

Universidade Federal de Juiz de Fora  
ICE/Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

**Lucas Saar Cerqueira**

**PCRA - Um protocolo cooperativo de acesso ao meio para redes de sensores  
aquáticas**

Juiz de Fora  
2018

**Lucas Saar Cerqueira**

**PCRA - Um protocolo cooperativo de acesso ao meio para redes de sensores  
aquáticas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Alex Borges Vieira

Coorientador: Luiz Filipe Menezes Vieira

Juiz de Fora

2018

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Cerqueira, Lucas Saar.

PCRA - Um protocolo cooperativo de acesso ao meio para redes de sensores aquáticas / Lucas Saar Cerqueira. – 2018.

45 f. : il.

Orientador: Alex Borges Vieira

Coorientador: Luiz Filipe Menezes Vieira

Dissertação (mestrado acadêmico) – Universidade Federal de Juiz de Fora, ICE/Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação , 2018.

1. Redes de sensores. 2. Redes móveis. 3. Redes autônomicas e auto-organizáveis. I. Vieira, Alex Borges, orient. II. Vieira, Luiz Filipe Menezes, coorient. III. Título.

**Lucas Saar Cerqueira**

**PCRA - Um protocolo cooperativo de acesso ao meio para redes de sensores  
aquáticas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Aprovada em:

**BANCA EXAMINADORA**

---

Professor Dr. Alex Borges Vieira - Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Professor Dr. Luiz Filipe Menezes Vieira - Coorientador  
Universidade Federal de Minas Gerais

---

Professor Dr. Marcos Augusto Menezes Vieira  
Universidade Federal de Minas Gerais

---

Professor Dr. José Augusto Miranda Nacif  
Universidade Federal de Viçosa

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por tudo que fizeram a longo da minha vida que me permitiu chegar até aqui. Agradeço à minha noiva por estar ao meu lado, todos os dias, com seu amor, sabedoria e paciência.

Agradeço ao meu orientador Alex, principalmente por me motivar e acreditar em mim. Aos professores Flip, Flop, e Nacif pelo trabalho que realizamos e pelas oportunidades concedidas.

Aos diversos professores e funcionários da UFJF pelo apoio desde o início da graduação. Aqui há pessoas muito especiais, que realmente dedicam ao seu trabalho de todo o coração.

Finalmente agradeço à CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo financiamento da bolsa do programa e dos projetos que realizamos.

## RESUMO

O monitoramento de ambientes aquáticos ainda é uma tarefa difícil e dispendiosa. De fato, em ambientes aquáticos, ondas eletromagnéticas e ópticas sofrem alta atenuação e, mesmo a comunicação acústica apresenta baixa vazão e alta taxa de erro de bits. A maioria das abordagens existentes para melhorar o desempenho da comunicação subaquática se baseia no desenvolvimento de modems acústicos, acesso múltiplo ao canal de comunicação e roteamento de dados. Neste trabalho apresentamos PCRA: um Protocolo Cooperativo para Redes de Sensores Aquáticas. O PCRA funciona de forma síncrona/assíncrona sobre o método TDMA combinado com um esquema ARQ baseado em *Selective Repeat*. Cada nó que não possui dados para transmitir pode se tornar um cooperador e retransmitir mensagens para auxiliar os nós vizinhos. Ele usa os nós sensores ociosos como nós retransmissores, aumentando a diversidade do espaço de comunicação. Nossas simulações mostram que, quando comparado a um protocolo não cooperativo, o PCRA reduz a taxa de erro de pacotes em 65% e aumenta o *goodput* em 16% enquanto gasta menos de 1% a mais de energia.

Palavras-chave: Redes autonômicas e auto-organizáveis. Redes de sensores aquáticas. Cooperação.

## ABSTRACT

Monitoring underwater environments is still a hard and costly task. Indeed, electromagnetic and optical waves suffer high attenuation, being absorbed in a few meters and even acoustic communication presents low throughput and high bit error rate. Most of the existing approaches to enhance underwater communication performance relies on developing acoustic modems, multiple access of the communication channel, and data routing. In this paper we present PCRA: a Cooperative Protocol for Underwater Sensor Networks. PCRA synchronously/asynchronously works on top of TDMA method combined with an ARQ scheme based on selective repeat technique. Each node that has no data to transmit can become a cooperator and retransmit messages to assist neighboring nodes. It uses idle sensor nodes as relay nodes, enhancing communication space diversity. Our simulations show that, when compared to a non-cooperative protocol, PCRA enhances overall network performance metrics. For instance, it reduces packet error rate by 65% and increases goodput by 16% while spending less than 1% more energy.

Key-words: Autonomous and self-organizing networks. Underwater sensor networks. Cooperation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Rede de sensores aquáticas . . . . .	13
Figura 2 – Quadros e intervalos de tempo do esquema de divisão por tempo . . . . .	16
Figura 3 – Componentes da atenuação do sinal: dispersão e absorção . . . . .	17
Figura 4 – Coeficiente de absorção em relação a frequência . . . . .	18
Figura 5 – Atenuação do sinal em relação a frequência e distância de comunicação . . . . .	18
Figura 6 – PCRA-S em um cenário com 3 nós. . . . .	22
Figura 7 – PCRA-S em um cenário com 5 nós. . . . .	23
Figura 8 – Dois quadros do PCRA-A em um cenário com 5 nós. . . . .	24
Figura 9 – Cenário sem adiantamento da transmissão. . . . .	25
Figura 10 – Adiantamento da transmissão no PCRA-SE. . . . .	26
Figura 11 – Dois quadros do PCRA-SE em um cenário com 5 nós. . . . .	27
Figura 12 – Taxa de erro de pacote para 50 nós por carga de rede. . . . .	31
Figura 13 – <i>Goodput</i> para 50 nós por carga de rede. . . . .	31
Figura 14 – Consumo de energia para 50 nós por carga de rede. . . . .	32
Figura 15 – PER do PCRA-S em relação ao número de nós. . . . .	32
Figura 16 – <i>Goodput</i> do PCRA-S em relação ao número de nós. . . . .	33
Figura 17 – Consumo de energia do PCRA-S em relação ao número de nós. . . . .	33
Figura 18 – Tipo de pacote enviado por protocolo . . . . .	34
Figura 19 – <i>Goodput</i> por carga de rede para área de lado 1000 m . . . . .	35
Figura 20 – Energia gasta por carga de rede para área de lado 1000 m . . . . .	36

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACK	<i>Acknowledgement</i>
ARQ	<i>Automatic repeat request</i>
BER	<i>Bit error rate</i>
BPSK	<i>Binary phase shift keying</i>
CTS	<i>Clear-To-Send</i>
FEC	<i>Forward error correction</i>
MAC	<i>Medium access control</i>
NACK	<i>Negative-acknowledgement</i>
PCRA	Protocolo cooperativo para redes de sensores acuáticas
PCRA-A	Protocolo cooperativo para redes de sensores acuáticas assíncrono
PCRA-S	Protocolo cooperativo para redes de sensores acuáticas síncrono
PCRA-SE	Protocolo cooperativo para redes de sensores acuáticas síncrono e escalonado
RSA	Redes de sensores acuáticas
RTS	<i>Request-To-Send</i>
S&W	<i>Stop-and-wait</i>
SNR	<i>Signal-to-noise Ratio</i>
SR	<i>Selective repeat</i>
TDMA	<i>Time-division multiple access</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução . . . . .</b>	<b>9</b>
1.1	Impacto na Área . . . . .	11
1.2	Organização da Dissertação . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Redes de sensores aquáticas . . . . .</b>	<b>13</b>
2.1	Visão Geral . . . . .	13
2.2	Protocolos de controle de acesso ao meio . . . . .	14
2.3	Formulação do problema . . . . .	15
2.4	Atraso de propagação . . . . .	19
2.5	Sincronização do tempo . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Comunicação cooperativa . . . . .</b>	<b>21</b>
3.1	Protocolo síncrono . . . . .	21
3.2	Protocolo assíncrono . . . . .	23
3.3	Protocolo síncrono escalonado . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Avaliação do protocolo . . . . .</b>	<b>28</b>
4.1	Metodologia de avaliação . . . . .	28
4.2	Métricas . . . . .	29
4.3	Resultados . . . . .	30
<b>5</b>	<b>Trabalhos relacionados . . . . .</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>Conclusões . . . . .</b>	<b>39</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>40</b>

## 1 Introdução

Redes de sensores aquáticas (RSA) fazem parte de uma importante área de pesquisa com crescente interesse da sociedade. O uso de tais redes em aplicações militares, comerciais e de pesquisa torna viável uma série de tarefas previamente desafiadoras [Akyildiz et al., 2005, Cui et al., 2006, Felemban et al., 2015]. Por exemplo, ao empregar RSA, é possível monitorar de forma eficiente a vida aquática e a qualidade da água, explorar recursos naturais, como petróleo e gás, detectar minas e veículos submarinos e prevenir desastres como derramamentos de óleo e alerta sobre desastres naturais como tsunamis.

As RSA são compostas por dispositivos chamados de nós sensores. Cada nó pode ser equipado com diversos sensores para medir características do meio aquático, como pressão, temperatura, salinidade, potencial hidrogeniônico, entre outros. Em geral as informações coletadas pelos nós sensores são transmitidas ao longo da rede até um nó destino que é responsável pela comunicação externa, como por exemplo, um navio, satélite ou base portuária.

As condições do meio aquático impõem grandes dificuldades à comunicação. Abaixo da superfície da água, as ondas eletromagnéticas e ópticas sofrem alta atenuação, sendo absorvidas em alguns metros [Vieira et al., 2010]. Além disso as ondas ópticas sofrem alto espalhamento, impossibilitando a comunicação de médio e longo alcance. Portanto, as tecnologias baseadas em radiofrequência (RF) e luz visível não são adequadas para a implantação de redes em um ambiente aquático [Lanbo et al., 2008].

Nesse sentido, as ondas acústicas foram adotadas tanto pela indústria quanto pela academia como padrão para a comunicação aquática [Heidemann et al., 2012]. No entanto, a comunicação acústica ainda é desafiadora e caracteriza-se por três grandes problemas: (i) a largura de banda limitada e dependente da distância, (ii) o desvanecimento multicaminho variado pelo tempo, e (iii) a baixa velocidade do som na água quando comparada à ondas de rádio. Além disso, como quase todas as redes de sensores, as RSA apresentam severas restrições de energia. Como esperado, essas questões intensificam os conhecidos problemas de rede de sensores terrestre e tornam o consumo de energia um fator crucial no desenvolvimento de novas tecnologias nessa área [Akyildiz et al., 2004, Wills et al., 2006].

Em maiores detalhes, a propagação da onda acústica é melhor suportada em baixas frequências, onde possui maior alcance. Abaixo de 1 kHz é possível transmitir a centenas de quilômetros, porém quanto maior o alcance, menor a largura de banda disponível. Desta forma, modems acústicos comerciais geralmente operam na faixa entre 1 kHz a 100 kHz, o que limita a taxa de transmissão de bits a poucas dezenas de kbits/s [Akyildiz et al., 2005, Stojanovic and Preisig, 2009]. Por sua vez, a velocidade do sinal acústico na água é de aproximadamente 1.500 m/s, cinco ordens de grandeza menor

que a velocidade de propagação das ondas de rádio [Lurton, 2002]. O atraso de propagação, que muitas vezes é até ignorado em redes de sensores terrestres, passa a ser um problema desafiador em redes aquáticas.

Devido as peculiaridades do canal acústico aquático, as soluções já consolidadas para redes de sensores sem fio terrestres não são diretamente aplicáveis às redes de sensores aquáticas [Chitre et al., 2008]. Assim, muitas técnicas foram estudadas para melhorar a qualidade da comunicação e superar os desafios das RSA, desde a camada física até a camada de aplicação. Na verdade, estamos cientes de uma série de estudos envolvendo o desenvolvimento de modems acústicos e uso efetivo do canal de comunicação [Pinto et al., 2012, Demirors et al., 2014, Renner and Golkowski, 2016], múltiplo acesso ao meio (detalhado na Seção 5) e roteamento de dados [Lee et al., 2010b, Coutinho et al., 2013, Coutinho et al., 2014, Basagni et al., 2015, Coutinho et al., 2015, Coutinho et al., 2016b, Vieira, 2012, Coutinho et al., 2016a, Zhou et al., 2015]. Nesse cenário, o uso de mecanismos de redundância, como *Forward Error Correction* (FEC), ou de protocolos ARQ (*Automatic Repeat Request*) é obrigatório para obter uma comunicação livre de erros [Sozer et al., 2000]. A técnica de FEC é baseada na ideia de adicionar bits de redundância para permitir o nó receptor detectar e recuperar bits que tenham sido corrompidos durante a transmissão. Já a técnica de ARQ permite que o nó receptor sinalize aos nós transmissores a necessidade de retransmissão de pacotes que falharam.

Porém, o uso do FEC por si só, não é suficiente, uma vez que um canal com alta taxa de erro de bit (BER) irá acarretar em sucessivas retransmissões [Jiang, 2018]. Já para os protocolos baseados em ARQ como *stop-and-wait* e *selective repeat*, o longo atraso de propagação combinado com a elevada BER do canal acústico aquático fazem com que seja difícil alcançar uma comunicação com alta vazão [Ghosh et al., 2013]. Além disso, os protocolos ARQ também aumentam o uso de energia e a latência de transmissão, o que não é desejável em RSA.

Em muitos meios, uma forma de melhorar a qualidade da comunicação é a realização de transmissões cooperativas de mensagens. Essa abordagem explora a natureza *broadcast* das transmissões sem fio [Laneman et al., 2004]. Cada nó da rede pode ouvir outras transmissões e atuar como um *relay*, (i) intensificando o sinal ao transmitir em conjunto com o nó original, ou (ii) retransmitindo a mensagem caso ela tenha falhado, permitindo que o nó que a originou continue sua fila de transmissão, deixando a tarefa de retransmissão para seus parceiros de cooperação. Enquanto a primeira abordagem aumenta principalmente a vazão, a segunda reduz a taxa de erro. Esta forma de diversidade espacial é conhecida como diversidade cooperativa ou comunicação cooperativa [Laneman et al., 2004, Khan and Karl, 2014].

Neste trabalho propomos o PCRA (Protocolo Cooperativo para Redes de sensores Aquáticas) um protocolo de comunicação cooperativo que leva em consideração as duas

subcamadas da camada de enlace de dados: o controle de acesso ao meio e o controle de ligação lógica. Em resumo, o PCRA utiliza o método de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA) combinado com um esquema ARQ baseado na técnica de *selective repeat* (SR). O PCRA explora a ociosidade dos nós para aumentar a diversidade espacial, ou mais especificamente, a diversidade cooperativa. Diferente das abordagens existentes que também usam comunicação cooperativa [Lee et al., 2010a, Lee and Cho, 2011, Azad et al., 2011, Ghosh et al., 2013, Azad et al., 2013], nosso protocolo é projetado para integrar a cooperação com um esquema ARQ em um protocolo de controle de acesso médio sem colisão.

