

# Protocolo de Roteamento para Sistemas Subaquáticos de Comunicação

Fabrcio Jorge Lopes Ribeiro<sup>1,2</sup>, Aloysio de Castro P. Pedroza<sup>1</sup>, Luís Henrique M. K. Costa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UFRJ - PEE/COPPE/GTA - DEL/POLI

<sup>2</sup> PETROBRAS – PETRÓLEO BRASILEIRO S.A.  
{fabriciojorge, aloysio, luish}@gta.ufrj.br

**Resumo--** Este artigo apresenta um protocolo de roteamento para Sistemas Subaquáticos de Comunicação baseados em redes acústicas. A modelagem em PROMELA do protocolo proposto foi simulada com a ferramenta SPIN. Este protocolo é parte integrante da camada de rede da arquitetura de um sistema de comunicação subaquático, que provê mecanismos tolerantes a atrasos e interrupções. Os mecanismos do protocolo em estudo são empregados originalmente em redes DTN (*Delay Tolerant Networking*), que foram modificados para atender os requisitos utilizados para definir a melhor entrega das mensagens neste ambiente. A arquitetura utilizada para a implementação destes protocolos tem suas premissas definidas no IETF.

**Abstract--** This paper presents a study of a routing protocol for Underwater Communication Systems based on underwater networks. The modeling in PROMELA of the proposed protocol was simulated with the SPIN tool. This protocol is part of the network layer of the architecture of an underwater communication system, which provides delay tolerant mechanisms. The mechanisms of the protocol in study are used originally in DTN (*Delay Tolerant Networking*) and have been modified to meet the requirements that define the best delivery of messages. The architecture used in this implementation is well defined in the IETF.

**Index Terms—** Underwater Communications, Sensor Networks, DTN, Routing, Protocols, Specification languages.

## I. INTRODUÇÃO

Uma vez que a comunicação subaquática pode trazer grandes possibilidades de aplicações para a exploração de petróleo em águas profundas, espera-se que a arquitetura de comunicação estenda-se além da automação e abranja também uma ampla gama de utilização, como o posicionamento subaquático e o monitoramento de recursos e logísticas.

A crescente demanda por atividades *offshore* aponta para uma ampla utilização da comunicação acústica subaquática. Entretanto, a grande variação das condições do ambiente, a alta restrição de consumo de energia, a limitação de largura de banda e a baixa capacidade de processamento dos dispositivos devem ser considerados neste modelo de comunicação, garantindo a troca de informações acústicas de forma eficaz.

A implementação de sistemas subaquáticos de comunicação vem evoluindo com o surgimento de novas soluções, que proporcionam um melhor aproveitamento dos

recursos da rede. O comportamento dos sistemas distribuídos é influenciado pela complexidade de interação entre os processos de comunicação que cooperaram entre si sob limitações do ambiente. A complexidade destes sistemas aumenta quando executam em meios de transmissão com grande variabilidade [1]. Esta característica também é influenciada pelas interferências que podem ocorrer durante a troca de mensagens no canal acústico. Por este motivo, estudos têm sido feitos no intuito de se desenvolver sistemas tolerantes a falhas e à interferência, ou seja, que provejam serviços confiáveis apesar da ocorrência destas situações.

O desenvolvimento de um modelo padrão para protocolos que interajam em redes subaquáticas pode ser baseado na arquitetura de redes tolerantes a atrasos e interrupções [2], de forma a garantir às redes acústicas subaquáticas a adequação necessária às principais limitações deste ambiente. Assim, redes DTN são perfeitamente adequadas a estas limitações, sendo compatíveis com a banda disponibilizada e possuindo mecanismos que anulam os efeitos da alta vulnerabilidade a interferências e à variabilidade do meio subaquático.

Nesse sentido, foi definida uma arquitetura de comunicação baseada em redes DTN que se adequasse às características dos sistemas acústicos subaquáticos. A especificação dos processos de comunicação modelados para a verificação do comportamento do sistema, permitiu a implementação do protocolo sem ambiguidade, precisa e completa. Desta forma, nossa abordagem consiste em apresentar um modelo de comunicação subaquática através do estudo de um protocolo de roteamento em uma rede DTN, utilizando técnicas de descrição formal baseadas na linguagem PROMELA [3], e com a análise do comportamento pela ferramenta SPIN [4].

O restante deste artigo está organizado nas seguintes seções: a seção 2, apresenta o modelo de comunicação subaquática proposto. A seção 3 mostra como é aplicada a técnica de descrição formal no protocolo, apresentando uma visão geral da linguagem PROMELA e da ferramenta de análise SPIN. Na seção 4, mostramos como é a análise do protocolo. A seção 5 apresenta os resultados obtidos, enquanto a seção 6 contém a conclusão e temas para trabalhos futuros.

