

# HydroNode: Uma rede de sensores aquáticos de baixo custo e consumo

Sadraque S. Viana<sup>‡</sup>, Lucas B. Silva<sup>†</sup>, Angélica S. Lima<sup>†</sup>, Alex B. Vieira<sup>ψ</sup>, Luiz F. M. Vieira<sup>‡</sup>,  
Marcos A. M. Vieira<sup>‡</sup>, Antônio O. Fernandes<sup>‡</sup>, José Augusto M. Nacif<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Universidade Federal de Viçosa, Campus UFV-Florestal  
Florestal, MG, Brasil, 35690-000

Email: {lucas.braganca, angelica.santos, jnacif}@ufv.br

<sup>ψ</sup>Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Juiz de Fora  
Juiz de Fora, MG, Brasil 36036-900

Email: alex.borges@ufjf.edu.br

<sup>‡</sup>Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais  
Belo Horizonte, MG, Brasil 31270-901

Email: {lfvieira, mmvieira, otavio}@dcc.ufmg.br

**Resumo**—A pesquisa de redes de sensores aquáticos (RSAs) está ganhando atenção devido às aplicações em vários cenários, como na preservação do ecossistema, prevenção de desastres ambientais, exploração de petróleo e gás e monitoramento de reservatórios de água doce. Os principais elementos de uma RSA são os nós sensores aquáticos (NSAs). Neste artigo será apresentado o HydroNode, um NSA de baixo custo e consumo de energia. Atualmente não existe nenhum NSA com essas características que suporte diversos tipos de sensores e que esteja disponível para pesquisa. O objetivo deste projeto é preencher esta lacuna apresentando um NSA que possa ser utilizado em diversas aplicações de redes de nós sensores aquáticos (RNSA). Para a construção do HydroNode foram utilizados itens de prateleira, o que facilita a manutenção e reduz o custo do nó. Uma rede formada por nós HydroNode quando comparada a redes de sensores aquáticos comerciais, apresenta custo de 5 a 10 vezes menor. Além disso, o HydroNode possui autonomia de até 150 dias para aquisição de dados e operações de transmissão. Por fim, este trabalho apresenta uma arquitetura de nó para RNSAs que reduz o custo para grandes implantações. O HydroNode pode ser utilizado em diversas configurações de RSAs, tornando-se versátil tanto na pesquisa de protocolos de comunicação para redes de sensores aquáticas quanto em aplicações de uso geral.

## I. INTRODUÇÃO

Redes de sensores aquáticos (RSAs) é uma importante área de pesquisa que vem atraindo interesse da comunidade de pesquisa e também da indústria. Oceanos, rios e lagos são fundamentais para a vida em nosso planeta, o monitoramento desses ambientes é uma tarefa difícil e dispendiosa. Assim, há um grande número de aplicações nas quais as RSAs são importantes, como a preservação do ecossistema, preservação de desastres em reservas ambientais, exploração de petróleo e gás e gestão de reservatórios de água doce [1], [2].

Em oceanografia, por exemplo, podem-se utilizar os dados obtidos pelas RSAs para inferir e prever diversas características do ambiente. Os dados recolhidos também podem ser utilizados para evitar possíveis riscos para a navegação [3]. Além disso, as RSAs militares, podem ser utilizadas para reconhecer submarinos a fim de prevenir eventuais ataques [4]. Também podem auxiliar na localização de minas submarinas. As RSAs podem beneficiar a área industrial, ajudando no controle e monitoramento submarino de tubos e máquinas de pesca [5]. E, por fim, as RSAs podem ser utilizadas como um novo sistema de medição no setor de energia. Por exemplo, uma RSA pode monitorar e detectar mexilhões ouro e amêijoas da china, que infectam barragens das hidrelétricas brasileiras podendo causar

prejuízos e desequilíbrio ambiental [6]. Uma RNSA é formada por diversos nós sensores autônomos. Um nó sensor aquático (NSA) pode detectar características do ambiente, coletar dados e se comunicar com outros nós. Um dos principais desafios da implantação de uma rede de nós sensores aquáticos é o desenvolvimento do nó, incluindo o seu elevado custo quando comparado a nós sensores terrestres. A maioria das arquiteturas de hardware dos nós de uma rede de sensores objetivam aplicações específicas. Pesquisadores necessitam de uma plataforma unificada para testar o desempenho prático de protocolos de rede.

Neste artigo é apresentado o HydroNode: um nó para rede de nós sensores aquáticos de baixo custo e consumo de energia. O objetivo do projeto HydroNode é preencher a lacuna da área de rede de sensores aquáticos, na qual não existe uma NSA que seja simultaneamente de baixo custo, baixo consumo de energia, capaz de suportar diversos tipos de sensores e que esteja disponível para pesquisa. O nó sensor proposto é constituído por módulos de energia, aquisição, processamento e comunicação [7]. Estas unidades podem ser facilmente aplicadas a diversos cenários.