Nós avaliamos o PCRA através de simulações no ns-3 [ns3, 2017] em um cenário onde vários sensores aquáticos tentam se comunicar com um nó sorvedouro. Quando comparado a um protocolo não cooperativo, os resultados mostram que o PCRA aumenta as métricas de desempenho da rede. Por exemplo, no melhor cenário, a taxa de perda de pacotes é reduzida em 48,53%, o *goodput* aumenta em 21,86% e o consumo de energia aumenta em apenas 1,00%.

Além da proposta do PCRA, destacamos que discutimos a comunicação cooperativa em protocolos de acesso ao meio para redes de sensores acústicos aquáticas. Primeiramente examinamos as RSA, desde conceitos de comunicação acústica aquática até sua modelagem. Descrevemos então um modelo que representa a taxa de erro de pacotes da comunicação aquática com base nas propriedades do ambiente e nas características do modem acústico. Finalmente, revisamos trabalhos sobre sistemas de comunicação cooperativa e ARQ, e como eles lidam com controle de acesso ao meio.

Este trabalho apresenta três contribuições principais. A primeira delas é um novo protocolo de acesso ao meio para redes de sensores aquáticas que incorpora transmissões cooperativas e retransmissões. A segunda é a avaliação sistemática do protocolo proposto. E finalmente, a terceira contribuição é uma revisão não sistemática da literatura sobre cooperação em protocolos de acesso meio em redes de sensores aquáticas.

## 1.1 Impacto na Área

Os avanços e contribuições desta dissertação foram publicados em anais de congressos, capítulo de livro e *workshops*, nacionais e internacionais. Os primeiros resultados dos trabalhos foram publicados e apresentados no *VII Workshop On Autonomic Distributed Systems* (WoSiDA) do XXXV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC) no ano de 2017 [Cerqueira et al., 2017]. Em seguida, avanços e melhorias foram realizados na definição e funcionamento do protocolo. Foi enviado e aceito para publicado um capítulo do livro *Magnetic Communications: From Theory to Practice* com previsão de publicação para agosto de 2018. Uma nova publicação foi aceita para a trilha principal do XXXVI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas

Distribuídos, que ocorrerá no mês de maio de 2018. Por meio dessas publicações, esperamos contribuir com a qualidade da comunicação acústica em redes de sensores aquáticas. Em uma visão mais ampla, esperamos também incentivar o interesse no estudo dos ambientes aquáticos no Brasil, país rico em ambientes marítimos, fluviais e lacustres.

Portanto, nesta dissertação nós fornecemos avanços na comunicação cooperativa em ambientes aquáticos. Mostramos os benefícios de integrar a cooperação com o controle de erro do canal de maneira eficiente. E apresentamos também um cenário de simulação detalhado para servir de base de comparação para trabalhos futuros.

## 1.2 Organização da Dissertação

O restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira. Primeiro, no Capítulo 2, apresentamos os fundamentos de redes de sensores aquáticas e o problema abordado. Então, no Capítulo 3, detalhamos o funcionamento do protocolo cooperativo proposto. No Capítulo 4, primeiro descrevemos a avaliação do protocolo e, em seguida, os resultados da nossa simulação. No Capítulo 5 apresentamos uma revisão da literatura sobre cooperação em redes de sensores aquáticas. Finalmente, nossas conclusões são apresentadas no Capítulo 6.

## 2 Redes de sensores aquáticas

Mais de 70% da superfície do nosso planeta é coberta por água. Ainda assim, 95% do oceano permanece inexplorado [National Oceanic and Atmospheric Administration, 2017]. O avanço da tecnologia de sensores revolucionou muitas áreas da ciência, incluindo diversas áreas que estudam os ambientes aquáticos [Heidemann et al., 2006]. Redes de sensores aquáticas é uma dessas tecnologias, permitindo o monitoramento e observação do oceano, vigilância do mar profundo, localização de recursos e rastreamento de entidades do ambiente aquático (p. ex., animais, embarcações) [Felemban et al., 2015].

### 2.1 Visão Geral

De maneira geral, as aplicações de RSA são compostas por nós sensores, veículos autônomos e estações de comunicação externa, chamadas de sorvedouros (*sink*). A Figura 1 ilustra um exemplo de implantação de RSA. Os nós sensores são espalhados pela área de interesse e podem estar fixos no fundo do ambiente aquático ou sustentados por boias. Os veículos autônomos são capazes de navegar pelo ambiente realizando o monitoramento e também transportar informações entre nós distantes. O sorvedouro por sua vez é um nó mais robusto, com maior capacidade de comunicação e energia, responsável pela comunicação externa da RSA.

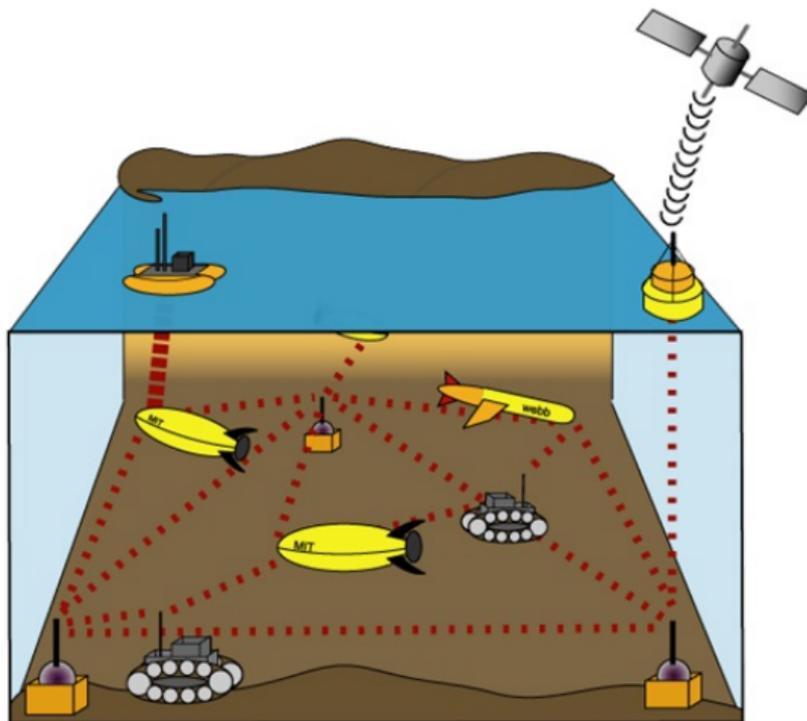


Figura 1 – Rede de sensores aquáticas  
Adaptado de [Vieira et al., 2010].

Para extrair as informações da rede, é necessário que os nós enviem os dados coletado até um dos sorvedouros. Quando a área monitorada é muito grande, é improvável que todos os nós tenham acesso direto aos sorvedouros, fazendo necessário o uso de múltiplos saltos entre os nós até o sorvedouro [Heidemann et al., 2012]. Adicionalmente, o uso de nós intermediários entre a origem e o destino pode aumentar a eficiência da rede [Stojanovic, 2007].

Porém, quanto maior a quantidade de nós coletando informações, maior será a quantidade de mensagens enviadas pelo canal. Como o meio de comunicação é compartilhado, uma mensagem transmitida por um nó pode interferir na transmissão ou recepção de outro. O objetivo de um protocolo MAC é permitir que vários usuários possam dividir um meio de comunicação comum de maneira justa e eficiente.

## 2.2 Protocolos de controle de acesso ao meio

Nesta seção apresentamos uma breve revisão das principais categorias de protocolos MAC. Alguns autores como em [Jurdak et al., 2004, Akyildiz et al., 2004, Jiang, 2018] sugerem categorizações dos protocolos MAC para redes de sensores aquáticas. Baseado nesses modelos, dividimos os protocolos em duas categorias: (i) os sem multiplexação e (ii) os com multiplexação.

Primeiramente, consideramos os protocolos sem multiplexação. A este grupo pertence o ALOHA, protocolo MAC mais simples no qual as transmissões são realizadas a qualquer momento [Vieira et al., 2006]. Toda recepção deve ser confirmada com um ACK e caso o nó transmissor não receba essa confirmação após um período de tempo (chamado de *timeout*) a mensagem é retransmitida após um período de espera aleatório (chamado de *backoff*). Uma derivação do ALOHA é o *slotted* ALOHA (S-ALOHA), no qual o tempo é dividido em intervalos fixos chamados de *slots* e novas transmissões só são permitidas no início de cada *slot*. O objetivo é evitar que novas transmissões colidam com transmissões que já estão em andamento [De et al., 2011].

Em seguida temos os protocolos com sensoriamento de portadora, ou *carrier sense multiple access* (CSMA). Estes protocolos funcionam escutando o meio antes de transmitir, tentando encontrar um melhor instante de transmissão a fim de evitar colisão no receptor. A principal variação do CSMA é o CSMA *collision avoidance* (CSMA/CA), onde o nó transmissor, após escutar o meio como livre, retarda sua transmissão por um período de tempo aleatório e transmite apenas quando escuta o meio livre novamente. Entretanto, o CSMA pode causar o problema do terminal oculto e o terminal exposto. O primeiro ocorre quando dois nós muito distantes e mutualmente não-interferentes transmitem simultaneamente e causam colisão em uma área entre os nós. O segundo ocorre quando um nó que poderia enviar uma mensagem sem causar colisão, está sendo bloqueado por outro nó que está transmitindo [Jayasuriya et al., 2004].

Acesso múltiplo com prevenção de colisões, *Multiple Access Collision Avoidance* (MACA) é outro protocolo que tenta evitar as colisões causadas pelo problema do terminal oculto [Karn et al., 1990]. No MACA os nós negociam a transmissão (*handshaking*) através de trocas de mensagens de *Request-To-Send* (RTS) e *Clear-To-Send* (CTS). Outro protocolo semelhante é o *Floor Aquisition Multiple Access* (FAMA) no qual o sensoriamento do meio é adicionalmente realizado antes do envio das mensagens de negociação [Fullmer and Garcia-Luna-Aceves, 1995].

Em seguida temos os protocolos do segundo grupo, os baseados em multiplexação. No acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA), a cada nó é atribuído um intervalo de tempo no qual o acesso ao meio é exclusivo. No TDMA é necessário adicionar um período de guarda para prevenir colisões devido a incerteza espaço-temporal causada pelo atraso de propagação (detalhado na Seção 2.4). De forma semelhante, no acesso múltiplo por divisão de frequência (FDMA), a cada nó é atribuído uma faixa de frequência exclusiva. Assim como no TDMA, é necessário adicionar uma faixa de guarda entre as bandas do FDMA devido as distorções de frequência que podem ocorrer no meio aquático, como as causadas pelo Efeito Doppler. No acesso múltiplo por divisão de código (CDMA), cada nó possui um código para modular seu sinal, reduzindo ou eliminando interferências de outros nós e possibilitando o recebimento de vários sinais simultaneamente.

Em geral, as soluções propostas para a comunicação acústica aquática são adaptações de protocolos acima mencionados. Muitas das soluções levam em consideração o longo atraso de propagação e para se adaptarem utilizam de tempos ou bandas de guarda. Porém, simplesmente tentar evitar colisões com restrições de transmissão pode reduzir significativamente a utilização da banda [Jiang, 2018]. Assim, várias técnicas foram propostas com o objetivo de superar os desafios do canal acústico aquático como a reserva do canal, que busca eliminar a colisão no receptor. Soluções multi-camadas, que buscam orquestrar o funcionamento do protocolo MAC com outras camadas, principalmente a PHY (e.g., MIMO, OFDM) [Li et al., 2009], também são utilizadas. Por último técnicas de escalonamento e cooperação que serão detalhados no Capítulo 3.

### 2.3 Formulação do problema

Neste trabalho consideramos uma rede de sensores aquáticas compostas por  $n$  nós, sendo  $n - 1$  nós sensores e 1 nó sorvedouro. Os nós sensores são responsáveis por gerar pacotes de dados (provenientes de coletas dos sensores) e transmití-los ao nó sorvedouro. O nó sorvedouro não gera dados, apenas recebe os pacotes e os confirma através de confirmação implícita, transmitindo mensagens NACK.

Consideramos também um esquema de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA) onde para cada nó é atribuído um período de tempo no qual ele acessa exclusivamente o meio de comunicação. A Figura 2 ilustra a atribuição dos períodos de tempo

para uma rede com  $n$  nós. O intervalo composto por  $n$  períodos de tempo, um de cada nó, é chamado de quadro, sendo repetido indefinidamente.

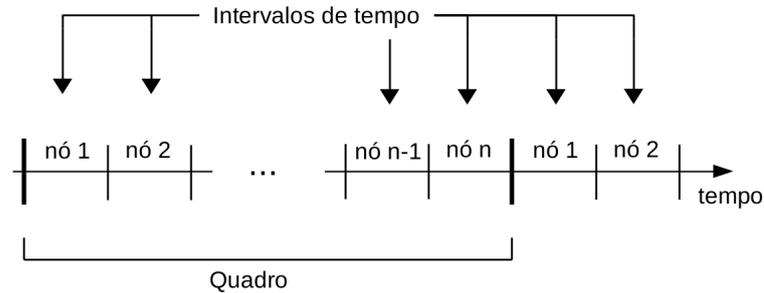


Figura 2 – Quadros e intervalos de tempo do esquema de divisão por tempo

Na camada física, consideramos modems que operam em *half-duplex*, ou seja, não conseguem transmitir e receber dados ao mesmo tempo. Desta forma, enquanto um nó está transmitindo, qualquer dado recebido é descartado. Modems *full-duplex* são menos comuns em redes aquáticas devido ao custo (múltiplas antenas), complexidade e redução da capacidade do canal [Gibson et al., ].

Consideramos que os nós são estáticos e estão distribuídos aleatoriamente em uma topologia de estrela dentro de uma área quadrada de lado 200 m e com 70 m de profundidade. O nó sorvedouro porém, está sempre posicionado no centro do quadrado. Dessa forma, todos os pacotes são endereçados diretamente para o nó sorvedouro. Essa topologia é comum em RSA, pois simplifica a configuração do protocolo MAC e apresenta bons resultados para redes pequenas [Jiang, 2018].

