

Sistema de Monitoramento Subaquático Usando Navios de Suporte Logístico em uma Rede de Sensores Acústicos Tolerante a Atrasos e Interrupções

Fabrizio Jorge L. Ribeiro^{1,2}, Aloysio C. P. Pedroza¹, Luís Henrique M. K. Costa¹

¹ GTA/PEE/COPPE - DEL/POLI - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Rio de Janeiro – Brasil

² PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.
Rio de Janeiro – Brasil

{fabriciojorge, aloysio, luish}@gta.ufrj.br

Resumo. Este artigo propõe um sistema de monitoramento subaquático composto de sensores distribuídos ao longo dos dutos de escoamento da produção de petróleo. A transmissão dos dados é realizada por modems acústicos instalados nos sensores subaquáticos e navios de suporte logístico da exploração de petróleo. No entanto, estes navios não estão ao alcance dos sensores todo o tempo, caracterizando uma rede DTN (Delay/Disruption Tolerant Network). Neste trabalho investigamos os protocolos de roteamento Epidemic e Prophet, analisando o sistema no simulador ONE (Opportunistic Network Environment simulator) e cenários da movimentação dos navios nas rotas marítimas estabelecidas na área de exploração de petróleo brasileira.

Abstract. This paper proposes an underwater monitoring system built with sensors distributed over the subsea pipelines responsible for transportation of oil production. Data transmission is undertaken by underwater acoustic modems installed on the sensors and vessels used for logistical support of oil exploration. However, the vessels may not be within sensor range all the time, requiring the use of DTN (Delay/Disruption e Tolerant Network). This work investigates the routing protocols Prophet and Epidemic, analyzing the system behavior in the ONE (Opportunistic Network Environment) simulator and scenarios vessels traffic in the Brazilian offshore oil exploration area.

1. Introdução

As últimas décadas no Brasil foram marcadas pela busca da auto-suficiência na produção de petróleo, que obteve sucesso graças a inúmeras descobertas na plataforma oceânica continental. As atividades desta indústria geram uma produção de gás e petróleo que é transportada por uma extensa malha de dutos submarinos que esta concentrada em uma grande área a 100 km da costa, com lâminas d'água variando de 60 até 1000 m.

A operação e manutenção desses dutos são extremamente complexas devido às condições severas do ambiente subaquático no Brasil, que em alguns pontos apresenta uma extrema inclinação, sujeitando essas estruturas a uma grande instabilidade. Assim,

a necessidade do monitoramento é constante, contudo a abordagem atual limita os pontos de observação excluindo do monitoramento toda parte subaquática dos dutos.

Uma alternativa é a utilização de redes subaquáticas de monitoramento que possibilitam a verificação das condições em toda extensão dos dutos submarinos. Todavia, a comunicação nesse ambiente está sujeita a várias limitações, acarretando perdas no canal de transmissão que 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 subaquático. 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.

Este trabalho propõe um sistema de monitoramento subaquático composto de sensores distribuídos ao longo dos dutos submarinos e navios de suporte logístico da exploração de petróleo. O objetivo é analisar a viabilidade e comportamento do sistema com os protocolos de roteamento Epidemic [Mundur e Seligman 2008] e Prophet [Lindgren et al. 2004] analisados no simulador ONE (*Opportunistic Network Environment simulator*) [Keränen et al. 2008], demonstrando que dentro de cenários coerentes com a movimentação *offshore* esses navios podem realizar a coleta dos dados dos sensores.

O restante deste artigo está organizado nas seguintes seções: a Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados e a Seção 3, as características da comunicação subaquática. A Seção 4 mostra o sistema de monitoramento subaquático proposto. Na Seção 5 mostramos como é a análise do sistema de monitoramento. A Seção 6 apresenta os resultados obtidos, enquanto a Seção 7 contém a conclusão e temas para trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Dentre os trabalhos sobre sistemas de monitoramento subaquático, a proposta de aquisição de dados de [Vasilescu et al. 2005] 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 [Penteado et al. 2010] é proposta uma rede de sensores para obtenção de dados oceanográficos para o monitoramento de correntes marítimas. Esta rede acústica é composta de sensores fixos que se comunicam com um sorvedouro que é responsável pela comunicação externa.