O HydroNode é constituído de itens de prateleira. Esta abordagem reduz os custos para a construção de nós sensores. Em comparação com uma NSA comercial, o HydroNode apresenta custo de 5 à 10 vezes menor. Além disso, alcança até 150 dias de autonomia, devido às operações de aquisição e transmissão de dados programados por algoritmos eficientes. Também apresenta uma arquitetura de nó sensores para RNAs que pode reduzir os custos para grandes implementações. Por exemplo, neste artigo também é discutido uma aplicação de *e-limnologia*, que é a ciência que estuda a dinâmica biológica de reservatórios de água doce [8] com o auxílio de dispositivos eletrônicos. As principais contribuições deste trabalho são:

- 1) Fornecer uma descrição completa sobre o baixo consumo e baixo custo do nó sensor aquático para uma aplicação real;
- 2) Desenvolver uma estação de sensor completo, incluindo uma boia que permite a mobilidade do nó sensor no eixo vertical;
- 3) Apresentar unidades básicas do nó com aplicação real no campo de *e-limnologia*;
- 4) Discutir a arquitetura RSA e mostrar os benefícios do uso de nós sensores com comunicação aquática.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: Na Seção II, são descritos os trabalhos relacionados. Na Seção III é apresentado o HydroNode e suas unidades básicas. Na Seção IV, é apresentada a plataforma flutuante usada na aplicação de *e-limnologia*. Na Seção V, são apresentados os resultados relacionados com o custo do nó e consumo de energia, bem como o projeto da arquitetura da RSA. Por fim, a Seção VI apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

Durante as últimas décadas, a pesquisa sobre preservação de ambientes aquáticos tem atraído a atenção da comunidade científica. A importância da água, essencial para a vida, estimula o interesse em avanços no mapeamento, monitoramento e técnicas de vigilância. Esta seção, apresenta as redes de sensores aquáticos atuais, descrevendo especialmente questões relacionadas ao desenvolvimento dos nós sensores aquáticos. Aspectos de projeto de RSAs são amplamente discutidos por [4]. Akyildiz *et al.* [3] demonstram os desafios de desenvolver protocolos nas camadas de rede. Uma maneira de aperfeiçoar uma RSA é estudar as particularidades da camada física MAC. Os protocolos de comunicação em ambientes submarinos são apresentados por [9]. No entanto, apesar das valiosas contribuições para o estudo de uma RSA, nenhum dos trabalhos mencionados concentra-se no desenvolvimento dos NSAs.

Recentemente, Wen-Yaw *et al.* [10] apresentam um sistema de monitoramento da qualidade da água. No entanto, a comunicação é realizada por meio do ar, com módulos de rádio frequência. Neste caso, apenas os sensores estão em contato com a água. Dessa forma, o seu processamento e a comunicação das unidades não estão imersos. Esta característica implica em restrições quanto à profundidade de operação do sensor, devido às limitações de propagação por meio de um cabo.

Em [11], é descrita uma arquitetura de nós sensores para sistemas de monitoramento. Nesta aplicação, os sensores estão imersos e todos os dados recolhidos são enviados por meio de cabos até uma boia, que possui um módulo de comunicação sem fio. Este trabalho concentra-se principalmente em como a distribuição de nós afeta o desempenho da rede.

Yang *et al.* [12] apresentam um protótipo de um nó sensor aquático. O nó suporta apenas um tipo de sensor, restringindo seu uso em outras aplicações para RSAs. Yang *et al.* [13] apresentam um nó sensor aquático completo, proporcionando a aquisição de dados e comunicação aquática. A transmissão dos dados lidos do sensor é realizada durante intervalos de tempo fixos, o nó hiberna após a transmissão. Infelizmente, o sistema não está testado com sensores reais, a taxa de transferência de dados não é especificada, e os resultados de propagação e atenuação de sinal não são discutidos, impossibilitando a análise da comunicação.

Um nó sensor aquático de baixo custo é apresentado por [14]. O nó utiliza dois protocolos MAC diferentes e obtém uma taxa de transferência de dados de 8 bps, mas o intervalo de valores de eficiência em profundidade e em consumo de energia não é apresentado. O nó foi projetado para utilizar apenas sensores analógicos de tensão sendo adequado apenas para pequenas redes experimentais.

Lu *et al.* [15] apresentam um projeto de nó sem considerar a faixa de dados e implicações de transferência. Seu objetivo é analisar a viabilidade de comunicação acústica em ambientes aquáticos. O

nó com características de baixa potência e baixo custo permite que a comunicação tenha um alcance de cerca de 3 metros, tornando-o inadequado para aplicações de mundo real.