Para simular o canal acústico aquático obtemos a taxa de erro através de modelos amplamente adotados na literatura. O modelo adotado é válido para profundidade de aproximadamente 100 m, chamada de águas rasas. Primeiramente, para cada par de nós, distantes por  $d$  metros, calculamos a atenuação do sinal acústico usando [Urick, 1975]:

$$10 \log A(d, f) = k \cdot 10 \log d + d \cdot 10 \log a(f), \quad (2.1)$$

onde  $f$  é a frequência de transmissão. O primeiro termo representa a perda pela dispersão do sinal, sendo o coeficiente  $k$  o fator de dispersão, que indica como a onda se espalha pelo meio. Para valores de  $k = 1.0$  a onda se espalha como um cilindro onde o centro é o ponto de origem do sinal, e analogamente, para  $k = 2.0$  a onda se espalha como uma esfera. O valor de  $k = 1.5$  representa um meio termo entre as duas dispersões e é o valor comumente usado [Stojanovic, 2008, Parrish et al., 2008]. O segundo termo é a perda por absorção, que representa quanto da energia é perdida em forma de calor ao se propagar pelo meio.  $a(f)$  é chamado de coeficiente de absorção, e pode ser calculado pela aproximação de Thorp [Brekhovskikh et al., 1991]:

$$10 \log a(f) = 0,11 \frac{f^2}{1 + f^2} + 44 \frac{f^2}{4100 + f} + 2,75 \cdot 10^{-4} f^2 + 0,003, \quad (2.2)$$

que é válida para frequências  $f \geq 0,4$  Hz.

A Figura 3 mostra como a dispersão e a absorção afetam a atenuação do sinal. A perda por dispersão é calculada usando  $k = 1,5$ , enquanto a perda por absorção é calculada para frequências 4, 10, 20 e 60 kHz. Para distâncias mais baixas, a dispersão tem maior impacto na atenuação, sendo dominante mesmo para frequências mais altas [Burrowes and Khan, 2011].

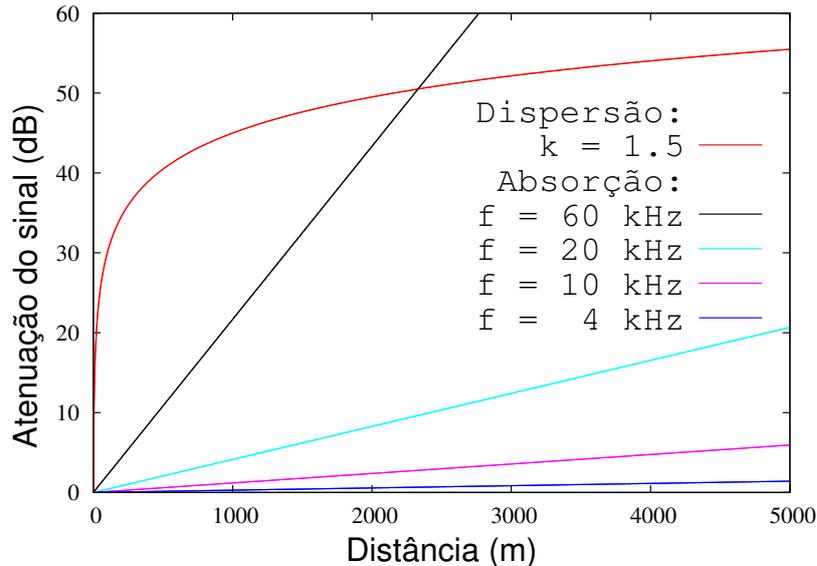


Figura 3 – Componentes da atenuação do sinal: dispersão e absorção

A Figura 4 mostra o coeficiente de absorção (Equação 2.2) em relação a frequência. É possível observar o rápido aumento da absorção com o aumento da frequência, ilustrando a dificuldade em utilizar altas frequências. De maneira análoga, a Figura 5 mostra o resultado final da atenuação do sinal (Equação 2.1) em relação a distância e a frequências na faixa de 1 a 50 kHz.

Em seguida calculamos a relação sinal-ruído:

$$\gamma(d) = SL - TL - NL + DI, \quad (2.3)$$

onde  $SL$  é a energia do sinal transmitido,  $TL$  é a perda do sinal ao longo da transmissão, calculada na Equação 2.1,  $DI$  é o fator diretivo, que para modems acústicos é dado por  $DI = 0$ .  $NL$  é o nível de ruído do ambiente, que é uma aproximação calculada pela equação de Wenz [Wenz, 1962] em função da frequência  $f$ :

$$NL(f) = N_t(f) + N_s(f) + N_w(f) + N_{th}(f). \quad (2.4)$$

Essa equação é composta pelos principais ruídos presentes no ambiente marítimo. O termo  $N_t$  é o ruído da turbulência, causado pela agitação das moléculas da água.  $N_s$  é o ruído

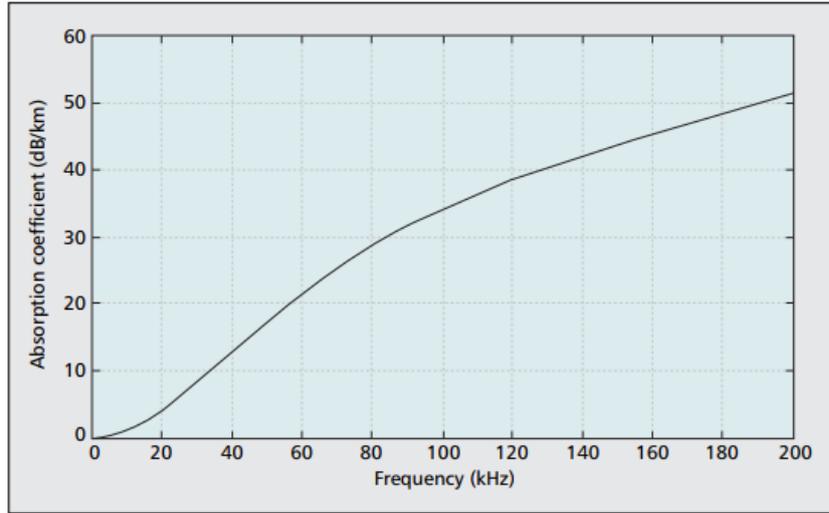


Figura 4 – Coeficiente de absorção em relação a frequência  
Adaptado de [Stojanovic and Preisig, 2009].

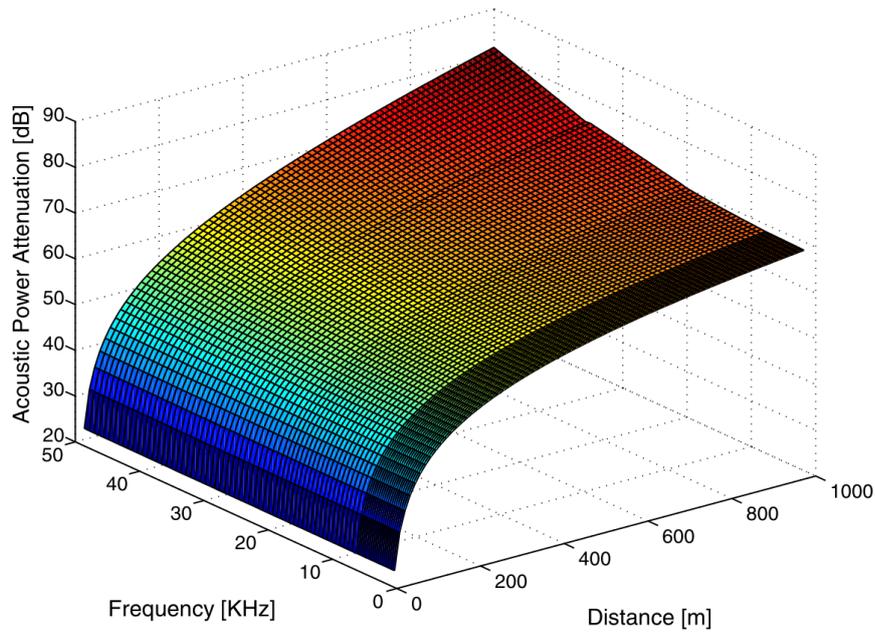


Figura 5 – Atenuação do sinal em relação a frequência e distância de comunicação  
Adaptado de [Akyildiz et al., 2005].

causado por embarcações,  $N_w$  é o ruído do vento e  $N_{th}$  é o ruído térmico. A função de densidade espectral de potência de cada componente do ruído é dada por:

$$\begin{aligned}
 10 \log N_t(f) &= 17 - 30 \log f \\
 10 \log N_s(f) &= 40 + 20(s - 0.5) + 26 \log f - 60 \log(f + 0.03) \\
 10 \log N_w(f) &= 50 + 7.5w^{1/2} + 20 \log f - 40 \log(f + 0.4) \\
 10 \log N_{th}(f) &= -15 + 20 \log f.
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Na equação  $N_s(f)$ , o termo  $s$  é chamado de fator de embarcações (do inglês, *shipping factor*), e representa a atividade naval. O valor de  $s$  varia de 0, indicando nenhuma atividade naval, até 1, indicando intensa atividade. O ruído proveniente de embarcações é predominante em baixas frequências: de 10 a 100Hz, sendo pouco influente nas frequências comumente usadas em RSA. De forma semelhante, o ruído térmico  $N_{th}(f)$  é significativo apenas para frequências muito altas, acima de 100 kHz. No ruído  $N_w(f)$ ,  $w$  representa a velocidade do vento em metros por segundo. O vento é a principal fonte de ruído na faixa de frequências de 100 Hz a 100 kHz, que é a região usada pela maioria dos modems acústicos modernos.

Finalmente, podemos descrever a probabilidade de erro no bit, para a modulação BPSK [Rappaport et al., 1996], como:

$$p_e(d) = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\Gamma(d)}{1 + \Gamma(d)}} \right), \quad (2.6)$$

onde  $\Gamma(d)$  é dado por:

$$\Gamma(d) = 10^{\gamma(d)/10}. \quad (2.7)$$

Assim, consideramos que em uma rede de sensores aquáticas onde os modems transmitem a uma determinada frequência  $f$ , a probabilidade de erro no bit  $\Gamma$  varia de acordo com a distância  $d$  entre os nós transmissores e receptores.

## 2.4 Atraso de propagação

O longo atraso de propagação da onda acústica é responsável por diversos problemas na comunicação aquática, sendo o mais severo a incerteza espaço-temporal [Syed et al., 2007]. Devido as diferentes distâncias entre os nós, duas mensagens enviadas em instantes diferentes podem chegar ao mesmo tempo no nó destino. Porém, de maneira análoga, é possível coordenar para que mensagens transmitidas em um mesmo instante de tempo, sejam recebidas em instantes de tempo diferentes. Esse cenário é abordado em detalhes no Capítulo 3.

O evento em que duas ou mais mensagens são recebidas por um nó em um mesmo instante de tempo, denominamos de colisão. O atraso de propagação da onda acústica é um fator crítico na prevenção da colisão. Em protocolos onde o nó receptor controla o envio de mensagens, é necessária coordenação entre os nós receptores e transmissores, o que acarreta em mais *overhead*. Já em protocolos onde o nó transmissor é quem tenta evitar a colisão, como em protocolos que escutam o meio (*carrier sensing*), transmissões em instantes diferentes não garantem recepções sem colisão devido a incerteza espaço-temporal. Dependendo da diferença de intensidade entre os sinais, é possível decodificar as mensagens recebidas, porém, nesse trabalho, consideramos apenas o pior caso, em que todas as mensagens que colidiram são perdidas.

Assim, para evitar que duas ou mais mensagens colidam, é necessário levar em consideração o atraso de propagação. Como visto na Seção 2.2, uma abordagem comum é adicionar um período de guarda ao final de cada transmissão. Durante esse período os nós não podem transmitir mensagens, permitindo que a última mensagem transmitida não colida. O tempo de guarda é calculado como o maior tempo de propagação da rede  $D_{max}$  e pode ser obtido em função da maior distância  $d$  entre todos os pares de nós da rede:

$$D_{max}(d) = \frac{d}{v}, \quad (2.8)$$

onde  $v$  é a velocidade do som na água. Como consideramos que os nós estão dispostos aleatoriamente em uma área quadrada, utilizamos  $d$  como o pior caso: a maior distância possível dentro desta área, que corresponde a diagonal do quadrado.

## 2.5 Sincronização do tempo

Devido à incerteza espaço-temporal, nós transmissores não conseguem decidir sobre a colisão no destino sem maiores informações sobre a rede. Desta forma é inevitável que transmissões sem sincronismo irão colidir no nó de destino, degradando a vazão e desperdiçando energia [Viana et al., 2015]. A sincronização do tempo entre os nós, permite que estes organizem suas transmissões e que o protocolo funcione de maneira determinística [Kredo II et al., 2009]. De fato, em protocolos como TDMA, a sincronização dos períodos de tempo de todos os nós da rede é essencial para seu correto funcionamento.

Em redes terrestres, a sincronização pode ser realizada através de protocolos como TPSN [Ganerival et al., 2003] ou FTSP [Maróti et al., 2004]. Porém para redes com alto atraso de propagação, estes protocolos não são aplicáveis e outras soluções foram propostas como o TSHL [Syed et al., 2006] e MU-Sync [Chirdchoo et al., 2008]. Ainda assim, estes protocolos sofrem com alto *overhead* de mensagens e elevado gasto de energia.

Outra alternativa é a utilização de *hardware* para a sincronização do tempo. Tecnologias baseadas em GPS não são adequadas para o ambiente aquático [Vieira et al., 2010] por isso soluções como as propostas por Kebkal et. al. e Anjangi & Chitre [Kebkal et al., 2016, Anjangi and Chitre, 2015] utilizam componentes do próprio modem acústico. Em [Kebkal et al., 2016] os autores utilizam um modem da EvoLogics S2CR<sup>1</sup> e demonstram como realizar a sincronização durante a troca de mensagens de dados. Em [Anjangi and Chitre, 2015], os autores apresentam um algoritmo para a sincronização dos períodos de tempo utilizando o detector de alcance do modem UNET-2 [Chitre et al., 2012].

Desta forma, por questões de simplicidade, assumimos neste trabalho que os nós iniciam seu funcionamento com os relógios sincronizados e que a pequena variação tempo ao longo do funcionamento pode ser desprezada.

---

<sup>1</sup> <https://www.evologics.de/>

### 3 Comunicação cooperativa

Como visto anteriormente, a comunicação aquática sem fio segue um padrão de transmissão em *broadcast*. Quando um nó tenta enviar dados para o nó sorvedouro, todos os outros nós podem receber esses dados. Nesse sentido, os nós ociosos podem retransmitir tais dados caso seja necessário, aumentando a diversidade espacial ou temporal. Por exemplo, para um nó de origem  $O$ , um nó sorvedouro  $S$  e um nó inativo qualquer  $R$  localizado entre  $O$  e  $S$ , quando  $O$  tenta enviar dados para  $S$ ,  $R$  é mais provável para recebê-lo corretamente do que  $S$  (devido a atenuação da onda acústica). Nesse caso, quando  $S$  não recebe os dados corretamente, mas  $R$  os recebe, o nó de retransmissão  $R$  pode oferecer seu intervalo de tempo para enviar os dados recebidos para  $S$ . Então, a retransmissão ocorrerá em um link mais curto, com maior probabilidade de sucesso.