Uma análise sobre os problemas das redes de sensores subaquáticas é encontrada em [Liu et al. 2008]. 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. 2006], 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 em [Akyildiz et al. 2007]. 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.

Alguns protocolos de roteamento foram propostos para redes de sensores subaquáticos. Em [Pompili et al. 2006], os autores apresentam uma solução de roteamento para aplicações de monitoramento com a idéia de planejamento centralizado das rotas da rede. Na proposta apresentada por [Xie et al. 2006], é apresentada uma topologia baseada em grupo (*cluster*), onde cada nó em um grupo irá se comunicar com o nó *gateway*, que é responsável pela definição de todas as rotas da rede, gerenciando a descoberta de rotas através de mensagens de teste.

Algumas propostas baseadas em redes de sensores 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. Em [Zhang 2006], o autor analisa alguns protocolos propostos para as 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.

Em [Islam e Waldvogel 2008], os autores 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, em [Ribeiro et al. 2010] 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.

Diferentemente dos trabalhos apresentados até aqui, propõe-se a integração de sensores subaquáticos e nós móveis coletores em uma rede DTN. Assim, considera-se o estudo do sistema de monitoramento subaquático utilizando os protocolos de roteamento Epidemic e Prophet. Tanto quanto foi possível verificar, não existe na literatura uma abordagem de provimento de um sistema de monitoramento que seja específico para dutos submarinos e considere mobilidade e as restrições do ambiente subaquático.

3. Comunicação Subaquática

Embora a comunicação subaquática possa ser realizada através de ondas eletromagnéticas, ópticas e acústicas, 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 forma mais eficaz de implementar uma comunicação subaquática é através da comunicação acústica [Liu et al. 2008], mesmo com as limitações do canal acústico. A velocidade do som 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 de ser baixa, a velocidade do som na água é variável: depende da pressão (profundidade), densidade, temperatura e salinidade [Urick 1983]. A combinação destas dependências faz com que a velocidade do som na água varie desde a superfície até o fundo [Brekhovskikh e Lysanov 1991], propagando-se através de caminhos curvos, devido à refração causada por camadas com velocidades diferentes.

O sinal acústico é baseado em ondas mecânicas de compressões alternadas, necessitando grande potência para as transmissões. Assim, 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 o 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].

A alta latência do canal de comunicação dificulta o controle de acesso ao meio. Assim, algumas propostas como FDMA, CDMA e TDMA se tornaram alternativas para o meio subaquático, sendo o método TDMA (*Time Division Multiple Access*) o mais utilizado. Este método é realizado através de cessão cíclica de um *slot* de tempo para transmissão de cada nó na rede. Durante cada intervalo de tempo o canal está reservado para a transmissão de um único nó. Os intervalos de tempo devem ser separados entre si por um intervalo de guarda para evitar sobreposição de transmissões.

Atualmente os modems acústicos podem alcançar taxas de transmissão subaquática de 5 kbps. Neste caso, a distância entre os nós deve ser mantida até 5 km, pois em distâncias maiores, a largura de banda diminuirá, além de exigir mais potência, o que aumenta o gasto de energia do dispositivo. Assim, a quantidade de dados a ser transmitida deve ser compatível com a alta taxa de erro, alta latência e baixa taxa de transmissão e pequena em torno de 1 kbyte para obter uma taxa de sucesso maior, o que é viável para diversas aplicações.

4. Sistema de Monitoramento Subaquático

Como foi apresentado, a utilização de redes acústicas para o monitoramento no ambiente subaquático foi impulsionada pelos modems acústicos atuais que proporcionaram o aumento do alcance para 5 km e taxas de transmissão de 5 kbps. Portanto, tornou-se viável utilizar sensores acústicos subaquáticos, que agora podem ser instalados ao longo dos dutos submarinos para o monitoramento de pressão, temperatura, vazão e controle de posicionamento. Esta última opção teria aplicação especialmente importante no acompanhamento da movimentação durante o lançamento de novas linhas de dutos submarinos [Solano et al. 2007].