Vasilescu *et al.* [16] publicaram um dos estudos mais completos relacionados a prototipação de nós sensores aquáticos. O projeto inclui duas estratégias de comunicação distintas. A primeira, utilizando modems ópticos atende uma pequena faixa de comunicação para transferência de dados em tempo real, com alcance de até 100 metros em condições ideais, e 10 metros em condições normais. A segunda, utilizando modem acústico, permite a comunicação entre distâncias maiores. Embora o nó suporte oito pares de sensores, os testes foram realizados somente com dois sensores: pH e temperatura. O nó utiliza vários componentes proprietários. Infelizmente o nó não está disponível comercialmente ou para pesquisa. O alto consumo de energia também é um problema.

Embasado nas pesquisas, pode-se dizer que o HydroNode é a primeira RSA que oferece as seguintes características: baixo custo; baixo consumo de energia; nó sensor de uso geral; capaz de suportar dois diferentes tipos de sensores, analógicos e digitais; longo alcance de comunicação aquática; plataforma de projeto aberto.

## III. NÓ SENSOR AQUÁTICO

Nesta seção é descrito o hardware do HydroNode. Serão apresentadas as cinco unidades principais do nó: invólucro, fonte de alimentação e unidade de gerenciamento de bateria, unidade de sensoriamento, unidade de processamento e unidade de comunicação. Serão discutidas cada uma destas unidades e apresentadas como se adaptam ao hardware e a aplicações. Será discutido também, como as unidades HydroNode trabalham em aplicações de *e-limnologia*.

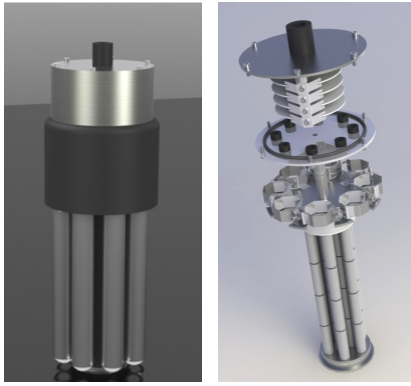
### A. Características do invólucro

A Figura 1a apresenta o protótipo do nó HydroNode. A parte externa do nó ilustrada na Figura 1a apresenta a facilidade de anexar novos sensores. Considerando os compartimentos internos, apresentados na Figura 1b o invólucro mantém os componentes da arquitetura do nó isolados da água. As placas de hardware são posicionadas na parte superior, ao contrário das baterias que estão localizadas na parte inferior do nó. O modem e os sensores são posicionados ao redor do nó, como apresentado na Figura 1a. Esta distribuição dos componentes ajuda a manter a estabilidade do nó, armazenando os componentes pesados na parte inferior e os leves na parte superior. O acesso aos componentes internos do nó é facilmente obtido desprendendo a parte superior do nó. Este modelo de invólucro permite que se troque facilmente os sensores e que haja segurança no armazenamento de componentes internos, especialmente baterias.

### B. Fonte de alimentação e unidade de gerenciamento de bateria

A alimentação do nó é uma combinação de pilhas de 2300 mAh Ni-MH AA, na qual se obtém uma bateria equivalente a 14.4 V e 6.9Ah. Esta configuração de bateria foi escolhida devido ao baixo custo e a facilidade de aquisição destas pilhas. Além disso, pilhas são fáceis de manipular, facilitando a troca ou o recarregamento, quando necessário. Em aplicações que exigem maior tempo execução, poderão ser utilizadas outros tipos de pilhas como Li-FeS<sub>2</sub>, com maior durabilidade.

O projeto do nó também conta com um módulo gerenciador de energia. Isto permite o desenvolvimento de protocolos sensíveis ao



(a) Visão externa HydroNode (b) Visão interna HydroNode

Figura 1. HydroNode

estado de carga da bateria (ECB). Para prever o tempo de vida da bateria será adotado um modelo matemático da curva de descarga da bateria, por meio da tensão e da corrente. Mais precisamente, este modelo matemático, traduz a tensão da bateria e da corrente para uma tabela. Os valores desta tabela são comparados a valores atuais da bateria para se obter a estimativa do ECB. O ECB permite o desenvolvimento de protocolos de ciclo de trabalho na camada MAC, bem como algoritmos de roteamento que podem se adaptar à perda de nós da rede.

A Figura 2 apresenta um modelo de combinação de descarga da bateria de Ni-MH na qual o sistema consome 7 mA ao longo do tempo. A curva nesta figura apresenta um valor aproximado do consumo de corrente do nó com requisições de dados e comutações executadas quatro vezes por hora.

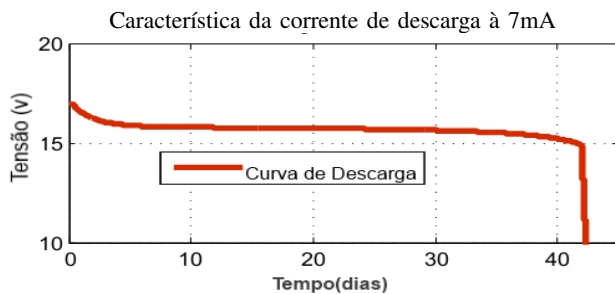


Figura 2. Modelo de taxa de descarga

Foi implementado um processo para agendamento de aquisição e transmissão de dados, de forma a minimizar consumo de energia da rede. O modem e os sensores são ligados quando necessário, de acordo com o esquema de execução do nó. A configuração de coleta de dados pode ser alterada a qualquer momento.