Neste trabalho apresentamos três propostas de protocolos que utilizam a técnica de cooperação. Na Seção 3.1 apresentamos um protocolo síncrono no qual a cooperação é sincronizada através de um período de sinalização. Na Seção 3.2 apresentamos uma extensão do protocolo anterior onde a cooperação ocorre sem sincronismo. Por fim, na Seção 3.3 apresentamos outra extensão ao protocolo síncrono que incorpora a técnica de escalonamento de mensagens.

#### 3.1 Protocolo síncrono

Primeiramente propomos um Protocolo Cooperativo para Redes de sensores Aquáticas Sincronizado, chamado de PCRA-S, onde cada quadro TDMA possui um mini-período de sinalização (PS) seguido de um período de dados (PD). Os nós do sistema usam o período de sinalização para trocar mensagens de controle de cooperação, mostrando seu interesse em cooperar.

Mais precisamente, em nosso esquema, um nó só é capaz de transmitir um único pacote em um único quadro, em seu intervalo de tempo. Então, quando um nó recebe com sucesso um pacote de dados, o qual, por definição, é direcionado para o nó do sorvedouro, ele armazena essa mensagem em um *buffer* de cooperação. Ao final do quadro, o nó sorvedouro transmite um único NACK para indicar quais os pacotes do quadro atual falharam. Ao receber esta mensagem, cada nó sabe quais pacotes falharam, podendo então, tentar cooperar durante o próximo quadro, retransmitido este pacote.

Durante o período de sinalização, os nós ociosos podem sinalizar que irão cooperar enviando uma mensagem WTC (*want to cooperate*). A mensagem WTC indica que o nó irá retransmitir o pacote indicado em seu período de tempo. Além disso, permite que o nó que originou o pacote que falhou continue a transmitir pacotes da sua fila, aumentando a vazão, ou também retransmita o mesmo pacote, diminuindo a probabilidade de falha. Ao final do período de sinalização, cada nó já sabe qual pacote irá transmitir no quadro

atual e então, os nós podem gerenciar seu *buffer* de cooperação. Como consideramos um período de cooperação de apenas uma janela, cada nó aloca um *buffer* de cooperação de tamanho  $n - 1$  pacotes, onde  $n$  é o número de nós de rede.

Por exemplo, a Figura 6 retrata um cenário contendo 3 nós. Durante o quadro  $i$ , o nó de origem  $O$  transmite uma mensagem  $m_1$ , que é recebida com sucesso pelo nó ocioso  $R$ , mas não consegue atingir o nó sorvedouro  $S$ . Ao final do quadro,  $S$  sinaliza com um NACK que a mensagem falhou, sendo recebida por todos os nós. Como  $R$  está ocioso, ele indica que ele irá cooperar durante o próximo intervalo de dados. Assim,  $O$  pode transmitir sua próxima mensagem  $m_2$  no mesmo quadro que  $R$  retransmite  $m_1$ .

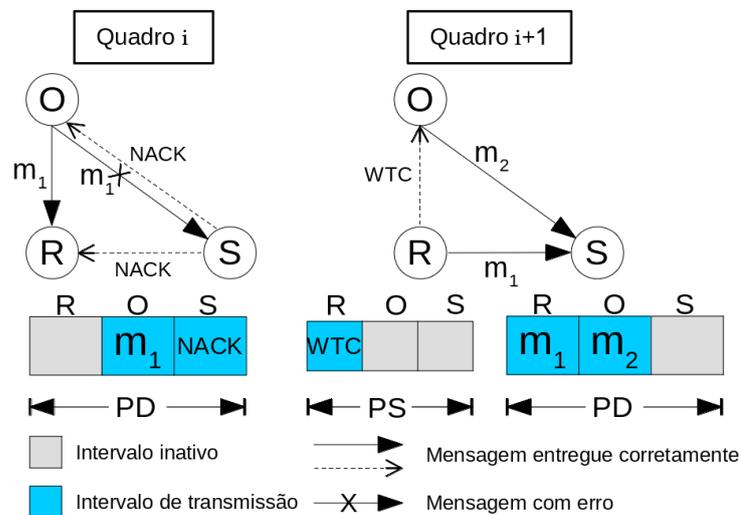


Figura 6 – PCRA-S em um cenário com 3 nós.

A Figura 7 mostra um cenário mais realista com quatro nós sensores e um nó sorvedouro. Durante o primeiro período de dados, os quatro nós não estão ociosos e tentam transmitir dados. De acordo com esta figura, as mensagens dos nós 3 e 4 falham, enquanto as mensagens restantes são entregues com sucesso. O nó sorvedouro envia um NACK, sinalizando que não recebeu mensagens corretamente dos nós 3 e 4. Todos os nós, ao receberem o NACK, verificam se possuem alguma mensagem perdida. Caso positivo, eles sinalizam sua intenção de cooperar durante o próximo período de sinalização.

Para evitar a duplicação de mensagens assumimos uma ordem de prioridade de retransmissão. O nó 1 é o primeiro a sinalizar sua mensagem WTC. Quando o nó 2 recebe a mensagem WTC do nó 1, percebe que o nó 1 cooperará retransmitindo os dados originais do nó 3. O nó 2 então sinaliza sua intenção de cooperar com o nó 4. Ou seja, a ordem dos períodos de tempo define a prioridade de retransmissão. Nós deixamos como trabalho futuro a investigação de outras políticas de deduplicação. Ao receber a mensagem de cooperação, os nós 3 e 4 sabem que podem transmitir suas próximas mensagens da fila. No próximo período de dados, as mensagens cooperativas dos nós 1 e 2 são enviadas

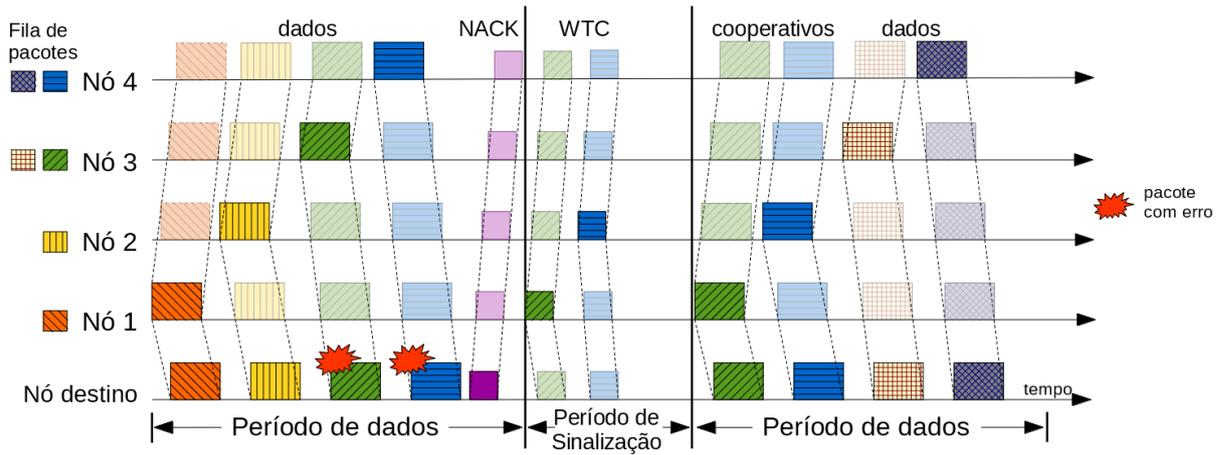


Figura 7 – PCRA-S em um cenário com 5 nós.

e recebidas corretamente. Da mesma forma, as mensagens dos nós 3 e 4 também são entregues com sucesso.

Quando mais de um nó possui a chance de cooperar, a escolha do nó de retransmissão é crucial para o sucesso da cooperação. Intuitivamente, quanto mais perto o nó estiver do sorvedouro, melhores serão as chances de retransmissão bem-sucedida. De fato, os nós mais próximos do nó sorvedouro apresentarão uma menor taxa de erro de pacote do que os nós mais distantes, uma vez que a taxa de erro de pacote é proporcional à distância. Para uma determinada mensagem com falha, o retransmissor é selecionado como o primeiro nó a transmitir uma mensagem WTC com a identificação da mensagem com falha. Para priorizar nós com menor taxa de erro de pacote, ordenamos os intervalos de tempo dos nós em relação à sua distância do nó sorvedouro, semelhante ao que foi feito em [Domingo, 2011]. Em outras palavras, o primeiro intervalo de tempo de cada quadro pertencerá ao nó mais próximo do sorvedouro. Desta forma este nó apresentará uma maior oportunidade de atuar como cooperador.

A principal deficiência desta abordagem está relacionada ao equilíbrio do consumo de energia. Os nós mais próximos do sorvedouro podem transmitir mais mensagens cooperativas do que outros nós, causando um consumo de energia desigual. Destacamos que diferentes políticas de seleção de retransmissão podem ser usadas. Por exemplo, as políticas podem considerar o nível de energia atual do nó.

### 3.2 Protocolo assíncrono

Neste trabalho desenvolvemos também um protocolo assíncrono, chamado de PCRA-A. No PCRA-A os nós não precisam sinalizar para cooperar durante um período de sinalização. Um protocolo assíncrono pode simplificar o PCRA original e aumentar a vazão de transmissão (pois não é necessário um mini-período de sinalização). Por outro lado, os nós não estão cientes de quais mensagens cada nó cooperará, o que pode levar a

mensagens duplicadas e consequente desperdício de energia.

O PCRA-A assume que os nós recebem as mensagens NACK e simplesmente escolhem aleatoriamente uma das mensagens que possui em seu *buffer* cooperativo. Nesta abordagem, a mesma mensagem que falhou pode ser retransmitida por vários nós, o que pode levar a um desperdício de energia. Por outro lado, pode aumentar o número de caminhos de transmissão e consequentemente, reduz a taxa de erro de pacotes.

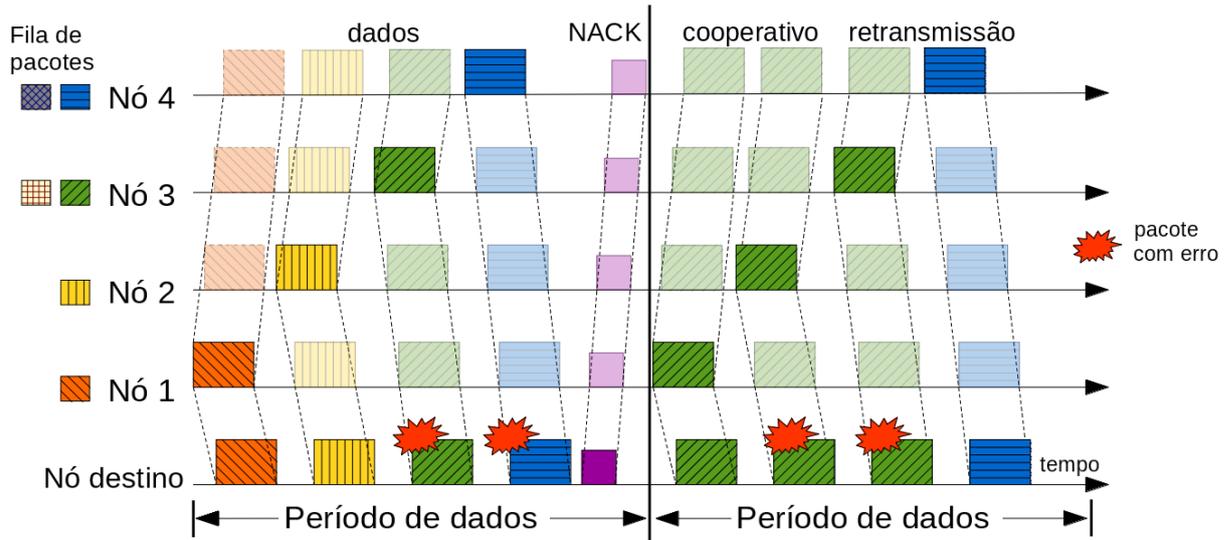


Figura 8 – Dois quadros do PCRA-A em um cenário com 5 nós.

A Figura 8 mostra o protocolo assíncrono no mesmo cenário da Figura 7: 4 nós que enviam mensagens para o nó sorvedouro ao longo de dois quadros. Observe que cada quadro contém apenas o período de dados, e não mais o período de sinalização e o período de dados. No primeiro quadro, cada nó possui uma mensagem para transmitir. No entanto, as mensagens dos nós 3 e 4 não são entregues corretamente. Ao final do quadro, o nó sorvedouro sinaliza com um NACK que as mensagens dos nós 3 e 4 falharam. No próximo quadro, os nós 1 e 2 não têm mensagens para transmitir, estando disponíveis para cooperar. Como ambos receberam o NACK e as mensagens com falha corretamente, escolhem aleatoriamente um deles para cooperar. Neste exemplo, ambos acabam selecionando a mesma mensagem. O nó 3 também retransmite sua própria mensagem falhada, totalizando três possíveis caminhos diversos.

### 3.3 Protocolo síncrono escalonado

Em protocolos que utilizam divisão por tempo, p. ex. TDMA, é necessário adicionar um tempo de guarda entre as transmissões para garantir que não ocorram colisões no recebimento. Este tempo de guarda é dependente da distância entre os nós da rede e pode ser calculado através da equação 2.8. Entretanto, este período de inatividade representa um desperdício de banda de transmissão, uma vez que nenhuma mensagem é recebida pelo

sorvedouro. Por exemplo, para uma rede disposta aleatoriamente em uma área quadrada de lado 1000 m, a maior distância possível entre dois nós é  $\approx 1414.21$  m. Utilizando a Equação 2.8, calculamos que o tempo de guarda necessário em cada período de tempo é  $\approx 0.94$  s.

Desta forma propomos o PCRA Síncrono Escalonado (PCRA-SE), uma extensão do protocolo PCRA-S que incorpora o escalonamento das transmissões. Nesse esquema cada nó calcula o seu atraso de propagação específico, baseado em sua distância do nó sorvedouro. Com essa informação o nó consegue adiantar sua transmissão para que ela seja recebida no período de tempo correto e sem colisão no sorvedouro. Por exemplo, o tempo de propagação entre um nó e o sorvedouro distantes 1.500 m será de 1 s, logo o nó deve adiantar sua transmissão em 1 s para que o pacote comece a ser recebido pelo sorvedouro exatamente no início do período de dados do nó transmissor. As Figura 9 e 10 ilustram o adiantamento da transmissão. Na primeira, é ilustrado um cenário sem o adiantamento da transmissão, em que os nós devem adicionar um período de guarda para evitar colisões no destino. Na segunda figura, os nós adiantam suas transmissões de maneira proporcional a distância do nó destino, sendo possível reduzir ou até remover o período de guarda.