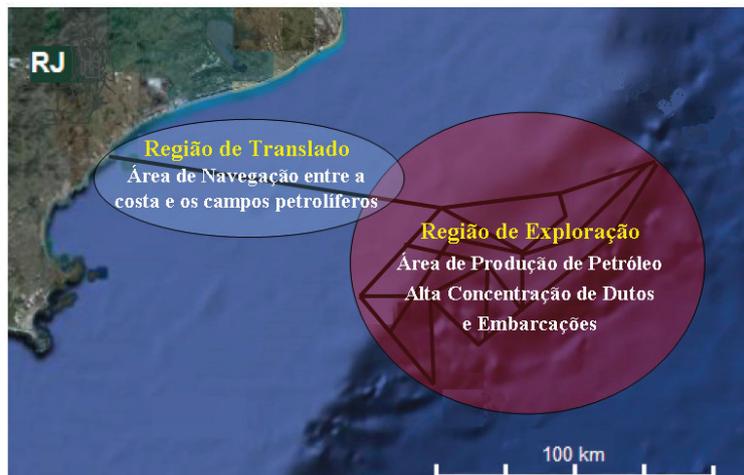


Figura 1. Áreas de navegação da frota de embarcações *offshore*.

Na Baía de Campos a área que deve ser monitorada é de aproximadamente 62.500 km² e pode ser dividida em duas regiões bem distintas chamadas de translado e de exploração (Figura 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, onde se encontram os oleodutos que interligam as unidades de bombeio da costa e *offshore*. Já a região de exploração é uma área onde estão os campos de produção de petróleo, que é permeada por uma extensa malha de dutos que interligam várias unidades de produção e onde um grande número de navios realiza a distribuição de recursos, executando uma rotina de abastecimento das unidades e ancoragem.

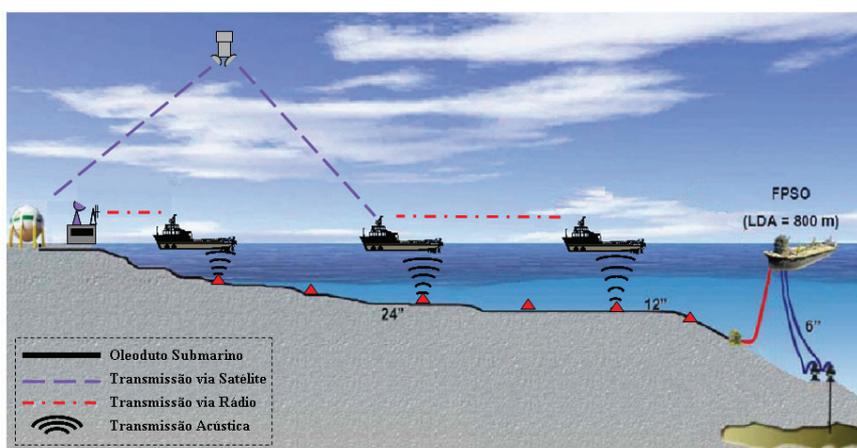


Figura 2. Sistema de monitoramento subaquático.

Como as rotas dos navios são coincidentes aos dutos submarinos e possuem sistemas de comunicação via rádio, e em muitos casos, via satélite, tornam-se a opção mais adequada para a captação dos dados. As informações são geradas e armazenadas nos sensores até que alguma embarcação esteja disponível para captação das mensagens, conforme a Figura 2.

A grande abrangência e dispersão das instalações marítimas influenciam a densidade das embarcações ao alcance dos sensores. Assim, estes navios não podem estar ao alcance dos sensores todo o tempo, impossibilitando a utilização de uma arquitetura de rede convencional. Neste caso, a utilização de uma arquitetura de comunicação subaquática baseada em redes tolerantes a atrasos e a interrupções se encaixa perfeitamente no modelo de encaminhamento das mensagens nó a nó, sem o estabelecimento de um caminho fim a fim.

4.1. Rede de Sensores Subaquática

A rede de sensores subaquática baseia-se em nós equipados com sensores e modems acústicos [Vasilescu et al. 2005]. 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 [Akiyldiz et al. 2007]. 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.

No caso proposto a rede de sensores 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 para o centro de controle. Cada uma dessas amostras é codificada em um pacote de dados, geralmente com menos 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].