## II. MODELO DE COMUNICAÇÃO SUBAQUÁTICA

As perspectivas de utilização de redes acústicas em ambientes subaquáticos sofreram um grande impulso com a utilização das novas técnicas de modulação acústica que viabilizaram o aumento do alcance com uma taxa de transmissão compatível ao volume de tráfego necessário a várias aplicações que utilizam sensores, principalmente no ambiente de exploração de petróleo *offshore*.

Apesar das várias limitações existentes nos sensores acústicos subaquáticos, como consumo de energia e potência de transmissão [5]. Estudos recentes mostraram que aplicações que necessitam de taxa de transmissão de até 5 kbps [6], com alcance variando em 5 km, podem ser viáveis no ambiente subaquático, garantindo a utilização deste tipo de comunicação para o monitoramento de oleodutos e gasodutos submarinos.

A dispersão das instalações, aliada à grande área de abrangência da exploração de petróleo *offshore*, são grandes limitadores que influenciam na densidade de dispositivos ao alcance dos sensores acústicos, tornando inviável a utilização de uma arquitetura de rede convencional. Neste sentido, a proposta de utilização de uma arquitetura de comunicação subaquática baseada em redes tolerantes a atrasos e a interrupções se encaixa perfeitamente neste contexto devido ao seu modelo de encaminhamento das mensagens nó a nó, sem o estabelecimento de um caminho fim a fim.

O modelo de comunicação proposto neste estudo utiliza sensores acústicos subaquáticos fixos que poderiam ser instalados ao longo dos dutos submarinos para o monitoramento de pressão, temperatura e vazão além do controle de posicionamento, que atualmente não são encontradas no ambiente subaquático. Esta última opção teria aplicação especialmente importante no lançamento de novas linhas de dutos submarinos [7].

As informações seriam geradas e armazenadas nos sensores acústicos até que algum nó acústico móvel estivesse disponível para captação das mensagens armazenadas. Os nós acústicos móveis seriam instalados em embarcações responsáveis pela logística da exploração de petróleo, conforme a figura 1.

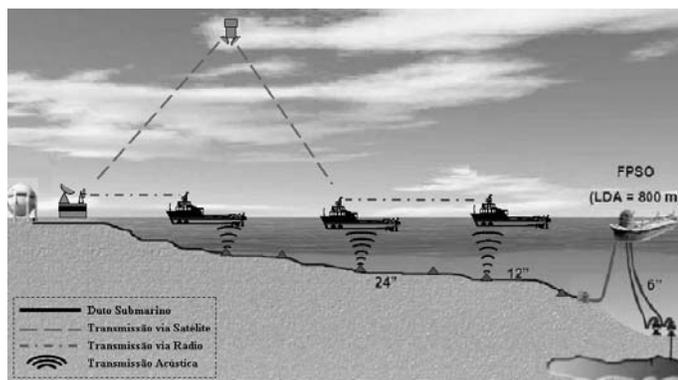


Fig. 1. Modelo de comunicação.

As rotas de navegação estabelecidas para estas embarcações são, em grande parte, as mesmas rotas dos dutos submarinos (vide figura 2), o que facilitaria o estabelecimento de comunicação entre os sensores acústicos e os nós acústicos móveis no trecho entre a costa e os campos de produção de petróleo. Na área dos campos de produção a densidade de dutos submarinos e de embarcações em trânsito e ancoradas aumenta consideravelmente, possibilitando um maior número de nós acústicos móveis ao alcance dos sensores acústicos.

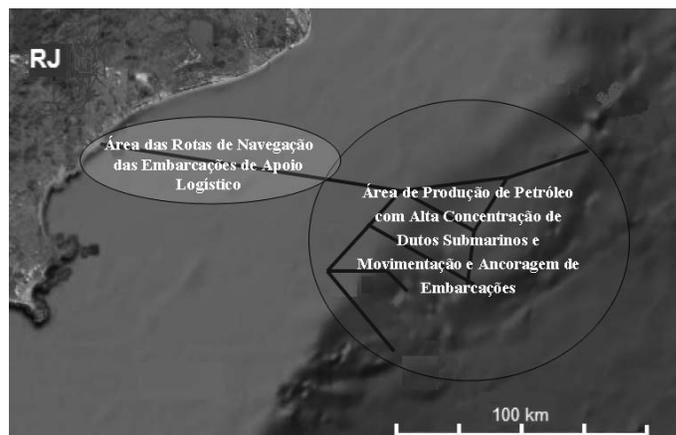


Fig. 2. Áreas de navegação da frota de embarcações *offshore*.

As embarcações possuem sistemas de comunicação via rádio, e em muitos casos, via satélite, o que as torna a opção mais adequada para instalação dos nós acústicos, que seriam responsáveis por captar as mensagens armazenadas nos sensores acústicos fixos.