A abordagem de economia de energia é muito útil para aplicações orientadas a períodos e eventos, nas quais não é necessário realizar medições e comunicações contínuas. Pode-se também programar a coleta de dados para ser executada em longos intervalos de tempo o que reduz os custos de manutenção e aumenta a vida útil do nó.

### C. Unidade de Sensoriamento

O HydroNode pode acomodar fisicamente até 8 sensores e possui um hardware que oferece interface para sensores analógicos e digi-

tais. Além disso, seu invólucro permite o acoplamento de diversos sensores, devido aos encaixes ajustáveis.

No caso dos sensores analógicos o HydroNode realiza uma coleta de dados com pré-processamento convertendo, em seguida, os dados para um valor digital. Para os sensores digitais o HydroNode implementa protocolos de comunicação mais comuns para a transferência de dados, como serial RS-232, HART, I<sup>2</sup>C e SPI.

Na aplicação de *e-limnologia*, o HydroNode é equipado com sensores relacionados com a qualidade da água, como temperatura, oxigênio dissolvido, condutividade, pH, clorofila e turbidez. Por ser versátil, pode ser utilizado em outras áreas de pesquisa adicionando sensores de acordo com os parâmetros a serem medidos.

### D. Unidade de Processamento

O HydroNode utiliza o microcontrolador MSP430F2274 para realizar o processamento. Estes dispositivos apresentam baixo consumo de energia, com quatro modos de operação e um grande número de periféricos. O HydroNode é composto por três microcontroladores: o primeiro é usado para executar o pré-processamento e aquisição de dados, o segundo é utilizado para tratar das comunicações acústicas, o terceiro é utilizado para controlar as operações do nó, assim como para armazenar os dados e monitorar o ECB.

Para sincronizar todas as funções do NSA, utiliza-se um relógio de tempo real (RTC). Utilizando um RTC, podemos colocar cada módulo para hibernar e, assim, economizar energia. Os módulos podem ser acordados por interrupções. Estas interrupções podem ser geradas por meio de comunicação serial ou I<sup>2</sup>C. O RTC também fornece marcas de tempo úteis para a construção de pacotes de rede e armazenamento de dados, auxiliando no desenvolvimento de protocolos de comunicação subaquáticos.

Os dispositivos eletrônicos se comunicam por meio do protocolo I<sup>2</sup>C, protocolo mestre-escravo que pode ser facilmente implementado com microcontroladores. Este tipo de comunicação requer apenas dois fios.

O nó sensor HydroNode armazena os dados coletados em uma memória não volátil (EEPROM). Desta forma, cada nó pode proteger seus dados até o momento adequado para transmitir. Além disso, aumenta-se a resistência à perda de dados da rede por meio de redundância.

### E. Unidade de Comunicação

O HydroNode pode usar qualquer modem com interface serial, ou qualquer modem que opera com protocolos I<sup>2</sup>C e SPI. Nesta aplicação, foi utilizado um modem acústico SAM-1 [17]. SAM-1 é um dos modems acústicos comerciais disponíveis de menor custo. Sua comunicação varia de 250m a 1.000m e pode operar até 300m de profundidade.

O modem pode atingir até 20bps de taxa de transferência de dados. Esta taxa é suficiente para uma aplicação de *e-limnologia*, já que só é necessário o envio de uma pequena quantidade de dados periodicamente. Em aplicações nas quais as taxas de dados mais altas são necessárias, o HydroNode pode usar qualquer modem acústico que suporte taxas de transferência mais rápidas.

Pode-se estabelecer uma rede *multi-hop* com HydroNode usando comunicação ponto-a-ponto entre os nós. Algoritmos de roteamento podem ser implementados na unidade de comunicação tornando

o HydroNode capaz de atuar como um roteador, armazenando e transmitindo dados na rede. Este trabalho não se concentra em um algoritmo de roteamento específico, desta forma, pode ser utilizado qualquer algoritmo disponível na literatura, como o encaminhamento de pressão [18] ou Pherotrail 1 [19].

#### F. Software HydroNode

Para a execução das rotinas do HydroNode foram implementadas bibliotecas de controle e configuração. Estas bibliotecas foram codificadas em Linguagem C. As bibliotecas do Hydronode possuem funções que encapsulam configurações e aplicações dos módulos do microcontrolador MSP430F2274. Dessa forma, o sistema provê uma interface amigável para efetuar modificações ou apenas entender o fluxo de execução do software do NSA.