4.2. 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. O controle da comunicação é feito pelos dispositivos de origem (sensores acústicos), sendo responsável por determinar a forma de comunicação que melhor utilize os seus recursos. Os sensores e os nós acústicos devem ter capacidade de oferecer armazenamento das mensagens, o que pode ser assegurado com a utilização da camada de agregação e unidades de armazenamento utilizadas na arquitetura de redes tolerantes a atrasos e desconexões [Cerf et al. 2007].

A rede DTN é composta pelos domínios subaquático e não subaquático. No domínio subaquático, haverá sensores acústicos fixos gerando mensagens que serão captadas por nós acústicos móveis. Essas mensagens serão encaminhadas na rede DTN, passando do domínio subaquático para o não subaquático, até alcançar o destino situado em uma rede externa, conforme apresentado na Figura 3.

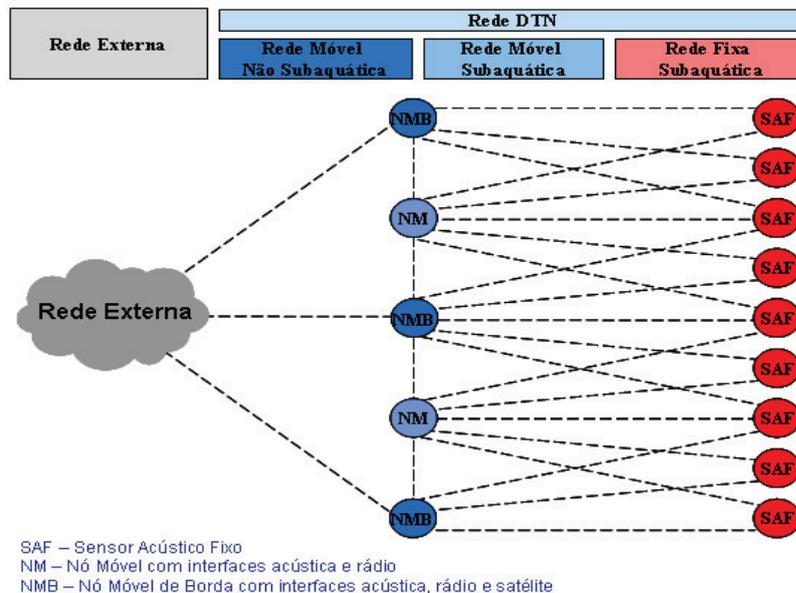


Figura 3. Comunicação entre os nós móveis e sensores fixos.

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.

Na rede DTN é preciso encaminhar as mensagens sem o estabelecimento de um caminho fim-a-fim. Essa característica está relacionada aos atrasos e às desconexões existentes [Oliveira e Duarte, 2007]. No ambiente subaquático, essas condições são provocadas pelas constantes mudanças no meio acústico [Penteado et al. 2010], por interferência, pela hibernação dos sensores para poupar energia ou pelas condições marítimas de navegação que afetam a operação do nó móvel.

Neste modelo, os nós móveis são entidades presentes na rede DTN, que serão usadas para captar as mensagens armazenadas nos sensores. Todo tráfego deve passar por esses nós antes de sair do domínio subaquático, sendo o número desses dispositivos dependente das rotas de navegação dos navios. Os nós poderão ter dois tipos de função: a coleta de mensagens dos sensores fixos no domínio subaquático e a retransmissão dessas mensagens através do domínio não subaquático. Em alguns casos, os nós móveis serão denominados de borda, por serem responsáveis também pelo encaminhamento das mensagens para a rede externa (Figura 3).

O protocolo de roteamento responsável pela determinação de qual nó móvel encaminhará as mensagens dos sensores pode ser baseado tanto no protocolo Epidemic como no protocolo Prophet. Assim, poderá ser possível verificar qual destes protocolos melhor se adapta as condições do sistema de monitoramento.

5. Procedimento de Análise

Para analisar o sistema de monitoramento aqui apresentado, foi realizado um conjunto de simulações, para verificar a comunicação através da movimentação dos navios nas diversas rotas marítimas nas regiões de traslado e de exploração. O objetivo é mostrar o comportamento da rede em cada cenário, para justificar a viabilidade de comunicação do sistema com a utilização da frota de embarcações de suporte logístico da exploração de petróleo.

