

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/275595553>

Aplicações Ambientais de Redes de Sensores Sem Fio

Article in *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação* · October 2012

DOI: 10.12721/2237-5112.v02n01a03

CITATIONS

9

READS

1,586

6 authors, including:



Fabrício Braga Soares de Carvalho
Universidade Federal da Paraíba

72 PUBLICATIONS 224 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Brailiro Gonçalves Leal
Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF)

84 PUBLICATIONS 430 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



José Valentim dos Santos Filho
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

12 PUBLICATIONS 37 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Orlando Baiocchi
University of Washington Tacoma

58 PUBLICATIONS 342 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Aplicações Ambientais de Redes de Sensores Sem Fio

Fabrizio Braga S. de Carvalho*, Brauliro G. Leal*, José Valentim dos S. Filho[†], Orlando R. Baiocchi[‡], Waslon T. A. Lopes[§] e Marcelo S. de Alencar[§]

* Colegiado de Engenharia da Computação - Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF

Email: [fabrizio.braga, brauliro.leal]@univasf.edu.br

[†] Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas - CETEC - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB

Email: valentim@ufrb.edu.br

[‡] Institute of Technology - University of Washington Tacoma

Email: baiocchi@u.washington.edu

[§] Instituto de Estudos Avançados em Comunicações - Iecom - Departamento de Engenharia Elétrica - UFCG

Email: [waslon, malencar]@dee.ufcg.edu.br

Resumo—As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) vêm sendo aplicadas nas mais diversas áreas para auxiliar no monitoramento de variáveis importantes. Tais redes sem fio ilustram o conceito de computação pervasiva, em que dispositivos de computação e sensoriamento pequenos e baratos estarão dispersos em inúmeros ambientes. Neste artigo é apresentada uma revisão bibliográfica das principais aplicações das redes de sensores sem fio na área ambiental, com ênfase para as pesquisas conduzidas pelos autores nos tópicos de agricultura de precisão e redes de sensores subaquáticas. Este trabalho é resultado da cooperação técnica entre a University of Washington Tacoma e o Iecom-UFCG, UNIVASF e UFRB.

dados encaminhados pelos nós sensores e executar tarefas de gerenciamento e controle [3]. Estas tarefas são coordenadas utilizando diferentes algoritmos, aplicados de acordo com a estrutura da rede. Os nós sensores podem ser fixos ou móveis (é o caso de aplicações específicas, como por exemplo nós conectados a soldados, veículos, robôs).

Tais nós sensores, em virtude dos recentes avanços em comunicações sem fio e em microeletrônica, são relativamente baratos, pequenos, consomem pouca energia, apresentam capacidade de processamento das informações e de comunicação em curtas distâncias [4]. Um nó sensor possui cinco componentes básicos [5]:

I. REDES DE SENSORES SEM FIO

Redes de Sensores Sem Fio (*Wireless Sensor Networks*) foram identificadas como uma das mais importantes tecnologias para o Século XXI [1]. Em 2003, a *National Science Foundation* dos Estados Unidos elegeu as RSSF como uma das seis áreas principais de pesquisa em redes e, em 2006, a Sociedade Brasileira de Computação (SBC) identificou tal tecnologia como um dos principais desafios em Computação para o período de 2006-2016. É notória, portanto, a importância destas redes no desenvolvimento da Computação e das Telecomunicações atualmente.

Uma rede de sensores se caracteriza por sua capacidade de monitorar uma ou mais variáveis de interesse em um determinado evento. Algumas das variáveis rotineiramente monitoradas por RSSF atuais são: distância, direção, velocidade, umidade, velocidade do vento, temperatura, movimento, vibração, intensidade luminosa, atividade sísmica, som, peso, pressão, dentre outras [2].