A Figura 3 apresenta o diagrama de sequência do código da placa de gerenciamento do HydroNode - *Manager Board* (MnB). Este diagrama demonstra a utilização do nó para a aplicação de *e-limnologia*. Nesta rotina o usuário envia uma mensagem solicitando os dados do nó para a MnB por meio de comunicação serial, utilizando um computador pessoal. Após o recebimento da mensagem a placa desperta do estado de hibernação e solicita os dados dos sensores para a placa de aquisição de dados - *Acquisition Board* (AcB) - que por sua vez, realiza leitura dos sensores e os envia para a MnB. Após a recepção dos dados, a MnB monta um pacote de rede contendo em seu cabeçalho a identificação do nó, marca de tempo e os dados dos sensores. Este pacote é armazenado na memória não-volátil da MnB e enviado ao computador pessoal como resposta à solicitação do usuário. Após o envio do pacote de dados, a MnB entra novamente em estado de hibernação. Nesta aplicação o usuário tem a opção de apenas exibir os dados coletados, ou armazená-los em um banco de dados.

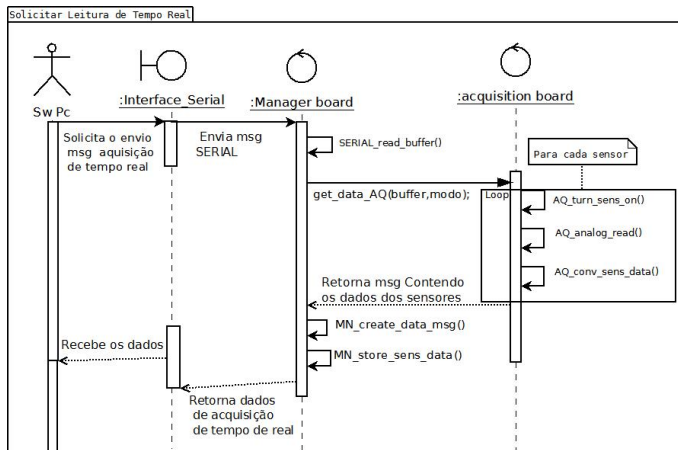


Figura 3. Diagrama de sequência da rotina de coleta de dados de tempo real

#### IV. PLATAFORMA FLUTUANTE

A fim de facilitar o acesso remoto, a plataforma flutuante centraliza os dados gerados pelos nós. Cada nó possui um modem acústico para transmitir os dados para o nó central, instalado na plataforma flutuante. A plataforma se comunica com uma placa coletora de dados que armazena as informações enviadas por todos os nós. A placa coletora de dados é implementada com um microcontrolador MSP430 e um cartão SMD.

A plataforma flutuante estabelece uma comunicação entre a RSA e um computador pessoal que proporciona acesso aos dados remotamente. Os dados são indexados pelo identificador do nó e organizados pela marca de tempo, para que se possa acessar facilmente os dados a partir de um nó específico e se acompanhe a evolução dos dados ao longo do tempo. A conexão com a plataforma pode utilizar qualquer uma das tecnologias sem fio mais comuns, tais como Bluetooth para intervalos de até 10m, ZibGee para as faixas de até 100m, Wi-Fi para intervalos de cerca de 300m, ou mesmo GPRS (redes de celulares).

A disposição da plataforma é apresentada na Figura 4. Existem dois compartimentos impermeáveis, um para armazenar dispositivos eletrônicos e outro para o motor. O nó HydroNode é ligado ao motor por meio de um cabo. O motor é controlado por dispositivos eletrônicos que permitem que o nó mergulhe para realizar medições em diferentes profundidades. A plataforma flutuante permite que o usuário configure a profundidade e também o período que a rede permanecerá para realizar as medições. Na aplicação de *e-limnologia*, este recurso é valioso, uma vez que permite a automatização da coleta de dados em diferentes profundidades. Para o cenário específico, o cabo que permite esta funcionalidade foi limitado a 30m, mas é possível utilizar cabos mais longos.

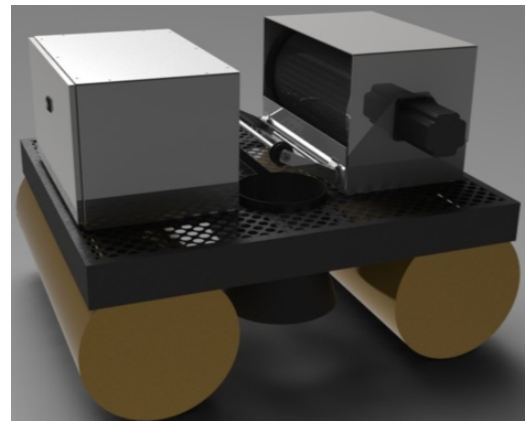


Figura 4. Plataforma flutuante

#### V. RESULTADOS

##### A. Consumo de Energia

A Tabela I apresenta a média de consumo de energia do HydroNode. Os dados foram obtidos da seguinte forma: a cada hora o nó executa a aquisição de dados, uma vez a cada 15 minutos o que requer que os sensores permaneçam ativos por 30 segundos de cada vez. Depois da aquisição, os dados são transferidos em 2 minutos. O nó permanece ativo por um tempo total de 5 minutos, tempo estimado para calcular o processamento dos dados e outros periféricos.