### A. Arquitetura da Comunicação Subaquática

A arquitetura utilizada nestas redes acústicas subaquáticas pode conter um protocolo de roteamento que interprete as condições de comunicação da rede, adaptando-se, naquele momento, aos recursos disponíveis. Portanto a variação da quantidade de nós móveis ao alcance de cada sensor acústico pode ser utilizada como parâmetro de definição do modo de operação do protocolo. Assim, nos casos em que o número de nós móveis seja esparsos, torna-se necessário que o protocolo de roteamento estabeleça mecanismos que garantam a transmissão das mensagens para todos os nós acústicos móveis, mesmo que desse procedimento resultem duplicações. Já nos casos de alta densidade de nós acústicos móveis o protocolo poderá, de certa forma, verificar a maior probabilidade de entrega das mensagens no destino antes de definir o encaminhamento, o que ocasionaria uma maior economia de recursos dos sensores acústicos subaquáticos [8].

A falta de abordagens para estabelecimento de comunicação neste ambiente reflete a dificuldade de padronização dos mecanismos de transmissão em redes subaquáticas [9]. Isso não foi tratado como um grande problema, pois os sistemas anteriores não contavam com uma arquitetura bem definida e formas confiáveis de transmissão.

Agora, com a introdução de novas técnicas de modulação acústica [6], foi possível o desenvolvimento de uma arquitetura viável para aplicações específicas voltadas ao ambiente subaquático. Essa arquitetura trabalha através de domínios de comunicação que são definidos pelo tipo de comunicação, associado à movimentação ou não do dispositivo. O controle da comunicação é determinado 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 interrupções.

Na arquitetura proposta, haverá uma rede DTN 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.

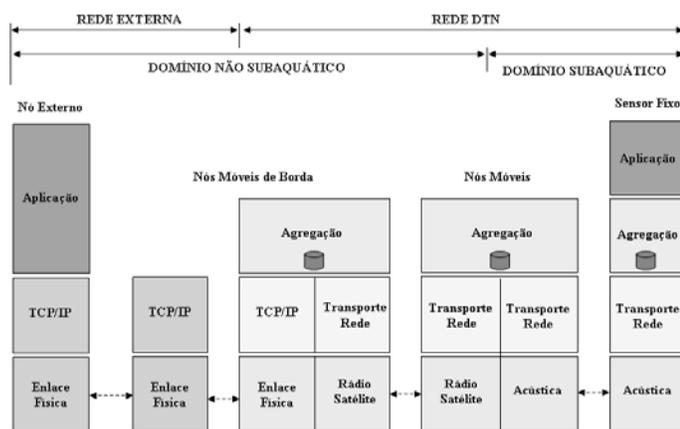


Fig. 3. Arquitetura proposta para o sistema de comunicação subaquático.

### B. Rede DTN

Em uma 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 nestas redes [10]. A rede DTN foi criada para assegurar a comunicação mesmo em condições extremas de comunicação, que podem ocorrer por várias razões dependendo do meio de comunicação. No ambiente subaquático, essas condições são provocadas pelas constantes mudanças no meio acústico [5], por interferência, pela hibernação dos sensores acústicos para poupar energia ou pelas condições marítimas de navegação que afetam a operação do nó móvel acústico.

A utilização de uma rede DTN no modelo subaquático de

comunicação foi baseada no fato dos sensores acústicos não poderem estar conectados permanentemente aos nós acústicos móveis, seja devido ao gasto de energia ou pela ausência de nós móveis. Essas condições fazem com que o caminho entre a origem e o destino nunca chegue a ficar completamente conectado.

Neste modelo, os nós acústicos móveis são entidades presentes na rede DTN [11], que serão usadas para captar as mensagens armazenadas nos sensores acústicos. Todo tráfego deve passar por esses nós antes de sair do domínio subaquático, sendo o número desses dispositivos dependente das rotas de navegação dos nós móveis. Esses 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 (vide figura 4).

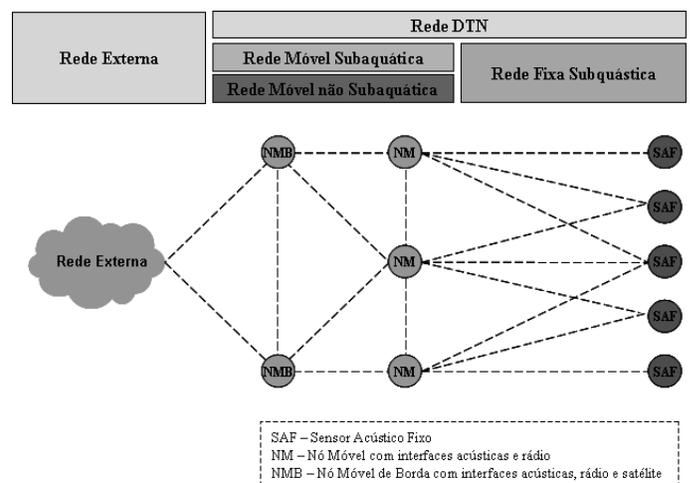


Fig. 4. Modelo de comunicação entre os nós móveis e sensores fixos.