Para avaliar e comparar o desempenho do sistema de monitoração com diferentes algoritmos de roteamento foi utilizado o simulador ONE [Keränen et al. 2009]. O ONE utiliza um modelo de comunicação tolerante a atrasos e interrupções, onde os nós realizam o recebimento, armazenagem e encaminhamento das mensagens, que se necessário podem ficar armazenadas nos buffers.

5.1. Cenário

Por considerar o deslocamento em uma região marítima, o cenário utiliza o mapa da área de exploração da Bacia de Campos no Estado do Rio de Janeiro e as rotas procuram seguir as rotas marítimas utilizadas pelas embarcações, a fim de obter um cenário mais realista possível. Foi utilizado o padrão de mobilidade “*Shortest Path Map Based Movement*”, onde os nós usam o algoritmo de Dijkstra para encontrar o menor caminho até os destinos selecionados aleatoriamente, através das rotas disponíveis.

Como as rotas dos navios são em grande parte coincidentes com os dutos submarinos nas duas regiões, as simulações consideraram uma rede móvel, com 25 sensores e até 200 nós móveis (navios), além de um centro de controle fora da rede DTN. Os nós móveis são distribuídos pela rede de forma aleatória e deslocam-se de acordo o modelo de mobilidade. Os nós participam de dois grupos, que representam os tipos de embarcações de apoio logístico de acordo com o tipo disponível de comunicação (satélite ou rádio). 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 semi-submersíveis e FPSOs - *Floating Production Storage and Offloading*), permanecendo ancoradas em pontos determinados a espera de novos planos de operação.

A definição do número de navios na simulação foi baseada na apresentação do plano de negócio da Petrobras 2010 – 2014 [Gabielli e Barbassa 2010] onde pode ser observado o panorama atual da Petrobras contando com 254 navios e com a perspectiva de alcançar a marca de 465 navios em 2013. Como a Bacia de Campos atualmente trabalha com quase 80% da frota de navios da Petrobras, optou-se por utilizar este número nas simulações.

Os parâmetros da simulação foram definidos seguindo a movimentação das embarcações e as características da transmissão acústica e rádio:

- Área de 250 x 250 km englobando as regiões de traslado e de exploração;
- Os pontos de interesse são 48 na região de exploração representando as unidades de produção, não existindo na região de traslado;
- O número de nós móveis foi definido respeitando um cenário real, variando de 1 até 200 navios;
- A velocidade dos navios pode variar entre 10 e 25 km/h¹;
- O alcance foi definido como 5 km para a conexão subaquática e 20 km para conexão via rádio. A conexão é realizada somente se o sensor e nó móvel ou os dois nós móveis estiverem no respectivo raio de transmissão;
- A velocidade de transmissão dos dados foi 5 kbps para conexão acústica e 20 kbps para conexão via rádio VHF;
- O *buffer* de mensagens foi definido como 10 MB respeitando as características dos modems acústicos;
- Os tamanhos das mensagens são de 1 kbyte e 2 kbytes;
- O período de simulação foi de 24 horas.

As mensagens foram geradas com distribuição uniforme entre 60 e 300 s e com tamanho entre 1 kbyte e 2 kbytes, podendo representar a troca de arquivos de texto com informações de vazão, pressão e temperatura coletadas dos dutos submarinos.

Como os dutos submarinos apresentam pequenas variações do posicionamento devido à influência das correntes marítimas, foi necessário modelar uma movimentação lenta nos sensores chegando a 100 m em alguns casos.

6. Resultados Obtidos

O sistema de monitoramento deve equilibrar a disponibilidade da rede com a utilização de recursos dos sensores. Entretanto, o monitoramento também pode ter impacto na quantidade de informação e mensagens geradas. Verificou-se que o número de mensagens encaminhadas é muito inferior a capacidade da rede.

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

- Embarcações na Região de Transição: 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.

¹ As especificações dos navios foram obtidas no *site* <http://www.maersksupplyservice.com>.

A cada simulação, foi possível verificar a capacidade dos navios em alcançar os sensores e captar as mensagens, bem como verificar a porcentagem dos sensores contatados, como apresentado da Figura 5.