O HydroNode possui um consumo eficiente de energia. A potência média de consumo é 86,1 mWh. É de grande importância observar que o consumo pode ser diminuído dependendo da frequência de operação de aquisição e transferência de dados. Usando a configuração padrão com doze baterias de 1,2v, o HydroNode pode operar ininterruptamente durante cerca de 48 dias. Se os dados forem transferidos apenas uma vez a cada hora, o tempo de vida da bateria é prolongado para 73 dias. Além disso, quando se realiza uma operação de aquisição de dados uma vez a cada hora, a vida útil da bateria atinge 150 dias. A aquisição de dados uma vez a cada hora é suficiente para diversas aplicações.

Tabela I. MÉDIA DE CONSUMO DO HYDRONODE POR HORA

Operação	Corrente (mA)	Tensão (V)	Tempo de execução (sec)	Consumo (mW)
Aquisição de dados	80	14,4	120	38,4
Processamento de dados	2	3,3	600	1,1
Transmissão de dados	20	14,4	240	19,2
Recebimento de dados	21	14,4	240	20,2
Outros	3	14,4	600	7,2

### B. Custo

Os preços usuais para nós sensores aquáticos comerciais variam entre US\$3.000, sem considerar o custo de sensores ou invólucros, e US\$10.000 [20] para um nó completo. Foi desenvolvido um NSA de baixo custo, como apresentado na Figura Tabela II. O preço total inclui os componentes de um nó completo, estrutura impermeável, modem acústico e sensores. A unidade de comunicação HydroNode permite o uso de qualquer modem acústico comercial ou educacional, variando entre US\$600 e US\$10.000 [21]. Sensores de baixo custo também podem ser utilizados, reduzindo o custo total para aproximadamente US\$1.100. A plataforma HydroNode é flexível e capaz de abranger diferentes requisitos para aplicações de comunicação.

Tabela II. CUSTO DO HYDRONODE

Componente	Preço US\$
Invólucro Impermeável	250
Componentes Eletrônicos	180
Modem Acústico	1.000
Sensores	900
<b>Total</b>	<b>2.330</b>

### C. Arquitetura RSA

Foi projetada a arquitetura apresentada na Figura 5 para a aplicação de *e-limnologia*. O HydroNode pode ser configurado como sensor, roteador ou porta de entrada. Agindo como um sensor, o HydroNode coleta dados de sensoriamento do ambiente. Os dados são armazenados e transmitidos por um modem acústico. O roteador recebe os dados transmitidos, encaminha os pacotes para outros roteadores ou para a porta de entrada, o que apresenta custo de transmissão (em termos de distância), e consumo de energia mais baixos. Quando os pacotes de dados chegam na porta de entrada, podem ser armazenados em um registrador permanente ou transmitidos por meio de comunicação sem fio. Neste estudo de caso, os dados armazenados estarão disponíveis em um computador pessoal por meio de uma interface de comunicação sem fio.

A abordagem tradicional para medir parâmetros de qualidade da água é a utilização de várias unidades de detecção, cada uma delas ligadas à superfície por meio de um cabo, sem comunicação aquática. Utilizando Wi-Fi podem-se conectar as portas de entrada da superfície. Ao utilizar uma RSA para medir parâmetros de qualidade da água, tem-se diversas vantagens técnicas e econômicas:

- 1) Modems acústicos podem operar em profundidades de até 6.700m. Na abordagem tradicional os dados devem ser enviados para a plataforma por meio de um cabo. Infelizmente, os sinais elétricos podem sofrer alta atenuação em distâncias superiores à 100m;
- 2) Apenas uma plataforma é necessária para monitorar uma ampla área. Plataformas têm um custo mais elevado que