Uma RSSF típica é composta por um número de nós (ou nodos) sensores (distribuídos na região a ser monitorada), associados por uma conexão sem fio a um nó sorvedouro (*sink node*). Os dados obtidos e processados pelos nós sensores são encaminhados até uma estação central de agrupamento e tratamento dos dados (em algumas aplicações o nó sorvedouro é parte integrante da estação de controle). A estação de controle (ou estação central) deve ter a capacidade de manipular os

- Microcontrolador – processa os dados importantes para a rede (é o responsável por coletar e processar os dados dos sensores, armazenar as informações ou repassá-las para outros nós ou para o sorvedouro, receber dados de outros nós sensores, executar os programas necessários ao funcionamento do nó, dentre outras funções);
- Memória – armazena programas e dados coletados. Diferentes tipos de memória podem ser empregados, como memórias RAM (*Random Access Memory*), ROM (*Read - Only Memory*), EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) ou memórias *flash*;
- Sensores e atuadores – responsáveis pelo sensoriamento ou controle físico dos parâmetros de interesse da RSSF (podem ser passivos ou ativos, de acordo com a grandeza a ser medida);
- Protocolo de comunicação – Os dados coletados (ou recebidos de outros nós da rede) devem ser transmitidos para o nó sorvedouro; isto se dá por meio de transceptores;
- Fonte de energia – em geral uma bateria (dispositivos mais recentes dispõem de células fotovoltaicas, para auxiliar na redução do consumo da bateria). Dispositivos que atuam como roteadores ou coordenadores de uma rede RSSF costumam dispor de uma fonte de alimentação contínua, uma vez que necessitam estar ativados durante todo o funcionamento da rede.

A Figura 1 apresenta um exemplo de uma RSSF típica, em que os nós sensores transmitem as informações coletadas diretamente para o nó sorvedouro; este, por sua vez, envia os dados à estação central. Esta rede é denominada de salto único (*Single Hop*), e corresponde à maioria das RSSF em uso atualmente.

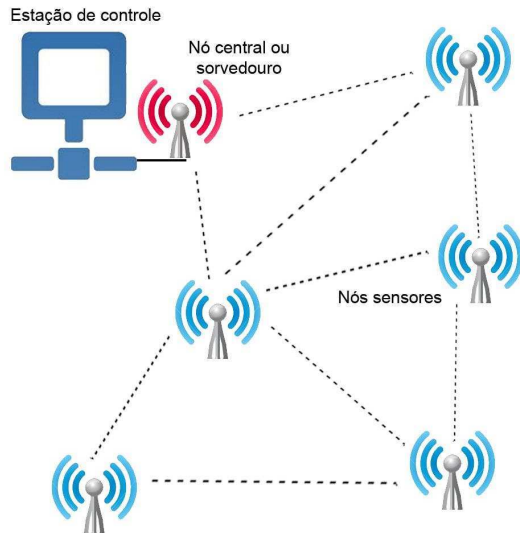


Figura 1. Exemplo de uma RSSF típica.

Contudo, em redes com um número elevado de nós sensores, pode-se dispor de uma configuração em que os nós mais distantes encaminhem seus dados para outros nós mais próximos ao sorvedouro ou à estação central (estes nós são chamados de coordenadores), que por fim encaminham as informações até o nó sorvedouro; tais redes são denominadas de múltiplos saltos (*Multi Hop*) [2].

Quando os nós são idênticos entre si e executam as mesmas funções, a rede é dita homogênea; caso a rede seja complexa, com diferentes sensores executando funções de monitoramento específicas, a rede é denominada heterogênea [3].

Os principais desafios relacionados ao estabelecimento de uma rede de sensores sem fio são [3], [4]:

- Tolerância a falhas – o funcionamento da RSSF deve se manter mesmo que algum nó sensor deixe de operar;
- Escalabilidade – o número de sensores empregados dependerá da situação a ser medida, podendo-se fazer uso de poucos nós sensores ou até de centenas ou milhares destes. A rede em operação, portanto, deve ser capaz de manter a operação normalmente se novos nós forem adicionados ou mesmo se alguns nós pararem de funcionar;
- Custo – o custo de um nó sensor é um fator limitante para que o projeto de uma RSSF seja viável, principalmente quando se trabalha com centenas ou milhares de nós;
- Limitações de *hardware* – as unidades de processamento e de sensoriamento (sensores e conversores analógico-digitais) devem atender algumas exigências, como elevada confiabilidade, baixo consumo de energia e custo reduzido, de modo a tornar possível a confecção de nós sensores precisos e baratos;