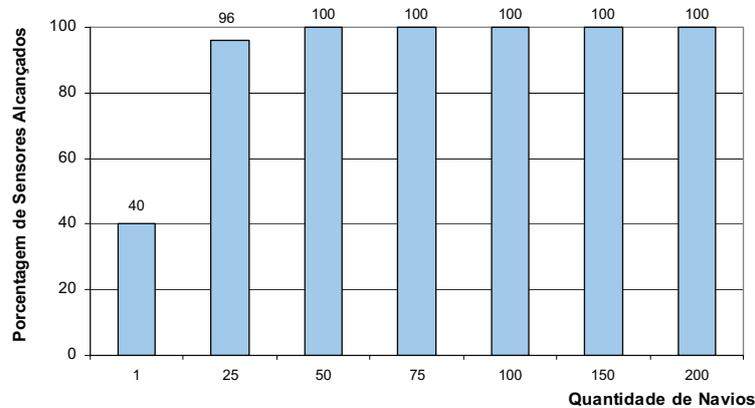


Figura 5. Porcentagem de sensores alcançados.

Pode-se observar que o sistema, mesmo contando com poucos navios, alcançou grande parte dos sensores, devido à coincidência das rotas marítimas com os dutos submarinos. Já o alcance de 100% dos sensores só ocorreu a partir do cenário com 50 navios. Isto se dá pela grande área simulada e dispersão dos sensores.

Outro dado importante apresentado na Figura 6(a) é o número de contatos realizados por hora. Essa informação mostra a evolução dos contatos com os números de navios na rede e tem relação com os tempos médios de espera nos sensores para o encaminhamento das mensagens apresentado na Figura 6(b). Esse tempo é fundamental para definir que tipo de monitoramento pode-se realizar com o número de navios disponíveis no sistema. O monitoramento da posição dos dutos é um exemplo típico, pois varia pouco em um dia e pode ser implementado a partir de 25 navios na rede. Neste cenário, os dados dos sensores são coletados em média a cada 735 min ou 12 h e 15 min. Outro caso observado é o patamar necessário para o monitoramento de vazão, temperatura e pressão que é alcançado a partir de 150 navios com 29 min em média de intervalo de espera.

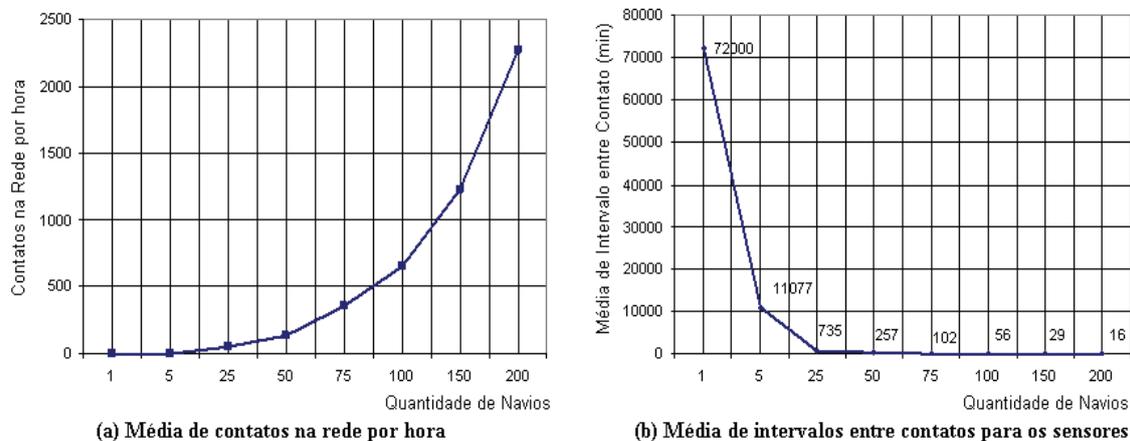


Figura 6. Contatos na rede e tempos médios para envio das mensagens.

Os resultados obtidos do sistema de monitoramento em relação a movimentação dos navios mostrados na Figura 6, não variam com a utilização dos protocolos Epidemic e Prophet. Esses protocolos têm influência na probabilidade de entrega e latência das mensagens na rede, que é medida a partir da transmissão da mensagem pelo sensor, conforme apresentado na Figura 7.