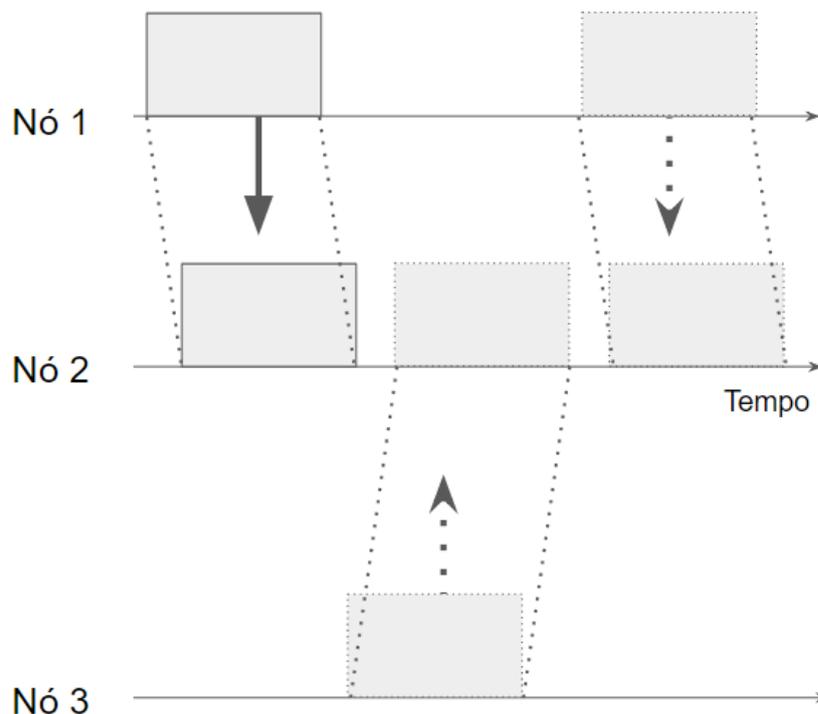


Figura 9 – Cenário sem adiantamento da transmissão.

A Figura 11 representa novamente o mesmo cenário das Figuras 7 e 8. Observe que o esquema de cooperação opera exatamente como no protocolo síncrono. Porém, uma consequência do escalonamento é a colisão de mensagens nos nós transmissores. Quanto maior a distância entre um nó transmissor e o sorvedouro, maior será o atraso de

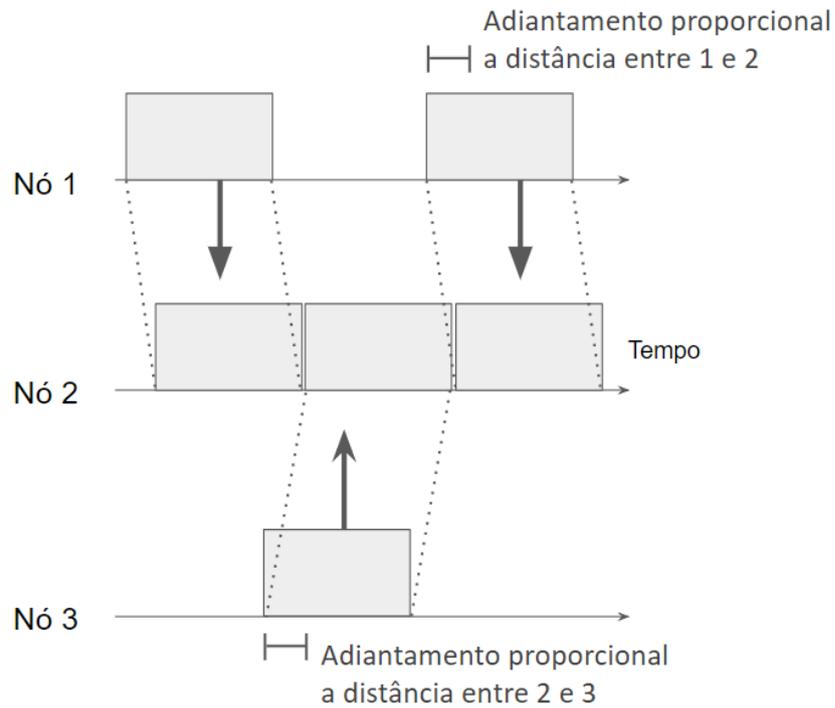


Figura 10 – Adiamento da transmissão no PCRA-SE.

propagação e maior também será o adiamento de suas transmissões. Desta forma, ao adiantar sua transmissão, esta será iniciada no período de tempo de outro nó. Durante a transmissão o nó não conseguirá receber corretamente pacotes de outros nós, impedindo de cooperar com o nó da mensagem colidida. Destacamos que este tipo de colisão não afeta a correta transmissão e recebimento das mensagens no nó sorvedouro, apenas reduz a quantidade de possíveis cooperadores. Este comportamento é analisado via simulações no Capítulo 4.

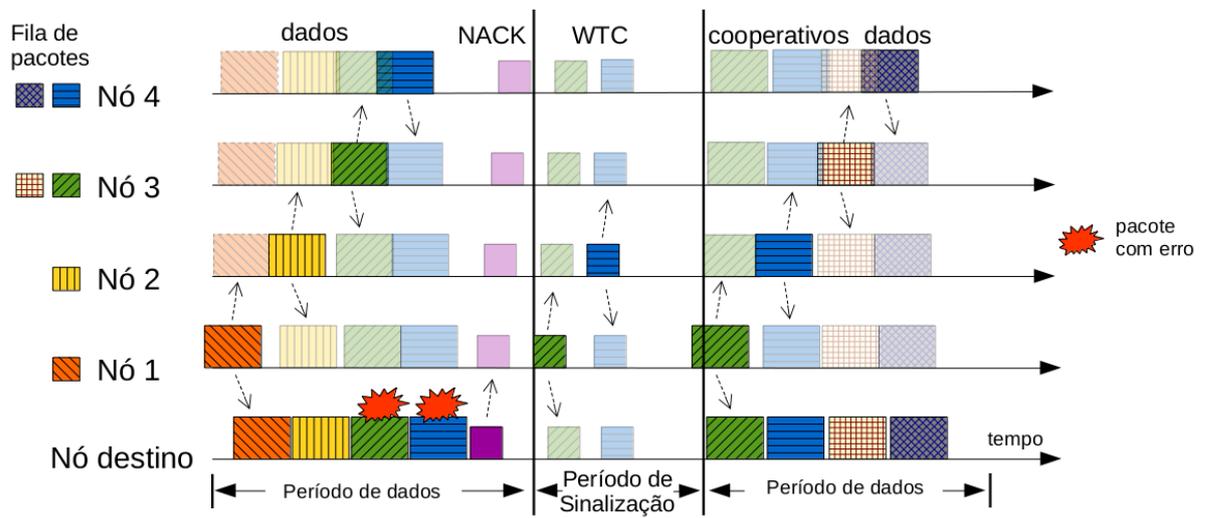


Figura 11 – Dois quadros do PCRA-SE em um cenário com 5 nós.

## 4 Avaliação do protocolo

### 4.1 Metodologia de avaliação

Nós avaliamos o PCRA através de simulações, usando o simulador de rede de eventos discretos ns-3 versão 3.27 [ns3, 2017]. Implementamos o PCRA síncrono, assíncrono, síncrono escalonado e um protocolo base TDMA sem cooperação.

Para gerar valores aleatórios, o ns-3 implementa um algoritmo baseado em fluxos e sub-fluxos. Cada fluxo gera um conjunto de sub-fluxos que não se sobrepõem. Assim, para produzir múltiplas execuções independentes, nós fixamos o fluxo escolhendo um valor para a semente e alteramos apenas o sub-fluxo para cada execução. Neste trabalho, usamos 9987 como semente e  $i$  como sub-fluxo para a  $i$ -ésima execução ( $i \in \mathbb{N}^*$ ). Cada simulação considera 10 execuções e, a menos quando citado o contrário, os resultados que apresentamos são valores médios com o intervalo de confiança, para um nível de confiança de 95%.

Nós geramos o tráfego de dados aleatoriamente de acordo com uma distribuição uniforme. Um nó pode gerar um pacote de acordo com uma probabilidade  $C$  em cada início de quadro. Chamamos essa probabilidade  $C$  de carga de rede. Em outras palavras, quando a carga de rede é  $C = 0$ , nenhum pacote é gerado em toda a simulação, e quando  $C = 1$ , todos os nós sempre terão um pacote para transmitir em cada quadro. Nós variamos  $C$  entre 10% e 100% de utilização ( $C = 0,1$  a  $C = 1$ ) para avaliar o desempenho do protocolo com diferentes cargas de rede.

Cada execução simula o funcionamento da rede durante uma hora. O tamanho dos pacotes de dados é configurado para 540 bytes, dos pacotes WTC para 3 bytes e dos pacotes NACK para 5 bytes, que estão na mesma ordem de grandeza que [Ghosh et al., 2013, Azad et al., 2013]. As configurações do transdutor são baseadas no modem acústico UNET-2 [Chitre et al., 2012]: taxa de dados de 2.400 bps, frequência central de 4.000 Hz e modulação BPSK, largura de banda de 2.000 Hz, potência de transmissão de 138 dB, consumo de energia para transmissão de pacotes de 50 W, consumo de energia para recepção de pacotes de 158 mW e consumo de energia no modo inativo de 158 mW. Os períodos de dados de cada nó apresentam duração de 2 s, com 1,8 s para transmissão de dados e 0,2 s como tempo de guarda para evitar colisões de pacotes. No período de sinalização, os intervalos de controle duram 0,2 s, tempo mínimo de propagação, segundo a Equação 2.8, o que representa apenas 10% do intervalo de dados. A Tabela 1 resume os parâmetros usados nas simulação.

Parâmetro	Valor
Número de nós	50
Número de execuções independentes	10
Tempo	2.000 s
Área	200x200 m
Profundidade	70 m
Tamanho do <i>payload</i>	537 bytes
Tamanho total do pacote de dados	540 bytes
Tamanho do WTC	3 bytes
Tamanho do NACK	5 bytes
Fator de dispersão $k$	1,5
Fator de embarcações $s$	0,5
Velocidade do vento $w$	2,0 m/s
Consumo de energia na transmissão	50 W
Consumo de energia no recebimento	158 mW
Consumo de energia inativo	158 mW
Potência de transmissão	138 dB
SNR mínimo para recepção	8
Frequência central	4 kHz
Largura de banda	2 kHz
Taxa de bits por segundo	2400
Semente PNRG	9987

Tabela 1 – Parâmetros da simulação.

## 4.2 Métricas

Uma das principais métricas usadas no estudo de protocolos MAC é a vazão. Para a avaliação dos protocolos consideramos a vazão somente dos dados úteis para RSA, ou seja, não consideramos mensagens WTC, NACK ou cabeçalhos de mensagens de dados. Desta forma, somente o *payload* das mensagens de dados recebidas corretamente pelo sorvedouro são levados em consideração. A essa métrica denominamos *goodput*.

Outra métrica importante é a latência da rede. Esta é definida como o tempo entre a entrada do pacote na fila do nó transmissor e o correto recebimento pelo nó sorvedouro. Como apontado por Shahabudeen et al. em [Shahabudeen et al., 2011], podemos aumentar a quantidade de pacotes transmitidos por período de tempo  $B$  e obter vazões cada vez maiores. Entretanto, cada período de tempo seria tão longo que a latência da rede seria degradada. Dessa forma é necessário encontrar um meio termo entre vazão e latência. Neste trabalho consideramos que cada cada nó transmite 1 pacote em seu período de tempo, ou seja,  $L = 1$ . Desta forma, para pacotes que são recebidos com sucesso na primeira transmissão, a latência será sempre a menor possível, quando comparado ao TDMA tradicional.

Adicionalmente, calculamos a taxa de erro de pacote (PER), que representa a

porcentagem de pacotes de dados que não são devidamente recebidos pelo sorvedouro. Por fim, calculamos também a energia total gasta pelo sistema, que é a soma da energia gasta por cada nó em cada uma de suas etapas de funcionamento: transmissão e recepção de pacotes e inatividade.

### 4.3 Resultados

Primeiramente apresentamos os resultados para a execução dos quatro algoritmos para os parâmetros da tabela 1. Em seguida analisamos o comportamento do protocolo ao variarmos a quantidade de nós para obter uma intuição sobre sua escalabilidade. Por último avaliamos os resultados em um cenário de maior área de cobertura, para medir o impacto do alto atraso de propagação.

A Figura 12 apresenta os valores médios da taxa de erro de pacote (e intervalo de confiança) quando variamos a carga da rede. De acordo com a Figura 12, os protocolos PCRA apresentam menor PER quando comparado ao protocolo não cooperativo para cargas de rede menores que 0,6. Por exemplo, com uma carga de rede de 10%, o PCRA-A é 74% melhor do que o TDMA não cooperativo. De fato, enquanto o primeiro apresenta média de cerca de 13% de PER, o último apresenta mais de 50%.

Analisando o cenário com baixa carga de rede (e.g.,  $< 0.3$ ), observamos que o PCRA-A é muito superior aos outros protocolos apresentando baixa taxa de erro. Neste cenário, há um grande número de nós ociosos e que estão disponíveis para cooperar. Sem a sincronização de nós e com um grande número de nós ociosos, muitos nós podem retransmitir um mesmo pacote e, como consequência, aumentar a chance de uma transmissão bem-sucedida. Nesse caso, como há um grande número de nós ociosos, todos os pacotes que falharam têm maior chance de serem retransmitidos por pelo menos um nó cooperador. Por outro lado, quando a carga da rede aumenta (e.g.,  $> 0,4$ ), o PCRA síncrono supera a versão assíncrona. Nesse caso, a sincronização evita que dois ou mais nós retransmitam o mesmo pacote, o que permite a cobertura de um número maior de pacotes distintos que precisam ser retransmitidos.

É possível observar uma tendência comum aos 3 protocolos cooperativos em que quanto maior a carga de rede, menor o ganho com a taxa de erro. De fato, quanto maior a carga de rede, menor será a chance dos nós possuírem um intervalo de tempo livre que possam oferecer para cooperação. Para cargas de rede altas (e.g.,  $> 0.8$ ) quase não há oportunidade para cooperação e os protocolos apresentam resultado semelhante.