O protocolo de roteamento responsável pela determinação de qual nó móvel encaminhará as mensagens dos sensores foi criado a partir dos mecanismos básicos dos protocolos Epidemic [12] e Prophet [13]. Assim, foi possível estabelecer um processo de decisão vinculado à densidade de nós móveis disponíveis para cada sensor acústico subaquático. Sendo assim, o protocolo tem como objetivo principal negociar, estabelecer e assegurar o melhor tipo de entrega das mensagens no seu destino, através de dois modos de operação, denominados esparsos e densos.

O modo esparsos é utilizado quando o sensor acústico tem ao seu alcance uma baixa densidade de nós acústicos móveis. Nesse modo de operação, o protocolo de roteamento trabalha em baixa complexidade, transmitindo o menor número de mensagens possível e encaminhando as mensagens armazenadas nos sensores acústicos a todos os nós acústicos móveis disponíveis. Os mecanismos neste modo de operação são baseados no protocolo Epidemic [12] e visam simplificar

o envio das mensagens, economizando os recursos do sensor acústico. Estes mecanismos também serão utilizados quando houver somente uma rota, sendo responsáveis por encaminhar a mensagem, mas sem duplicidade na rede.

O modo denso é utilizado quando a densidade de nós acústicos móveis for alta, permitindo o uso de mecanismos do protocolo Prophet [14], que utiliza as informações sobre a movimentação dos nós acústicos móveis para determinar um único nó que terá maior probabilidade de entrega da mensagem ao destino. Esse processo visa eliminar a duplicação de mensagens na rede. Nesse caso, se fossem utilizados os mecanismos do protocolo Epidemic, os recursos dos sensores seriam gastos nas retransmissões da mensagem.

Na área compreendida entre a costa até os campos petrolíferos haverá uma baixa densidade de nós acústicos móveis, devido à característica de deslocamento e tamanho da frota de embarcações, o que provavelmente, levará o protocolo a trabalhar na maioria das vezes em modo esparso, diminuindo o número de transmissões realizadas pelo sensor acústico. Entretanto este cenário muda na área dos campos de produção de petróleo, onde é encontrada grande movimentação e ancoragem de embarcações e unidades de produção (plataformas fixas, plataformas submersíveis e FPSOs), o que possibilita obter ganhos com a utilização do protocolo de roteamento em modo denso, evitando retransmissões desnecessárias da mesma mensagem.

Nos cenários apresentados (vide figura 2), pode-se verificar que a utilização deste protocolo com a operação em modo esparso e denso, apresentará ganhos na economia de recursos dos sensores acústicos. Assim, a proposta do protocolo de roteamento que agregue estas duas funcionalidades apresentase como uma alternativa adequada ao modelo de comunicação subaquático apresentado.

### III. FORMALIZAÇÃO NA COMUNICAÇÃO SUBAQUÁTICA

A robustez das comunicações é a característica vital que deve ser encontrada em redes de comunicação subaquáticas. Essa característica é diretamente influenciada pelo meio de transmissão. Assim, é necessário levar em consideração os canais de comunicação na especificação desses sistemas, que devido às restrições de largura de banda e à alta interferência, torna-se desfavorável, sujeitando as mensagens a perdas e a duplicações durante a comunicação.

Atualmente, o uso de ferramentas que se baseiam em métodos formais tem sido mais frequente devido à possibilidade de garantia de correção de sistemas de comunicação concorrentes e suas aplicações. Esses métodos permitem a representação de sistemas através de um modelo com sintaxe e semântica bem definidas. Portanto, podem ser utilizados como uma ferramenta para especificar modelos de forma precisa e, conseqüentemente permitem a verificação formal do comportamento do sistema.

A análise do comportamento dos mecanismos do protocolo

proposto deve estar de acordo com os requisitos determinados pelo sistema. O processo de análise formal está adequado ao esforço de atestar o funcionamento deste protocolo durante a comunicação acústica subaquática. A especificação do protocolo com o conceito de entidades robustas e não robustas torna-se viável devido à flexibilidade da especificação em PROMELA (*Process Meta Language*) [3] e da análise da ferramenta SPIN (*Simple Promela Interpreter*) [4].

O SPIN oferece um conjunto integrado de funcionalidades, que vão da simulação interativa até a verificação baseada em modelos. Esse processo pode ser visualizado na figura 5.