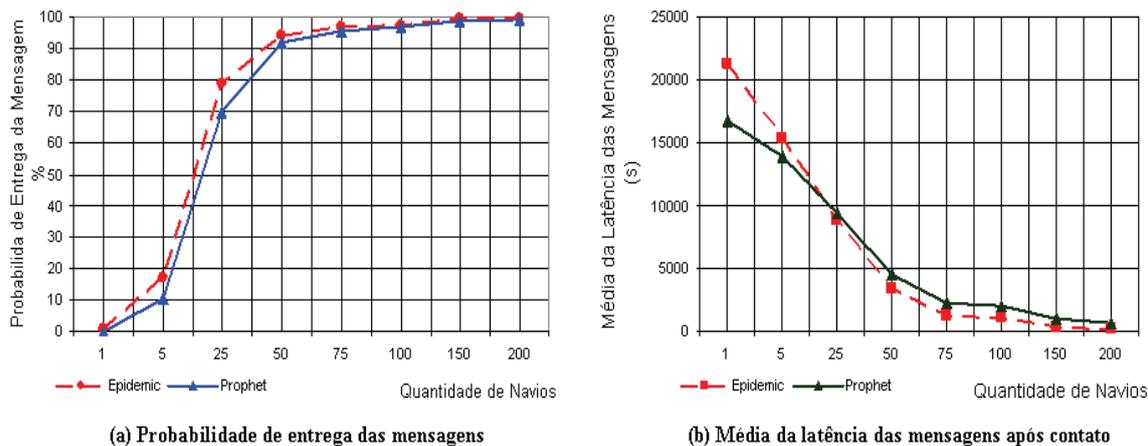


Figura 7. Probabilidade de entrega e latência das mensagens na rede com os protocolos Epidemic e Prophet.

Os algoritmos dos protocolos Epidemic e Prophet apresentaram probabilidade de entrega de mensagens crescente e latência na rede decrescente em relação ao número de navios. Isso ocorre devido ao aumento de mensagens transmitidas na rede, o que pode acarretar descarte nos *buffers*. Entretanto, um sensor pode guardar uma mensagem por aproximadamente 20 horas, 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.

A probabilidade de entrega da rede com uso dos protocolos Epidemic e Prophet apresentou comportamento similar, sendo o desempenho do protocolo Epidemic maior nos cenários com menos navios. Isso é cada vez melhor, de acordo com a Figura 7(a), 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.

Conforme apresentado na Figura 7(b), o protocolo Prophet obteve latências menores em comparação ao Epidemic nos cenários com poucos navios devido ao menor número de mensagens na rede. Essa situação se inverte a partir do cenário com 25 navios. Neste caso, mesmo utilizando a inundação da rede, o protocolo Epidemic obtém latências menores por causa da quantidade maior de nós ao alcance dos sensores, fazendo com que as mensagens sejam entregues mais rapidamente.

O comportamento geral do sistema com relação à movimentação dos navios foi satisfatório, apresentando resultados que demonstram a viabilidade da utilização da frota de navios de suporte logístico no monitoramento subaquático na área de exploração de petróleo da Bacia de Campos.

7. Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi proposto um sistema de monitoramento de dutos submarinos, em uma rede tolerante a atrasos e interrupções, tendo como objetivo a verificação da viabilidade e o estudo do comportamento do sistema com os protocolos Epidemic e Prophet. Foi analisado o sistema através de um modelo de mobilidade baseado em cenários reais na área de exploração de petróleo brasileira. O sistema se mostrou viável, visto que o aumento do número de navios contribuiu para o aumento da periodicidade de envio de mensagens dos sensores e diminuição da latência na rede.

Os protocolos Epidemic e o Prophet apresentaram resultados similares, tendo pequena variação 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 traslado e exploração [Ribeiro et al. 2010], pode obter resultados melhores a fim de diminuir os tempos de coleta das mensagens dos sensores.

Apesar da conectividade imprevisível nessas situações, verificou-se que poucos navios são necessários para implementar o monitoramento de aplicações que tolerem um período de amostragem maior. Outra característica importante é a varredura de todos os sensores, alcançada com a utilização de um número de navios coerente com o cenário encontrado na Baía de Campos no Estado do Rio de Janeiro.

Como trabalho futuro, pretende-se simular no ONE um protocolo híbrido contendo características dos algoritmos Epidemic e o Prophet. Este protocolo poderá escolher o modo de operação que melhor encaminhe as mensagens a fim de aumentar o desempenho do sistema de monitoramento.