Em cargas de rede mais baixas, o PCRA-A também apresenta melhor vazão (*goodput*) quando comparado aos outros protocolos. Como mostrado na Figura 16, o PCRA-A é, em média, 52% melhor que o TDMA não cooperativo para 10% de carga de rede. No entanto, como acontece com o PER (e pelas mesmas razões), o PCRA-S

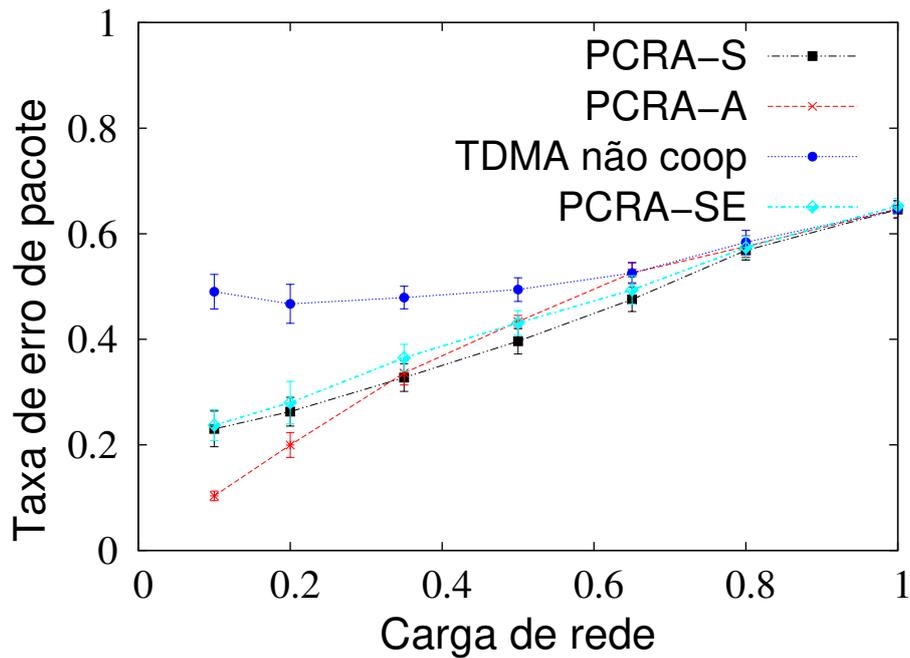


Figura 12 – Taxa de erro de pacote para 50 nós por carga de rede.

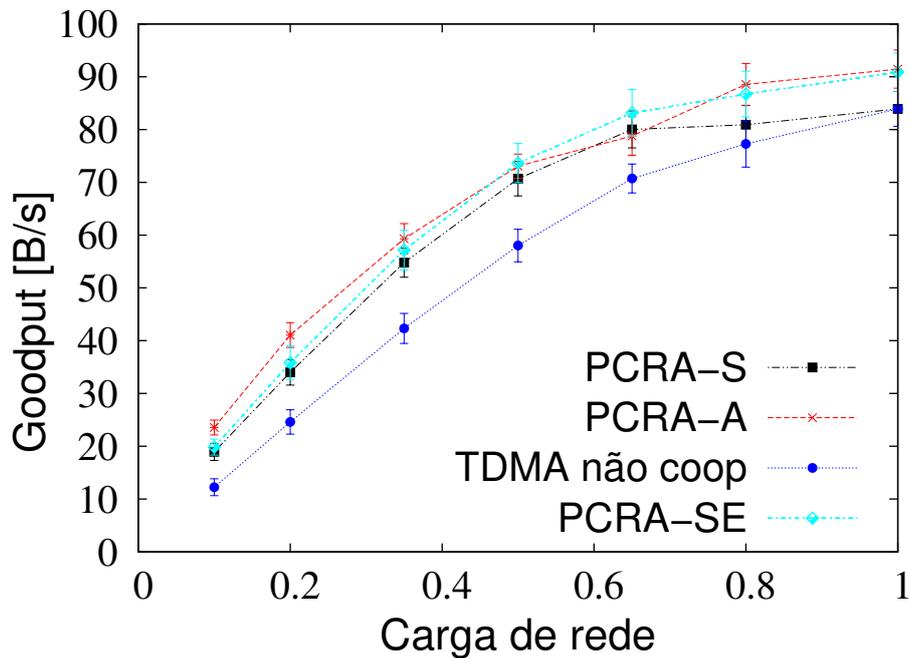


Figura 13 – *Goodput* para 50 nós por carga de rede.

apresenta melhor *goodput* quando a carga da rede aumenta.

Apesar dos ganhos em *goodput* e taxa de erro de pacote, o protocolo PCRA-A exige mais energia para seu correto funcionamento (Figura 14). De fato, quando vários nós tentam cooperar sem qualquer sincronismo, eles podem desperdiçar energia, retransmitindo o mesmo pacote de dados. De acordo com nossos resultados, com uma carga de trabalho

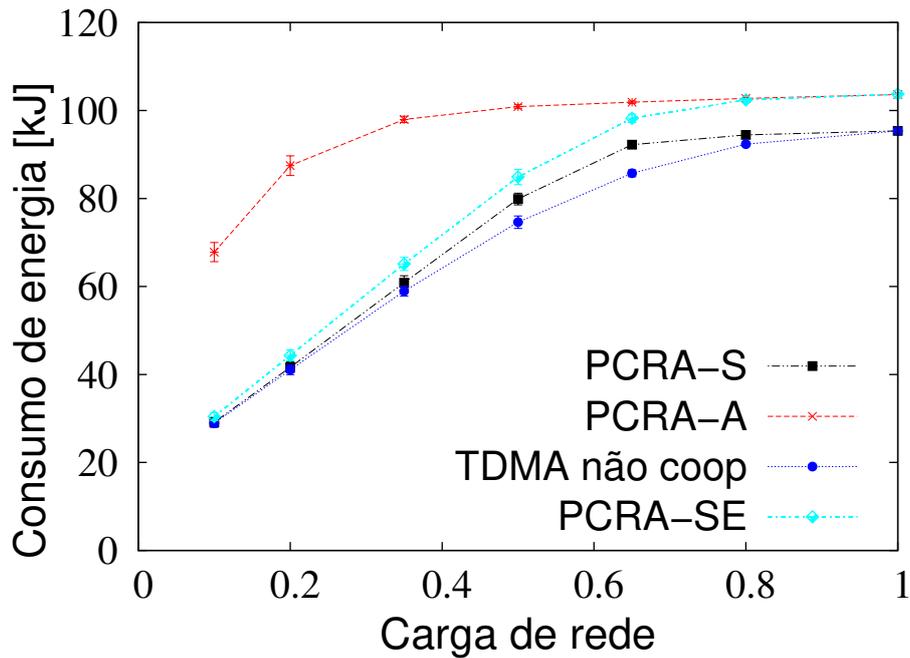


Figura 14 – Consumo de energia para 50 nós por carga de rede.

de rede de 10%, o PCRA-A consome duas vezes mais energia, quando comparado ao TDMA não cooperativo. É importante notar que nesse cenário –baixa carga de rede–, os protocolos PCRA-S e PCRA-SE apresentam melhor *goodput* e PER enquanto consomem praticamente a mesma quantidade de energia do TDMA não cooperativo.

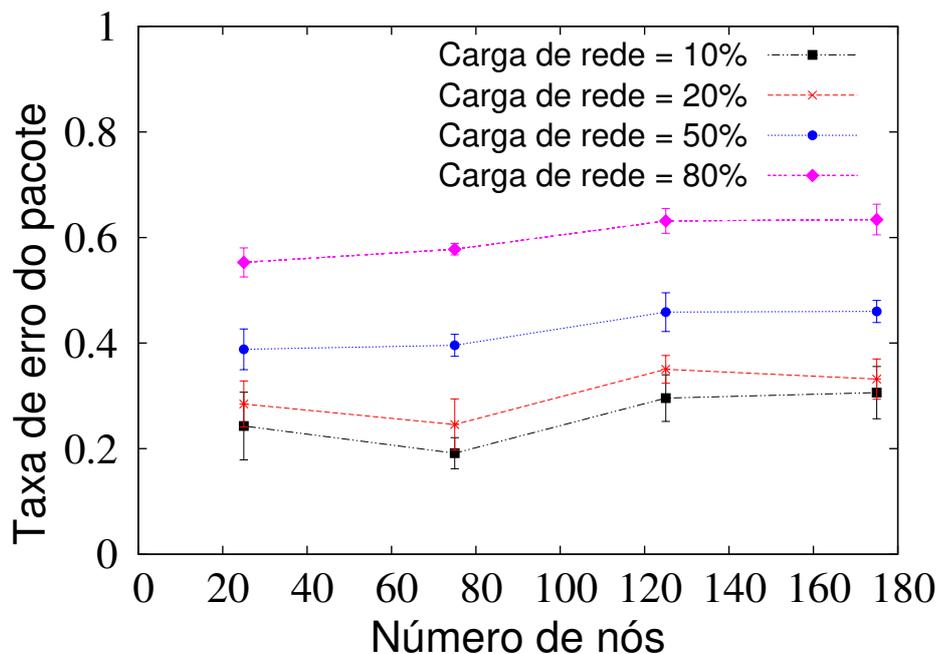


Figura 15 – PER do PCRA-S em relação ao número de nós.

As Figuras 15, 16 e 17 avaliam a escalabilidade do PCRA. Nos concentramos no

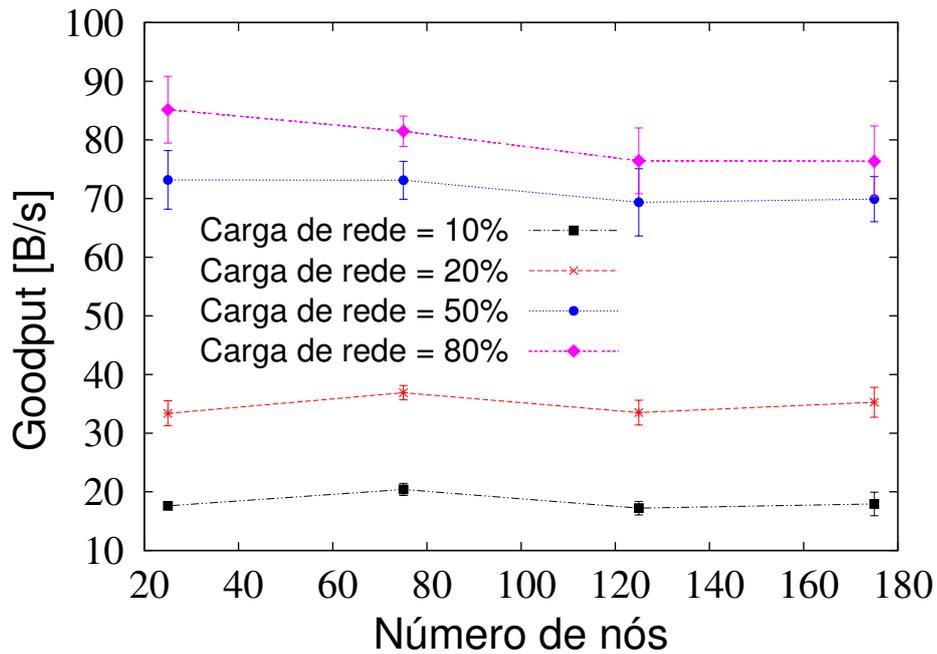


Figura 16 – *Goodput* do PCRA-S em relação ao número de nós.

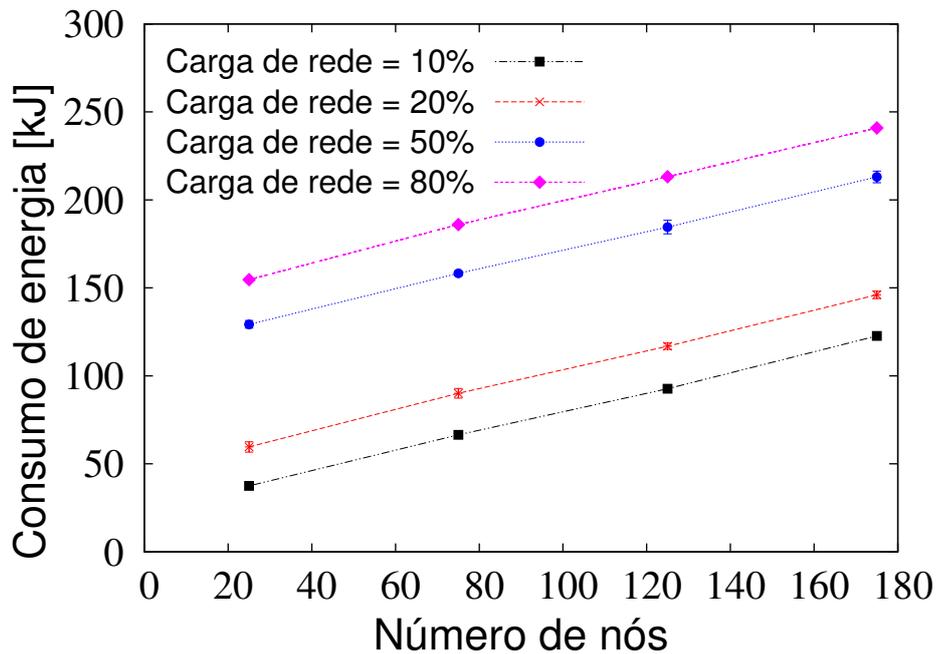


Figura 17 – Consumo de energia do PCRA-S em relação ao número de nós.

PCRA-S uma vez que a sincronização leva a uma sobrecarga (*overhead*) no protocolo que pode ser afetada pelo número de nós. De acordo com esta figura, o PER permanece aproximadamente estável –Figura 15– enquanto que o *goodput* e o consumo de energia –Figuras 16 e 17 respectivamente– aumentam ligeiramente com o número de nós da rede. Aumentar a rede também aumentará a diversidade de caminho entre os nós de origem, cooperadores e o nó destino. Por sua vez, a diversidade do caminho pode reduzir a

probabilidade de erro, o que levará a um melhor desempenho da rede. Como esperado, o consumo de energia aumenta com o número de nós de rede, mas, neste caso, notamos claramente que o consumo de energia escala. Finalmente, como afirmamos anteriormente, quanto maior a carga da rede, menor o desempenho (por exemplo, maior PER, menor *goodput* e maior consumo de energia).

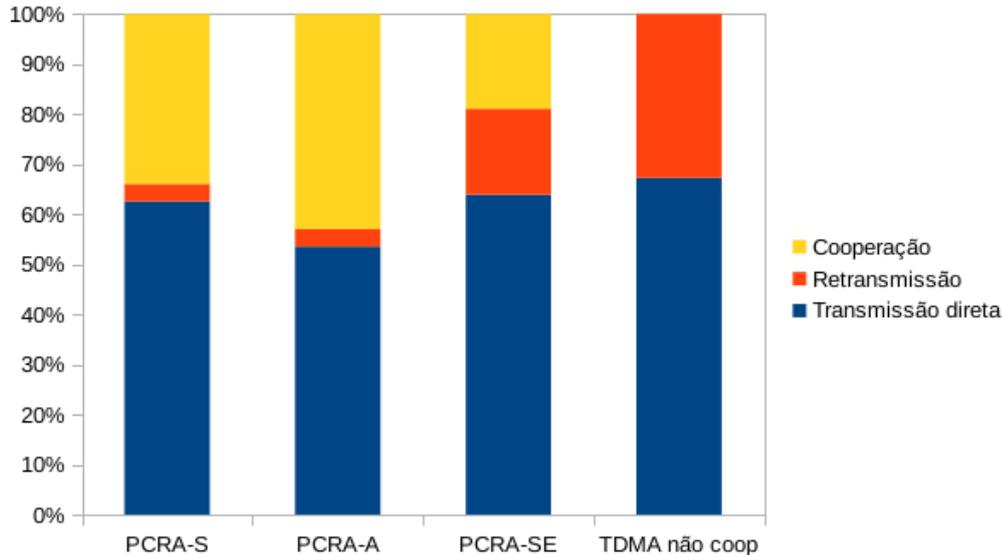


Figura 18 – Tipo de pacote enviado por protocolo

A Figura 18 mostra a quantidade proporcional de tipo de pacote enviado por cada protocolo. Nesta simulação foram considerados 50 nós e uma carga de rede de 0.5. É possível observar que o PCRA-A é o protocolo com maior índice de cooperação. Novamente, como não há um mecanismo de controle de cooperação, um pacote pode ser retransmitidas por vários nós. O protocolo escalonado, por sua vez, transmite menos pacotes cooperativos quando comparado ao PCRA-A e ao PCRA-S. Isto ocorre pois ao adiantar a transmissão de um pacote, este pode colidir em outros nós que também estão transmitindo. Desta forma, menos nós conseguem receber com sucesso uma cópia do pacote transmitido, ou seja, haverá menor probabilidade de cooperação.