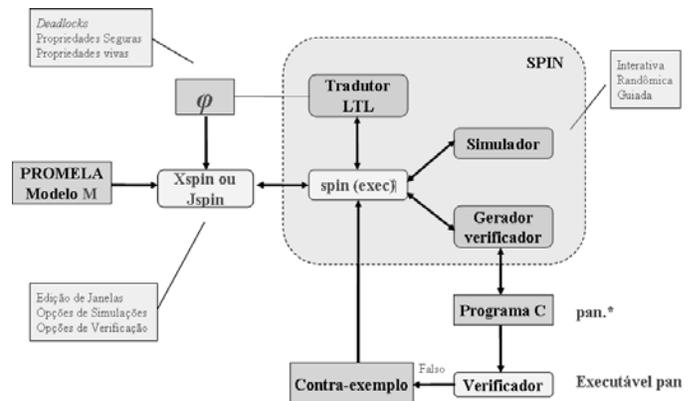


Fig. 5. Processo de análise empregando a ferramenta SPIN.

PROMELA é uma linguagem de modelagem que descreve sistemas concorrentes e permite a criação de modelos dinâmicos, que apresentam o comportamento dos protocolos de comunicação via canais de mensagens utilizando processos que se comunicam através de variáveis compartilhadas e/ou mensagens síncronas ou assíncronas [15]. O foco da linguagem PROMELA é a interação entre processos através de sintaxes e operadores de especificação baseados em linguagem C. Programas em PROMELA são formados por processos (globais), canais (globais ou locais) e variáveis (globais ou locais). Processos modelam o comportamento enquanto canais e variáveis globais modelam o ambiente nos quais os processos irão executar.

O SPIN é um ambiente que oferece um conjunto integrado de funcionalidades, que vão da simulação interativa até a verificação de modelos, bastante utilizada no desenvolvimento de aplicações distribuídas e projetos de protocolos.

Para ilustrar como poderão ser analisadas as garantias do comportamento, foi assumido que, com as definições de características das redes de sensores [16], pode-se modelar o protocolo de roteamento proposto, viabilizando a comunicação entre nós acústicos móveis e sensores acústicos em uma rede tolerante a atrasos e interrupções modelada para o ambiente subaquático. A comunicação será modelada através dos mecanismos do protocolo proposto, que são baseados nos protocolos Epidemic e Prophet, visando a verificação do correto comportamento.

#### IV. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE

Em muitos trabalhos de análise de protocolos em ambientes acústicos, onde o comportamento é testado, a verificação inicia-se justamente durante o processo de estabelecimento de associação dos nós. Essa etapa também é muito importante nos ambientes subaquáticos e define o procedimento de troca de informações que será adotado entre sensor acústico e nó acústico móvel. É neste ponto que se deve atestar a robustez do sistema de comunicação.

O número e a complexidade das mensagens compostas por cada estabelecimento, influenciam diretamente na ação de encaminhamento das mensagens. O grande problema encontrado é que, quanto maior a robustez de um sistema, mais difícil se dá a sua implementação, devido a sua alta complexidade.

A especificação em PROMELA do protocolo proposto, que tem características baseadas nos protocolos Epidemic e Prophet, permite modelar o comportamento desejado para o serviço, de modo que esse possa ser comparado com o comportamento obtido para os protocolos originais. A relação entre diferentes descrições em PROMELA de um dado sistema e, em particular, entre especificações (serviço) e implementações (protocolo) pode ser verificada através de propriedades seguras e vivas, que se baseiam na idéia de que o comportamento de um sistema é determinado pelo modo pelo qual os processos interagem sem prejudicar o correto funcionamento.

Para ilustrar o método abordado, esta seção apresenta um exemplo de análise. Foi escolhida a parte inicial do estabelecimento das associações, realizado pelo protocolo responsável em determinar que tipo de mecanismos vai ser empregado durante o encaminhamento das mensagens. Como já foi apresentado, o processo pode ser realizado utilizando dois modos de operação contidos neste protocolo, demonstrando o quanto pode variar o comportamento do protocolo em suas características, com a simples determinação do tipo de operação e do número de nós acústicos móveis envolvidos na comunicação. Foram realizadas simulações deste comportamento variando-se o número de nós disponíveis para um dado sensor.

##### A. Estudo de Caso do Protocolo

O protocolo responsável pelo encaminhamento das mensagens neste ambiente é definido para prestar um serviço de troca de mensagens em uma rede tolerante a atrasos e interrupções entre sensores acústicos e nós acústicos móveis. Os sensores acústicos transmitirão suas mensagens armazenadas através desses nós. Nesse caso, o protocolo levará em conta a densidade de nós acústicos móveis disponíveis a cada sensor, para definir o modo de operação. Existirão dois modos de operação, o esparsos e o denso, onde serão executados, respectivamente, mecanismos com menor e maior complexidade na entrega das mensagens.

