier, Toulouse, França, em 1985. Atualmente é Professor Associado da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Sistemas de Computação. Atuando principalmente nos seguintes temas: Protocolos de Comunicação, Redes de Computadores, Especificação Formal.



**Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa** graduado como Engenheiro Eletrônico e M.Sc. em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Brasil, em 1997 e 1998, respectivamente. Defendeu sua tese de doutorado na University Pierre et Marie Curie (Paris 6), Paris, França, em 2001. Em 2002 atuou como pesquisador pós-doutorado na LIP6 (Laboratoire d'Informatique de Paris 6). Desde 2004, é professor associado da Universidade Federal do Rio de Janeiro. As suas pesquisas se concentram na área de roteamento, especialmente em redes wireless, qualidade de serviço, multicast e roteamento. Atualmente é membro associado da IEEE e membro profissional da ACM.



**Fabrício Jorge Lopes Ribeiro** graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ), Rio de Janeiro, Brasil, em 1999 e Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, Brasil, em 2004. Atua desde 2004, como Engenheiro de Telecomunicações da Petrobras na área de gerenciamento da rede das plataformas de produção de petróleo da Bacia de Campos. Atualmente cursa o Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e suas pesquisas