Em seguida analisamos um cenário de simulação onde os nós estão em uma área maior: um quadrado de lado 1000 m. Neste cenário o parâmetro velocidade do vento foi alterado para  $w = 0$  para obtermos valores de BER semelhantes ao cenário anterior a fim de avaliar o impacto do atraso de propagação.

Em uma área maior, o atraso de propagação também será maior (Equação 2.8). Desta forma o tempo de guarda e a duração do período de sinalização devem ser atualizado correspondentemente, diminuindo a eficiência dos protocolos. A Figura 19 mostra o *goodput* deste cenário e ilustra o impacto dessas mudanças. Primeiramente, ao analisarmos a diferença entre o PCRA-A e o PCRA-S, constatamos como o uso do período de sinalização em uma rede com alto atraso de propagação pode degradar o *goodput* devido a subutilização

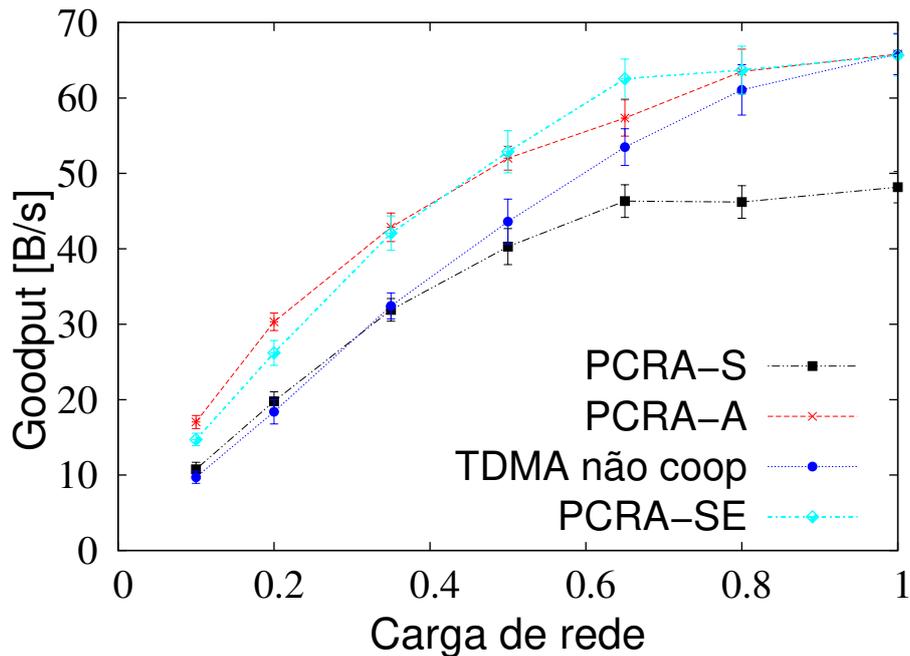


Figura 19 – *Goodput* por carga de rede para área de lado 1000 m

do canal. Ao mesmo tempo, quando comparamos o PCRA-S com o TDMA não cooperativo para cargas de rede onde há maior cooperação (e.g.,  $< 0.8$ ) e cargas de rede com pouca ou nenhuma cooperação (e.g.,  $> 0.8$ ), observamos que os ganhos com cooperação são significativos. Da mesma forma os protocolos cooperativo PCRA-A e PCRA-SE superam o TDMA tradicional na mesma faixa de carga de rede (onde há intensa cooperação). O PCRA-SE por sua vez, ao utilizar o escalonamento, obtém *goodput* comparável ao PCRA-A. Mesmo subutilizando o canal durante o período de sinalização, os ganhos com o escalonamento são justificáveis em relação ao *goodput*.

Apesar de desempenho semelhante em relação ao *goodput*, o PCRA-A e o PCRA-SE possuem gasto de energia distinto. A Figura 20 mostra o gasto energético dos protocolos no segundo cenário. Nesta figura observamos que os protocolos cooperativos que possuem sincronismo possuem melhor gasto de energia do que o PCRA-A. Desta forma, notamos que para cargas de rede  $< 0.8$  o PCRA-SE possui melhor *goodput* que os PCRA-S e o TDMA não cooperativo, e melhor consumo de energia que o PCRA-A.

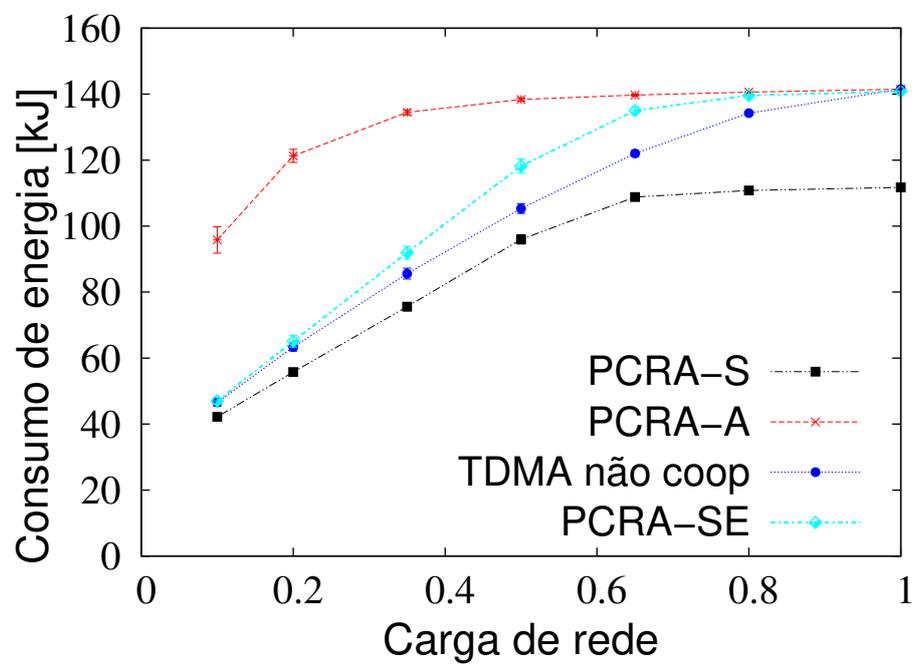


Figura 20 – Energia gasta por carga de rede para área de lado 1000 m

## 5 Trabalhos relacionados

Trabalhos anteriores, na maioria dos casos, se concentram em mostrar que a transmissão cooperativa pode ser efetivamente aplicada a redes de sensores aquáticas. Quase todas esses trabalhos surgiram como extensões de trabalho de cooperação em redes sem fio terrestres [Carbonelli and Mitra, 2006, Vajapeyam et al., 2008, Han et al., 2008a, Han et al., 2008b, Carbonelli et al., 2009, Wang et al., 2011]. Por exemplo, Carbonelli et al. [Carbonelli and Mitra, 2006] abordam a eficiência energética em um cenário de cooperação com múltiplos saltos. Vajapeyam et al. [Vajapeyam et al., 2008] apresentam um protocolo auxiliado por *relays*, que utilizam *amplify-and-forward*. Han et al. [Han et al., 2008a] também propõem um esquema de cooperação com *amplify-and-forward* e mostram que, mesmo com a presença de ruído na camada física (e sua amplificação), a qualidade das transmissões é melhorada com a cooperação.

Han et al. [Han et al., 2008b] avaliaram os efeitos dos esquemas de *amplify-and-forward*, *decode-and-forward*, e *estimate-and-forward*. Além disso, os autores apresentaram o *Wave Cooperative*, um protocolo baseado em esquema de *amplify-and-forward*. O resultado mostra que as técnicas cooperativas apresentam melhor desempenho do que os protocolos sem qualquer cooperação. Além disso, sua nova abordagem apresenta desempenho superior da capacidade do canal. Wang et al. [Wang et al., 2011], propõem um esquema de cooperação assíncrona, aplicável em cenários com atraso de propagação grande e variável. Os autores compararam os esquemas *amplify-and-forward*, *decode-and-forward* e a transmissão direta. Os autores mostram que a melhoria de cada técnica depende das condições de relação sinal-ruído (SNR). Por exemplo, a transmissão direta tem um melhor resultado para condições de SNR ótimas, enquanto o esquema de *amplify-and-forward* apresenta um melhor desempenho para cenários com condições de SNR ruins.

Alguns trabalhos [Tu et al., 2010, Rahmati and Duman, 2014] exploram a cooperação em um sistema baseado em MIMO e OFDM. Porém, eles se concentraram na camada física. Além disso, eles não exploram esquemas ARQ.

Uma série de trabalhos utilizam conjuntamente esquemas ARQ e transmissões cooperativas [Lee et al., 2010a, Lee and Cho, 2011, Ghosh et al., 2013]. Por exemplo, Lee et al. [Lee et al., 2010a] propõem um esquema cooperativo S&W ARQ em um canal acústico de salto único. Quando o nó de destino recebe um pacote errado, ele solicita uma retransmissão para o nó cooperativo. O protocolo recruta os nós mais próximos primeiro como *relays* e, neste caso, os autores assumem que cada nó conhece a distância inter-nó para seus nós vizinhos. Lee et al. [Lee and Cho, 2011] propõem o uso do protocolo cooperativo em um cenário com múltiplo salto, que neste caso melhora a diversidade espacial da comunicação. Ghosh et al. [Ghosh et al., 2013] também propõem um protocolo

cooperativo, mas neste caso, os autores propõem o uso do ARQ cooperativo e do ARQ Híbrido, onde os dados são codificados com um código FEC e os bits FEC redundantes são transmitidos juntamente com o dados ou solicitados pelo destino quando os erros são detectados. Apesar de sua importância, esses três trabalhos consideram apenas cenários simples, onde apenas um nó origina mensagens. Além disso, os problemas da camada são ignorados ou assumidos como resolvidos.

Kim et al. [Kim and Cho, 2016] consideram um protocolo MAC baseado em *handshake* com um esquema ARQ cooperativo. O processo de *handshaking* é baseado no mecanismo de *request-to-send* e *clear-to-send* e as informações de cooperação são compartilhadas durante este processo. Apesar da melhoria de desempenho, sua abordagem apresenta um grande número de mensagens de controle, o que pode causar mais colisões e também prolongar a duração do processo de *handshaking*, diminuindo a vazão do sistema.

Em suma, diferentes dos trabalhos anteriores, que focam suas soluções em esquemas de camada física e *amplify-and-forward*, levamos em consideração a camada MAC e seus problemas. Nossa abordagem coordena efetivamente a retransmissão de mensagens erradas quando mais de um nó compartilha o meio, usando o acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA). Além disso, exploramos dinamicamente os nós do sistema como cooperadores de forma síncrona ou assíncrona bem como um esquema de escalonamento de mensagens.

## 6 Conclusões

Neste trabalho, discutimos a comunicação cooperativa na camada de controle de acesso ao meio para redes de sensores aquáticas. Nós propomos o PCRA, um novo protocolo MAC cooperativo para RSAs. Nossa técnica de cooperação é baseada em um esquema de *automatic repeat request* com *selective repeat* e incorpora a sinalização de erros e a retransmissão de mensagens no controle de acesso ao meio. Os nós que, de outra forma, ficariam ociosos, são responsáveis pela retransmissão de mensagens que falharam. Apresentamos também um esquema de escalonamento que permite os nós adiantarem suas transmissões baseado em sua distância em relação ao sorvedouro. Nossos resultados de simulação mostram uma melhora nas métricas de taxa de perda de pacotes e *goodput*, com pequeno impacto no consumo de energia. Mais especificamente, o PCRA assíncrono alcança uma redução de 74% na taxa de perda de pacotes no melhor dos casos. O protocolo proposto funciona melhor em cargas de rede médias a baixas, o que corresponde à maioria das aplicações de redes de sensores aquáticos [Tomasi et al., 2015]. Ainda assim, o protocolo é capaz de manter ganhos em cargas de rede mais altas. Em um cenário onde a área de cobertura da rede é maior, observamos o impacto do atraso de propagação no desempenho da rede. Os protocolos que usam período de guarda tiveram resultado inferior em relação ao protocolo escalonado quando analisamos conjuntamente as métricas de *goodput* e energia.

Trabalhos futuros incluem o estudo de diferentes técnicas de seleção de nós cooperadores, bem como a cooperação usando outros protocolos MAC, o impacto da mobilidade dos nós no funcionamento do PCRA, além da implementação das propostas em um ambiente real.