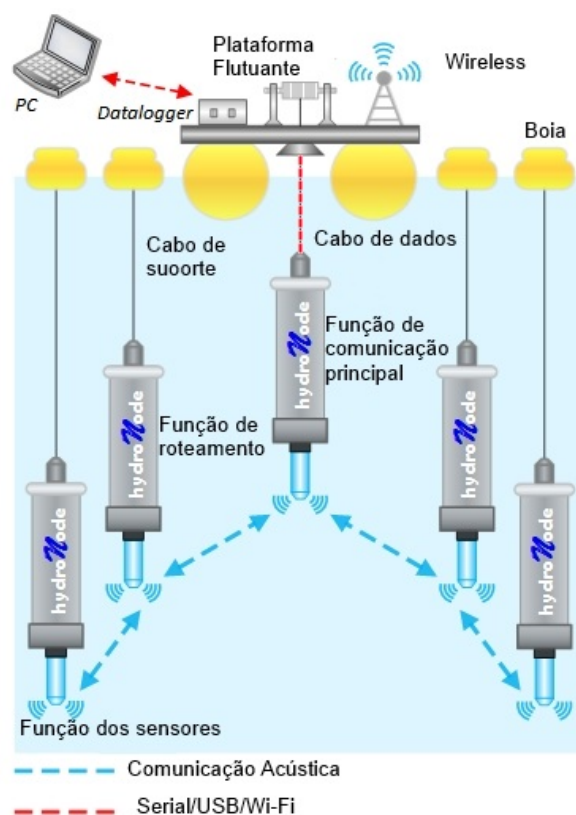


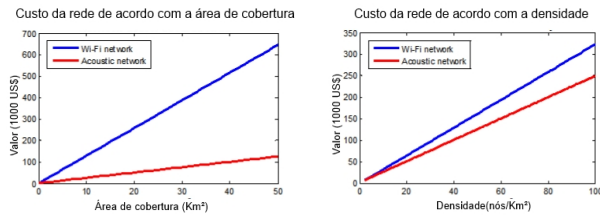
Figura 5. Estudo de caso arquitetura HydroNode

os nós, por isso reduzindo seu número também se reduz significativamente o custo da rede;

- 3) O cabo utilizado para enviar dados para a plataforma também tem um custo elevado, cerca de US\$1.200 para 25m de cabo. Portanto, como a comunicação acústica reduz a utilização do cabo, o custo da rede também é reduzido.
- 4) As tecnologias Wi-Fi possuem alcance de até 300m (em relação ao ar), enquanto os modems acústicos apresentam alcance geralmente três a dez vezes maiores num ambiente aquático. Assim usar Wi-Fi para realizar as comunicações seria inviável, considerando a grande a distância entre os nós.

A Figura 6 apresenta a comparação do custo de uma rede de monitoramento da qualidade da água utilizando a arquitetura de uma NSA com comunicação acústica, com outra que utiliza comunicação Wi-Fi.

A Figura 6a apresenta a relação entre o preço e o alcance de uma rede. Como a comunicação acústica apresenta intervalos superiores em relação à Wi-Fi, normalmente três vezes maior, a RSA necessita de menos nós para cobrir a mesma área, resultando em redução de custos. Na Figura 6b é considerado a relação entre preço e densidade dos nós. Ao aumentar a densidade dos nós pode-se melhorar a resolução dos dados de sensoriamento. Quando são utilizadas redes Wi-Fi, tem-se a necessidade de introduzir uma plataforma flutuante que utilize um cabo de dados para cada nó. O preço de um modem acústico é menor que os preços combinados do cabo e da plataforma, assim o uso de uma RSA é mais econômico.



(a) Comparação de redes considerando área de cobertura  
(b) Comparação de redes considerando resolução de amostra

Figura 6. Comparação de redes subaquáticas, exclusivamente redes Wi-Fi para o monitoramento da qualidade da água

## VI. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste artigo, foi apresentado o HydroNode, uma rede de nós sensores aquáticos de múltiplos propósitos. Descreveu-se a concepção do nó, detalhando suas unidades básicas, bem como plataforma flutuante, que pode-se ligar a uma RSA formada por HydroNodes por meio de comunicação sem fio. Foi descrito seu uso na aplicação de *e-limnologia* formando uma RSA de HydroNodes, e foi apresentado como eles podem ser configurados de modo a ser aplicada em outras RSAs. Foi apresentado que o HydroNode tem um custo total de apenas US\$2.330, e que este valor pode ser reduzido para US\$1.100, um valor inferior ao que é apresentado na literatura atual. Também foi mostrado que o HydroNode possui baixo consumo de energia, com vida útil de 48 à 150 dias, dependendo de como ocorre a frequência de transferência das amostras de dados. Por fim, concluiu-se que, na aplicação de *e-limnologia*, o uso da arquitetura de uma RSA HydroNode é melhor opção que o uso de uma rede apenas Wi-Fi, considerando a área de cobertura e a densidade (resolução dos dados).

Os trabalhos futuros devem ser relacionados com a melhoria de custo e eficiência energética da rede HydroNode, bem como o desenvolvimento de novos protocolos e aplicações para as RSAs. Exemplos incluem o desenvolvimento de uma camada MAC, para roteamento e protocolos de transporte, considerando o ciclo de serviço de novos pedidos de RSAs (principalmente petróleo, gás, monitoramento de hidrelétricas e agricultura) e melhorias de gerenciamento de bateria. Pretende-se também estudar o enlace de dados e métricas de qualidade para melhoria do protocolo, e desenvolver técnicas de fusão de dados.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e FAPEMIG, pelas bolsas e apoio financeiro, ao Dr. Ricardo Motta Pinto Coelho pela valiosa contribuição relacionada à aplicação de *e-limnologia*, ao Fabrício Gomes e Matheus Weynen Vinti por suas contribuições no projeto mecânico do HydroNode, e ao Leandro Elias Fernandes Pessoa e William Lopes Ferreira Rezende por ajudarem com a implementação do software embarcado.