A execução do protocolo é iniciada com a troca das

mensagens HELLO. Essa mensagem é enviada pelo nó acústico móvel para estabelecer a primeira comunicação com o sensor acústico e permite que o sensor acústico verifique quantos nós acústicos móveis estão em sua área de alcance. Neste ponto do protocolo, o sensor acústico encaminha a mensagem HELLO\_res, informando o modo de operação ou cancelamento da comunicação caso o sensor não tenha mensagens armazenadas. Após a definição do modo de operação que será adotado na comunicação o protocolo poderá trabalhar no modo esparsos ou denso.

No modo de operação esparsos, cada sensor acústico transmitirá suas mensagens para todos os nós acústicos móveis alcançáveis, que em muitos casos se restringirá a um único nó acústico. Durante esse processo, os sensores acústicos trocam somente informações dos sumários de mensagens armazenadas VSME (Vetor Sumário das Mensagens), antes de encaminhar as mensagens armazenadas ao nó acústico móvel, tornando toda a operação de encaminhamento simples, mas acarretando duplicidade de transmissões das mensagens armazenadas, conforme a figura 6.

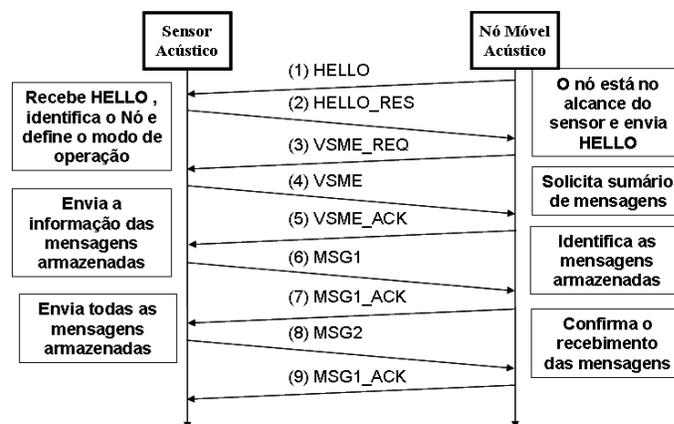


Fig. 6. Modo de operação esparsos do protocolo de roteamento.

Já no modo de operação denso, cada sensor transmitirá suas mensagens para o nó móvel com maior probabilidade de entrega da mensagem ao seu destino. Nesse modo, o protocolo é definido para prestar um serviço com maior complexidade, já que etapas adicionais são executadas para definir a probabilidade de entrega da mensagem. Além das mensagens VSME serão trocadas as mensagens VSMO (Vetor Sumário das Movimentações), responsáveis pelo transporte dos sumários da movimentação do nó acústico móvel. No sensor acústico, essas informações serão utilizadas para o cálculo de probabilidade de entrega de cada mensagem de acordo com o destino, definindo um único nó acústico móvel responsável pelo encaminhamento de cada mensagem (vide a figura 7).

O mesmo processo de decisão e transmissão das mensagens é executado pelo protocolo no domínio não subaquático da rede DTN. Neste caso, a comunicação será feita através de nós móveis sem fio, realizando a transmissão via rádio.

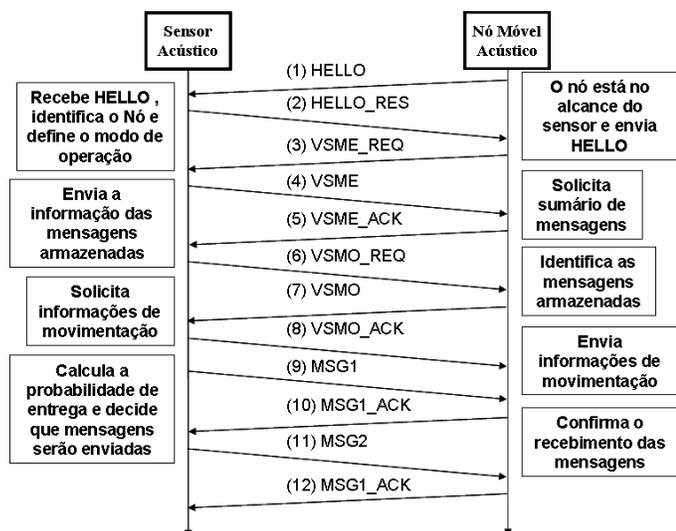


Fig. 7. Modo de operação denso do protocolo roteamento.

A arquitetura empregada para o estabelecimento de comunicações é descrita em PROMELA pela expressão comportamental geral do protocolo. A especificação foi definida para modelar o comportamento do protocolo durante o processo de definição do modo de operação. Nesse processo, o sensor acústico e o nó acústico móvel trocam informações para a associação e o estabelecimento do modo de operação, de acordo com as figuras 6 e 7.

No protocolo de roteamento proposto, foram incluídas mensagens de confirmação utilizadas nos dois modos de operação. Essa alteração foi necessária para aumentar o nível de confiabilidade durante a troca de informações e no envio das mensagens armazenadas.