## REFERÊNCIAS

- [ns3, 2017] (2017). ns-3. <https://www.nsnam.org/>. Accessed: 2017-09-27.
- [Akyildiz et al., 2004] Akyildiz, I. F., Pompili, D., and Melodia, T. (2004). Challenges for efficient communication in underwater acoustic sensor networks. *ACM Sigbed Review*, 1(2):3–8.
- [Akyildiz et al., 2005] Akyildiz, I. F., Pompili, D., and Melodia, T. (2005). Underwater acoustic sensor networks: research challenges. *Ad hoc networks*, 3(3):257–279.
- [Anjangi and Chitre, 2015] Anjangi, P. and Chitre, M. (2015). Design and implementation of super-tdma: A mac protocol exploiting large propagation delays for underwater acoustic networks. In *Proc. of the 10th International Conference on Underwater Networks & Systems*. ACM.
- [Azad et al., 2011] Azad, S., Casari, P., Guerra, F., and Zorzi, M. (2011). On arq strategies over random access protocols in underwater acoustic networks. In *Proc. of IEEE OCEANS*.
- [Azad et al., 2013] Azad, S., Casari, P., and Zorzi, M. (2013). The underwater selective repeat error control protocol for multiuser acoustic networks: Design and parameter optimization. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(10):4866–4877.
- [Basagni et al., 2015] Basagni, S., Petrioli, C., Petroccia, R., and Spaccini, D. (2015). Carp: A channel-aware routing protocol for underwater acoustic wireless networks. *Ad Hoc Networks*, 34:92–104.
- [Brekhovskikh et al., 1991] Brekhovskikh, L. M., Lysanov, Y. P., and Beyer, R. T. (1991). Fundamentals of ocean acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 90(6):3382–3383.
- [Burrowes and Khan, 2011] Burrowes, G. and Khan, J. Y. (2011). Short-range underwater acoustic communication networks. In *Autonomous Underwater Vehicles*. InTech.
- [Carbonelli et al., 2009] Carbonelli, C., Chen, S.-H., and Mitra, U. (2009). Error propagation analysis for underwater cooperative multi-hop communications. *Ad Hoc Networks*, 7(4):759–769.
- [Carbonelli and Mitra, 2006] Carbonelli, C. and Mitra, U. (2006). Cooperative multihop communication for underwater acoustic networks. In *Proc. of the 1st ACM international workshop on Underwater networks*.
- [Cerqueira et al., 2017] Cerqueira, L. S., da Silva, F. R., Vieira, L. F., Vieira, M., Nacif, J. A., and Vieira, A. B. (2017). Um protocolo cooperativo para acesso ao meio em redes de sensores aquáticas sem fio. In *Proc. of SBRC - WoSiDA*.
- [Chirdchoo et al., 2008] Chirdchoo, N., Soh, W.-S., and Chua, K. C. (2008). Mu-sync: a time synchronization protocol for underwater mobile networks. In *Proc. of the third ACM international workshop on Underwater Networks*, pages 35–42. ACM.
- [Chitre et al., 2008] Chitre, M., Shahabudeen, S., and Stojanovic, M. (2008). Underwater acoustic communications and networking: Recent advances and future challenges. *Marine technology society journal*, 42(1):103–116.

- [Chitre et al., 2012] Chitre, M., Topor, I., and Koay, T.-B. (2012). The unet-2 modem—an extensible tool for underwater networking research. In *Proc. of IEEE OCEANS*.
- [Coutinho et al., 2015] Coutinho, R. W., Boukerche, A., Vieira, L. F., and Loureiro, A. A. (2015). Modeling and analysis of opportunistic routing in low duty-cycle underwater sensor networks. In *Proc. of the 18th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*.
- [Coutinho et al., 2016a] Coutinho, R. W., Boukerche, A., Vieira, L. F., and Loureiro, A. A. (2016a). Geographic and opportunistic routing for underwater sensor networks. *IEEE Transactions on Computers*, 65(2):548–561.
- [Coutinho et al., 2013] Coutinho, R. W., Vieira, L. F. M., and Loureiro, A. A. F. (2013). DCR: Depth-controlled routing protocol for underwater sensor networks. In *Proc. of the IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*.
- [Coutinho et al., 2014] Coutinho, R. W. L., Boukerche, A., Vieira, L. F. M., and Loureiro, A. A. F. (2014). GEDAR: geographic and opportunistic routing protocol with depth adjustment for mobile underwater sensor networks. In *Proc. of the IEEE International Conference on Communications (ICC)*.
- [Coutinho et al., 2016b] Coutinho, R. W. L., Boukerche, A., Vieira, L. F. M., and Loureiro, A. A. F. (2016b). Design guidelines for opportunistic routing in underwater networks. *IEEE Communications Magazine*, 54(2):40–48.
- [Cui et al., 2006] Cui, J.-H., Kong, J., Gerla, M., and Zhou, S. (2006). The challenges of building mobile underwater wireless networks for aquatic applications. *Ieee Network*, 20(3):12–18.
- [De et al., 2011] De, S., Mandal, P., and Chakraborty, S. S. (2011). On the characterization of aloha in underwater wireless networks. *Mathematical and Computer Modelling*, 53(11-12):2093–2107.
- [Demirors et al., 2014] Demirors, E., Sklivanitis, G., Santagati, G. E., Melodia, T., and Batalama, S. N. (2014). Design of a software-defined underwater acoustic modem with real-time physical layer adaptation capabilities. In *Proc. of the ACM Int. Conference on Underwater Networks & Systems*.
- [Domingo, 2011] Domingo, M. C. (2011). A distributed energy-aware routing protocol for underwater wireless sensor networks. *Wireless Personal Communications*, 57(4):607–627.
- [Felemban et al., 2015] Felemban, E., Shaikh, F. K., Qureshi, U. M., Sheikh, A. A., and Qaisar, S. B. (2015). Underwater sensor network applications: A comprehensive survey. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(11):896832.
- [Fullmer and Garcia-Luna-Aceves, 1995] Fullmer, C. L. and Garcia-Luna-Aceves, J. (1995). Floor acquisition multiple access (fama) for packet-radio networks. In *ACM SIGCOMM computer communication review*, volume 25, pages 262–273. ACM.
- [Ganeriwal et al., 2003] Ganeriwal, S., Kumar, R., and Srivastava, M. B. (2003). Timing-sync protocol for sensor networks. In *Proc. of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 138–149. ACM.

- [Ghosh et al., 2013] Ghosh, A., Lee, J.-W., and Cho, H.-S. (2013). Throughput and energy efficiency of a cooperative hybrid arq protocol for underwater acoustic sensor networks. *Sensors*, 13(11):15385–15408.
- [Gibson et al., ] Gibson, J., Larraza, A., Rice, J., Smith, K., and Xie, G. On the impacts and benefits of implementing full-duplex communications links in an underwater acoustic network.
- [Han et al., 2008a] Han, J.-W., Ju, H.-J., Kim, K.-M., Chun, S.-Y., and Dho, K.-C. (2008a). A study on the cooperative diversity technique with amplify and forward for underwater wireless communication. In *Proc. of IEEE OCEANS*.
- [Han et al., 2008b] Han, Z., Sun, Y. L., and Shi, H. (2008b). Cooperative transmission for underwater acoustic communications. In *Proc. of the IEEE International Conference on Communications*.
- [Heidemann et al., 2012] Heidemann, J., Stojanovic, M., and Zorzi, M. (2012). Underwater sensor networks: applications, advances and challenges. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 370(1958):158–175.
- [Heidemann et al., 2006] Heidemann, J., Ye, W., Wills, J., Syed, A., and Li, Y. (2006). Research challenges and applications for underwater sensor networking. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006. IEEE*, pages 228–235. IEEE.
- [Jayasuriya et al., 2004] Jayasuriya, A., Perreau, S., Dadej, A., Gordon, S., et al. (2004). *Hidden vs exposed terminal problem in ad hoc networks*. PhD thesis, ATNAC 2004.
- [Jiang, 2018] Jiang, S. (2018). On reliable data transfer in underwater acoustic networks: A survey from networking perspective. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(2):1036–1055.
- [Jurdak et al., 2004] Jurdak, R., Lopes, C. V., and Baldi, P. (2004). A survey, classification and comparative analysis of medium access control protocols for ad hoc networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 6(1).
- [Karn et al., 1990] Karn, P. et al. (1990). Maca-a new channel access method for packet radio. In *ARRL/CRRL Amateur radio 9th computer networking conference*, volume 140, pages 134–140.
- [Kebkal et al., 2016] Kebkal, K. G., Kebkal, V. K., Kebkal, O. G., and Petroccia, R. (2016). Underwater acoustic modems (s2cr series) for synchronization of underwater acoustic network clocks during payload data exchange. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 41(2):428–439.
- [Khan and Karl, 2014] Khan, R. A. M. and Karl, H. (2014). Mac protocols for cooperative diversity in wireless lans and wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(1):46–63.
- [Kim and Cho, 2016] Kim, H.-w. and Cho, H.-S. (2016). A cooperative arq-based mac protocol for underwater wireless sensor networks. In *Proc. of the 11th ACM International Conference on Underwater Networks & Systems*.

- [Kredo II et al., 2009] Kredo II, K., Djukic, P., and Mohapatra, P. (2009). Stump: Exploiting position diversity in the staggered tdma underwater mac protocol. In *Proc. of the IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, pages 2961–2965. IEEE.
- [Lanbo et al., 2008] Lanbo, L., Shengli, Z., and Jun-Hong, C. (2008). Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 8(8):977–994.
- [Laneman et al., 2004] Laneman, J. N., Tse, D. N., and Wornell, G. W. (2004). Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. *IEEE Trans. on Information theory*, 50(12):3062–3080.
- [Lee et al., 2010a] Lee, J. W., Cheon, J. Y., and Cho, H.-S. (2010a). A cooperative arq scheme in underwater acoustic sensor networks. In *Proc. of IEEE OCEANS*.
- [Lee and Cho, 2011] Lee, J. W. and Cho, H.-S. (2011). A cooperative arq scheme for multi-hop underwater acoustic sensor networks. In *Underwater Technology (UT), 2011 IEEE Symposium on and 2011 Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies (SSC)*.
- [Lee et al., 2010b] Lee, U., Wang, P., Noh, Y., Vieira, L. F. M., Gerla, M., and Cui, J.-H. (2010b). Pressure routing for underwater sensor networks. In *Proc. of the IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*.
- [Li et al., 2009] Li, B., Huang, J., Zhou, S., Ball, K., Stojanovic, M., Freitag, L., and Willett, P. (2009). MIMO-OFDM for high-rate underwater acoustic communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 34(4):634–644.
- [Lurton, 2002] Lurton, X. (2002). *An introduction to underwater acoustics: principles and applications*. Springer Science & Business Media.
- [Maróti et al., 2004] Maróti, M., Kusy, B., Simon, G., and Lédeczi, Á. (2004). The flooding time synchronization protocol. In *Proc. of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 39–49. ACM.
- [National Oceanic and Atmospheric Administration, 2017] National Oceanic and Atmospheric Administration (2017). How much of the ocean have we explored? <http://oceanservice.noaa.gov/facts/exploration.html>.
- [Parrish et al., 2008] Parrish, N., Tracy, L., Roy, S., Arabshahi, P., and Fox, W. L. (2008). System design considerations for undersea networks: Link and multiple access protocols. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 26(9).
- [Pinto et al., 2012] Pinto, D., Viana, S. S., Nacif, J. A. M., Vieira, L. F., Vieira, M. A., Vieira, A. B., and Fernandes, A. O. (2012). Hydronode: a low cost, energy efficient, multi purpose node for underwater sensor networks. In *Proc. of the IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN)*.
- [Rahmati and Duman, 2014] Rahmati, M. and Duman, T. M. (2014). Achieving delay diversity in asynchronous underwater acoustic (uwa) cooperative communication systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13(3):1367–1379.

- [Rappaport et al., 1996] Rappaport, T. S. et al. (1996). *Wireless communications: principles and practice*, volume 2. prentice hall PTR New Jersey.
- [Renner and Golkowski, 2016] Renner, C. and Golkowski, A. J. (2016). Acoustic modem for micro auvs: design and practical evaluation. In *Proc. of the ACM International Conference on Underwater Networks & Systems*.
- [Shahabudeen et al., 2011] Shahabudeen, S., Chitre, M., and Motani, M. (2011). Mac protocols that exploit propagation delay in underwater networks. In *Proc. of IEEE OCEANS*, pages 1–6. IEEE.
- [Sozer et al., 2000] Sozer, E. M., Stojanovic, M., and Proakis, J. G. (2000). Underwater acoustic networks. *IEEE journal of oceanic engineering*, 25(1):72–83.
- [Stojanovic, 2007] Stojanovic, M. (2007). On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 11(4):34–43.
- [Stojanovic, 2008] Stojanovic, M. (2008). Underwater acoustic communications: Design considerations on the physical layer. In *Proc. of the fifth annual conference on Wireless on Demand Network Systems and Services WONS*, pages 1–10. IEEE.
- [Stojanovic and Preisig, 2009] Stojanovic, M. and Preisig, J. (2009). Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization. *IEEE Communications Magazine*, 47(1):84–89.
- [Syed et al., 2006] Syed, A. A., Heidemann, J. S., et al. (2006). Time synchronization for high latency acoustic networks. In *Proc. of the IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*.
- [Syed et al., 2007] Syed, A. A., Ye, W., Heidemann, J., and Krishnamachari, B. (2007). Understanding spatio-temporal uncertainty in medium access with aloha protocols. In *Proc. of the second workshop on Underwater networks*, pages 41–48. ACM.
- [Tomasi et al., 2015] Tomasi, B., Casari, P., Badia, L., and Zorzi, M. (2015). Cross-layer analysis via markov models of incremental redundancy hybrid arq over underwater acoustic channels. *Ad Hoc Networks*, 34:62–74.
- [Tu et al., 2010] Tu, K., Duman, T. M., Proakis, J. G., and Stojanovic, M. (2010). Cooperative mimo-ofdm communications: Receiver design for doppler-distorted underwater acoustic channels. In *Proc. of the forty fourth asilomar conference on Signals, systems and computers (ASILOMAR)*. IEEE.
- [Urlick, 1975] Urlick, R. J. (1975). Principles of underwater sound-2.
- [Vajapeyam et al., 2008] Vajapeyam, M., Vedantam, S., Mitra, U., Preisig, J. C., and Stojanovic, M. (2008). Distributed space-time cooperative schemes for underwater acoustic communications. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 33(4):489–501.
- [Viana et al., 2015] Viana, S. S., Vieira, L. F., Vieira, M. A., Nacif, J. A. M., and Vieira, A. B. (2015). Survey on the design of underwater sensor nodes. *Design Automation for Embedded Systems*, pages 1–20.

- [Vieira et al., 2010] Vieira, L., Loureiro, A., Fernandes, A., and Campos, M. (2010). Redes de sensores aquáticas. *XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos, Gramado, RS, Brasil*, 1:199–240.
- [Vieira, 2012] Vieira, L. F. M. (2012). Performance and trade-offs of opportunistic routing in underwater networks. In *Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*.
- [Vieira et al., 2006] Vieira, L. F. M., Kong, J., Lee, U., and Gerla, M. (2006). Analysis of aloha protocols for underwater acoustic sensor networks. *Extended abstract from WUWNet*, 6.
- [Wang et al., 2011] Wang, P., Feng, W., Zhang, L., and Li, V. O. (2011). Asynchronous cooperative transmission in underwater acoustic networks. In *Proc. of IEEE Symposium on Underwater Technology (UT), and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies (SSC)*.
- [Wenz, 1962] Wenz, G. M. (1962). Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(12):1936–1956.
- [Wills et al., 2006] Wills, J., Ye, W., and Heidemann, J. (2006). Low-power acoustic modem for dense underwater sensor networks. In *Proc. of the 1st ACM international workshop on Underwater networks*, pages 79–85. ACM.
- [Zhou et al., 2015] Zhou, Z., Yao, B., Xing, R., Shu, L., and Bu, S. (2015). E-carp: An energy efficient routing protocol for uwsns in the internet of underwater things. *IEEE Sensors Journal*, PP(99):1–1.