## REFERÊNCIAS

- [1] S. Khan, J. Loo, J. Mauri, and J. Ortiz, *Mobile Ad Hoc Networks: Current Status and Future Trends*. CRC Press/INC, 2011.
- [2] L. F. M. Vieira, "Underwater sea swarm," Ph.D. dissertation, Los Angeles, CA, USA, 2009.
- [3] I. A. Dario, I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: Research challenges," pp. 257–279, 2005.
- [4] J. Kong, J.-H. Cui, D. Wu, and M. Gerla, "Building underwater ad-hoc networks and sensor networks for large scale real-time aquatic applications," in *Military Communications Conference, 2005. MILCOM 2005. IEEE*, 2005, pp. 1535–1541 Vol. 3.

- [5] J. Heidemann, M. Stojanovic, and M. Zorzi, "Underwater sensor networks: applications, advances and challenges," pp. 158–175, Jan. 2012.
- [6] I. Binacional. <http://www.itaipu.gov.br/en/the-environment/golden-mussel>, 2010.
- [7] M. Vieira, C. Coelho, J. da Silva, D.C., and J. da Mata, "Survey on wireless sensor network devices," in *Emerging Technologies and Factory Automation, 2003. Proceedings. ETFA '03. IEEE Conference*, vol. 1, 2003, pp. 537–544 vol.1.
- [8] R. G. Wetzel, "Freshwater ecology: changes, requirements, and future demands," pp. 3–9, 2000.
- [9] J. Partan, J. Kurose, and B. N. Levine, "A survey of practical issues in underwater networks," in *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Underwater networks*, ser. WUWNet '06. New York, NY, USA: ACM, 2006, pp. 17–24.
- [10] W.-Y. Chung, C.-L. Chen, and J. bin Chen, "Design and implementation of low power wireless sensor system for water quality monitoring," in *Bioinformatics and Biomedical Engineering, (iCBBE) 2011 5th International Conference on*, 2011, pp. 1–4.
- [11] D. Pompili, T. Melodia, and I. F. Akyildiz, "Deployment analysis in underwater acoustic wireless sensor networks," in *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Underwater networks*, ser. WUWNet '06. New York, NY, USA: ACM, 2006, pp. 48–55.
- [12] X. Yang, K. G. Ong, W. R. Dreschel, K. Zeng, C. S. Mungle, and C. A. Grimes, "Design of a wireless sensor network for long-term, in-situ monitoring of an aqueous environment," pp. 455–472, 2002.
- [13] Y. Yang, Z. Xiaomin, P. Bo, and F. Yujing, "Design of sensor nodes in underwater sensor networks," in *Industrial Electronics and Applications, 2009. ICIEA 2009. 4th IEEE Conference on*, 2009, pp. 3978–3982.
- [14] F. Hu, P. Tilghman, Y. Malkawi, and Y. Xiao, "A prototype underwater acoustic sensor network platform with topology-aware mac scheme," pp. 386–398, 2007.
- [15] C. Lu, S. Wang, and M. Tan, "Design and realization of sensor nodes for dense underwater wireless sensor networks," in *Proc of the 17th World Congress of the Int Federation of Automatic Control*, vol. 819, 2008.
- [16] I. Vasilescu, C. Detweiler, and D. Rus, "Aquanodes: an underwater sensor network," in *Underwater Networks*, I. F. Akyildiz, D. H.-C. Du, R. H. Headrick, and M. Zorzi, Eds. ACM, 2007, pp. 85–88.
- [17] D. S. Systems, *SAM-1 miniature acoustic modem - technical reference manual*, 2011.
- [18] U. Lee, P. Wang, Y. Noh, F. Vieira, M. Gerla, and J.-H. Cui, "Pressure routing for underwater sensor networks," in *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*, 2010, pp. 1–9.
- [19] L. F. M. Vieira, U. Lee, and M. Gerla, "Phero-trail: a bio-inspired location service for mobile underwater sensor networks," in *Proceedings of the third ACM international workshop on Underwater Networks*, ser. WuWNeT '08. New York, NY, USA: ACM, 2008, pp. 43–50.
- [20] J. Heidemann, W. Ye, J. Wills, A. Syed, and Y. Li, "Research challenges and applications for underwater sensor networking," in *Wireless Communications and Networking Conference, 2006. WCNC 2006. IEEE*, vol. 1, 2006, pp. 228–235.
- [21] B. Benson, Y. Li, B. Faunce, K. Domond, D. Kimball, C. Schurgers, and R. Kastner, "Design of a low-cost underwater acoustic modem," pp. 58–61, 2010.