Na simulação, o protocolo foi configurado para trabalhar em modo de operação esparsa, com até 3 nós acústicos móveis disponíveis, sendo que, a partir desse número seria utilizado o modo de operação denso.

## V. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos com a verificação do comportamento do protocolo, em relação ao modelo do serviço, podem ser vistos na figura 8, com a análise do número de estados e transições do protocolo com relação à quantidade de nós acústicos móveis alcançáveis pelo sensor acústico.

Por se tratar de modos diferentes de execução de um mesmo protocolo, a grande diferença encontrada é a expansão do comportamento dos estados e transições que determinam o grau de complexidade dos modos de operação modelados. Esse processo pode ser analisado através da alteração do comportamento do protocolo com o aumento do número de nós acústicos móveis, em relação ao encaminhamento das mensagens armazenadas. Podemos perceber que o modo denso apresenta um número maior de estados e transições, o que lhe confere maior complexidade nos mecanismos de encaminhamento.

A observação do comportamento, obtida pela ferramenta SPIN, resultou na confirmação do correto funcionamento do protocolo nos dois modos de operação. Observamos que, pela modelagem formal de um protocolo, podemos aferir a troca de operação com relação à quantidade de nós acústicos móveis disponíveis e verificar eventuais falhas nos procedimentos executados por ele.

Foi possível observar que, a partir de 4 nós acústicos móveis disponíveis, o protocolo começa a executar os procedimentos mais complexos para a definição do encaminhamento das mensagens. Um crescimento acentuado do número de estados e transições executadas, no modo de operação denso, verifica o limiar de comutação dos modos de operação. Esse número quase quadruplica, devido à complexidade dos processos executados.

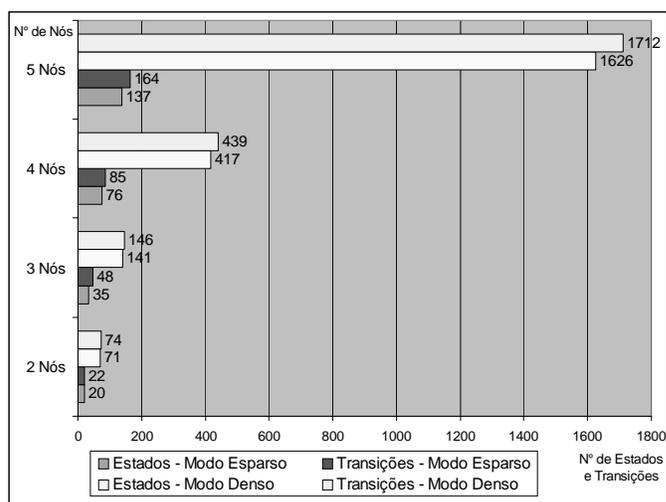


Fig. 8. Número de transições e estados nos modos de operação do protocolo.

Com a ferramenta SPIN, foi possível verificar o comportamento geral do protocolo e o processo de análise de propriedades seguras em relação a *deadlocks*. Em todos os casos simulados, as mensagens foram transmitidas, mesmo num ambiente sujeito a interferências, que resultou no atendimento aos requisitos de robustez necessários a este protocolo. Isso foi possível devido à inclusão de confirmações extras na troca das informações sumarizadas e das mensagens. De fato, existem diferenças entre a evolução do diagrama de estados do protocolo e o do serviço modelado. Diversos estados internos surgem no modelo mais completo (protocolo), que tornam a evolução diferente.

Os resultados obtidos com a verificação do comportamento do protocolo, em relação ao modelo esperado, sugerem que a análise do número de estados e transições do protocolo pode ser utilizada para aferir a sua maior eficácia em estabelecer comunicações em ambientes subaquáticos. A grande diferença encontrada na expansão dos estados e transições é que indica o grau de complexidade dos modos em relação à transmissão das mensagens.

## VI. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este artigo apresentou o estudo de um protocolo de roteamento para sistemas subaquáticos de comunicação, analisado através de um processo de verificação formal do protocolo de encaminhamento das mensagens, utilizando a linguagem PROMELA. Foi apresentado como especificar a fase de estabelecimento de associações entre sensores acústicos e nós acústicos móveis, e uma metodologia que pode ser empregada na estrutura de roteamento, pertencente à arquitetura de sistemas móveis subaquáticos em uma rede DTN. A validação e a formalização do comportamento do protocolo têm como base a verificação da complexidade e robustez dos protocolos.

Foi proposto um modelo de comunicação adequado às características do ambiente subaquático. O modelo tem como base a inclusão de confiabilidade através de mensagens de confirmação na troca das informações e mensagens armazenadas. Como foi mostrado, o comportamento do protocolo proposto pode variar de acordo com o número de nós móveis disponíveis para cada sensor. Este comportamento ficou evidente com a variação dos estados e transições durante a verificação do protocolo.