Referências

- Fall, K. (2004). Messaging in difficult environments. Intel Research Berkeley.
- Cerf, V., Burleigh, S., Hooke, A., Torgerson, L., Durst, R., Scott, K., Fall, K. e Weiss, H. (2007). Delay-Tolerant Networking Architecture. RFC 4838, DTN Research Group.
- Mundur, P. e Seligman, M. (2008). Delay tolerant network routing: Beyond epidemic routing. *Wireless Pervasive Computing*. Em 3rd International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC), Grécia.
- Lindgren, A., Doria, A. e Schelén, O. (2004). Probabilistic Routing in Intermittently Connected Networks. Em *International Workshop on Service Assurance with Partial and Intermittent Resources (SAPIR)* vol. 7, Springer.
- Keränen, A., Ott J. e Kärkkäinen, T. (2009). The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation. Em 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques.
- Vasilescu, I., Kotay, K., Rus, D., Dunbabin, M. e Corke, P. (2005). Data collection, storage, and retrieval with an Underwater Sensor Network. Em *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*.
- Penteadó, D., Costa, L. H. M. K e Pedroza, A. C. P. (2010). Deep-ocean Data Acquisition Using Underwater Sensor Networks. Em *The International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE)*.

- Liu, L., Zhou, S., e Cui, J. (2008). Prospects and Problems of Wireless Communication for Underwater Sensor Networks. Em *Wiley Wireless Communications and Mobile Computing, Special Issue on Underwater Sensor Networks*, vol. 8, no. 8, pp. 977-994.
- Heidemann, J., Ye, W., Wills, J., Syed, A. e Li, Y. (2006). Research challenges and applications for underwater sensor networking. Em *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*.
- Akyildiz, I. F., Pompili, D., e Melodia, T. (2007). State of the art in protocol research for underwater acoustic sensor networks. Em *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, vol. 11, no. 4, pp. 11–22.
- Pompili, D., Melodia, T. e Akyildiz, I. F. (2006). A Resilient Routing Algorithm for Long-term Applications in Underwater Sensor Networks. Em *Proceedings of the 5th Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)*, Itália.
- Xie, G., Gibson J. e Diaz-Gonzalez L. (2006). Incorporating Realistic Acoustic Propagation Models in Simulation of Underwater Acoustic Networks: A Statistical Approach. Em *OCEANS 2006*.
- Zhang, Z. (2006). Routing in Intermittently Connected Mobile Ad Hoc Networks and Delay Tolerant Networks: Overview and Challenges. Em *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 8, pp. 24-37.
- Islam, A. e Waldvogel, M. (2008). Reality-Check for DTN Routing Algorithms. Em *28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*.
- Ribeiro, F. J. L., Pedroza, A. C. P. e Costa, L. H. M. K. (2010). Protocolo de Roteamento para Sistemas Subaquáticos de Comunicação. Em *9th International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS)*.
- Urick, R. (1983). *Principles of Underwater Sound*. McGraw-Hill.
- Brekhovskikh, L. M. e Lysanov, Y. P. (1991). *Fundamentals of Ocean Acoustics*. Springer-Verlag, 2ª edição.
- Stojanovic, M. (2006). On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic channel. Em *1st ACM International Workshop on Underwater Networks (WUWNet)*.
- Solano, R. F., Genaió, M. C. Ayres, A. e Cezar, G. S. (2007). Design and Installation Challenges of Jubarte Gas Pipeline in the Shore Approach Area. Em *The International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE)*.
- Guo, Y., Kong, F., Zhu, D., Tosun, A. e Quingxu, D. (2010). Sensor Placement for Lifetime Maximization in Monitoring Oil Pipeline. Em *Proceedings of 1st ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems*.
- Oliveira, C. T. e Duarte, O. C. M. B (2007). Uma Análise da Probabilidade de Entrega de Mensagens em Redes Tolerantes a Atrasos e Desconexões. Em *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*.
- Gabrielli, J. S. e Barbassa A. (2010). Plano de Negócios 2010 – 2014. <http://www.petrobras.com.br/ri/Download.aspx?id=10930>, Agosto.