A análise da variação na quantidade dos estados e das transições com a variação da quantidade de nós e sensores envolvidos permite afirmar que, pela modelagem formal deste protocolo, podemos aferir o seu correto comportamento e, através dos estados do protocolo, verificar a complexidade nos procedimentos executados.

As verificações sugerem que um protocolo que atue com dois modos de operação, um encaminhando as mensagens para todos os nós acústicos móveis disponíveis, quando houver uma baixa densidade de nós acústicos móveis, e outro definindo um único nó acústico móvel responsável pelo encaminhamento da mensagem, quando a densidade for maior, pode garantir maior flexibilidade ao modelo de comunicação subaquática.

O resultado obtido coloca a descrição formal como ferramenta de grande contribuição para a validação do comportamento que se espera de um serviço modelado. Pode-se afirmar que trabalhos neste sentido serão fundamentais para o estabelecimento desta nova filosofia de comunicação em sistemas subaquáticos. Ao nosso ver, estaremos contribuindo com um modelo de comunicação subaquática e uma metodologia de validação de protocolos que ainda não foram testados nestes sistemas e, assim, verificando as garantias do atendimento aos requisitos de robustez que sejam necessários.

Como trabalho futuro, propõe-se o estudo de viabilidade de aplicações em redes subaquáticas de acordo com a densidade de nós móveis disponíveis para a comunicação com os sensores acústicos, realizado através do simulador ONE (*Opportunistic Network Environment*) [17].

## VII. REFERÊNCIAS

- [1] K. Fall, "Messaging in difficult environments" – Intel Research Berkeley, Out/Nov. 2004.
- [2] 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, Abr. 2007.
- [3] Mordechai Ben-Ari, "Principles of the Spin Model Checker", 2008, Springer.
- [4] G. J. Holzmann, "The Model Checker Spin". IEEE Transactions on Software Engineering, vol. 23, No 5, Maio 1997.
- [5] D. Penteado, A. C. P. Pedroza, e L. H. M. K. Costa, "Underwater Sensor Networks: a Feasibility Study", In 8th International Information and Telecommunication Technologies Symposium, Florianópolis, SC, Brasil, Dez. 2009.
- [6] D. Penteado, L. H. M. K. Costa, e A. C. P. Pedroza, "Deep-ocean Data Acquisition Using Underwater Sensor Networks", to appear in The International Society of Offshore and Polar Engineers - ISOPE-2010, Pequim, China, Jun. 2010.
- [7] R. F. Solano, M. C. Genaio, A. Ayres e G. S. Cezar, "Design and Installation Challenges of Jubarte Gas Pipeline in the Shore Approach Area" In The International Society of Offshore and Polar Engineers - ISOPE-2007, Lisboa, Portugal, 2007.
- [8] 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, 2007.
- [9] E. Sozer, M. Stojanovic, e J. Proakis, "Underwater acoustic networks," Oceanic Engineering, IEEE Journal of, vol. 25, no. 1, pp. 72–83, 2000.
- [10] C. T. Oliveira., e O. C. M. B. Duarte, 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 – SBRC2007, pág. 293–305. maio 2007.
- [11] K. Harras, K. Almeroth, e E. Belding-Royer, "Delay Tolerant Mobile Networks (DTMNs): Controlled Flooding Schemes" in Sparse Mobile Networks. In International Conferences on Networking -IFIP, 2005.
- [12] P. Mundur, e M. Seligman, "Delay tolerant network routing: Beyond epidemic routing. Wireless Pervasive Computing.. ISWPC 2008. 3rd International Symposium, pág. 550–553, 2008.
- [13] A. Lindgren, A. Doria, e O. Schelén, "Probabilistic Routing in Intermittently Connected Networks". In International Workshop on Service Assurance with Partial and Intermittent Resources -SAPIR, vol. 7, Springer, Ago. 2004.
- [14] A. Lindgren, A. Doria, E. Daives e S. Grasis, "Probabilistic Routing Protocol for Intermittently Connected Networks" Internt-Draft, DTN Research Group, Ago 2010.
- [15] A. M. Andrade, F. M. Assis Silva, F. J. Barboza, "Extensão da linguagem promela para especificação de sistemas baseados em agentes móveis. Em Anais do IV Workshop de Comunicação Sem Fio e Computação Móvel - WCSF2002, São Paulo, 2002.
- [16] I. F. Akyildiz, W. Su, , Y. Sankarasubramaniam e E Cayirci., "Wireless sensor networks: A survey. Computer Networks", 38(4):393–422.
- [17] A. Keränen, J. Ott e T. Kärkkäinen: "The ONE Simulator for DTN Protocol Evaluation". SIMUTools'09: 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques. Roma, Mar. 2009.