- Ambiente monitorado – os nós sensores devem ter a capacidade de trabalhar em condições e ambientes diversos, como por exemplo dentro de reatores de uma usina nuclear, no fundo de oceanos, em plantações, no interior de uma tubulação de petróleo, dentre outros;
- Meio de transmissão – pelo fato dos nós sensores estarem interligados sem fio ao nó sorvedouro, a grande maioria dos sensores disponíveis comercialmente utiliza como meio de transmissão ondas de radiofrequência (RF). O padrão ZigBee (baseado no IEEE 802.15.4) vem se consolidando como a solução mais adotada para aplicações de pequeno alcance. Opera primordialmente na faixa não licenciada de 2,4 GHz (denominada ISM - *Industrial, Scientific and Medical*), embora também seja utilizado na faixa de 868 MHz na Europa e 915 MHz nos EUA. As características de propagação e degradação do sinal requerem atenção dos projetistas de uma RSSF;
- Consumo de energia – por se tratar de um pequeno dispositivo com uma fonte de energia limitada (em geral, 0,5 Ah e 1,2 V), o consumo de energia de um nó sensor é uma característica fundamental, uma vez que a vida útil de um sensor depende da fonte de energia empregada. Alternativas à redução do consumo de energia de nós sensores têm sido estudadas, com o intuito de aumentar a vida útil dos nós (e consequentemente da RSSF) [6], [7];
- A sincronização e localização dos nós sensores em uma determinada RSSF vem apresentando grandes avanços nos últimos anos [8]. O uso de dispositivos GPS (*Global Positioning System*) integrados a nós sensores tem se tornado comum em aplicações de localização e rastreamento.

As redes de sensores sem fio ilustram o conceito de computação pervasiva, em que dispositivos de computação e sensoriamento pequenos e baratos estarão dispersos em inúmeros ambientes. Diversas são as aplicações atuais que utilizam RSSF. Pode-se destacar, dentre outras [1], [3], [4]:

- Aplicações domésticas – ambientes inteligentes; automação de tarefas domésticas; segurança e monitoramento residencial;
- Aplicações médicas – monitoramento de pacientes; aplicação de medicamentos;
- Aplicações militares – estabelecimento de comunicação durante operações de guerra; detecção de ataques nucleares, biológicos e químicos;
- Aplicações ambientais – agricultura de precisão; monitoramento de desastres como enchentes, incêndios e pragas;
- Aplicações industriais – monitorar o funcionamento de máquinas, tubulações e equipamentos em refinarias ou em locais de difícil acesso.

II. APLICAÇÕES AMBIENTAIS

As aplicações ambientais têm se destacado no contexto das redes de sensores sem fio. O monitoramento da biodiversidade em um ecossistema se torna mais simples, uma vez que os sensores operam sem a necessidade de fios espalhados nos ambientes monitorados [4], [5], [9].

Há diversas aplicações de RSSF voltadas para o acompanhamento de espécies animais e de desastres naturais descritos

na literatura científica, como é o caso do monitoramento de incêndios em florestas [10]; a contagem de pássaros [11]; o acompanhamento de zebras dispersas em seu habitat [12]; o rastreamento de rebanhos de cabras [13] ou de gado [14], [15]; e a criação de frangos de corte [16].

No que diz respeito ao estudo das condições climáticas, há trabalhos descrevendo a atuação de redes de sensores em estações meteorológicas [17] e na prevenção de tempestades de areia [18]. Um sistema de monitoramento das condições climáticas de vinícolas situadas no estado de Washington - EUA é descrito em [19].

III. AGRICULTURA DE PRECISÃO

A agricultura de precisão é uma das principais áreas de pesquisa em redes de sensores sem fio para aplicações ambientais. O estabelecimento de uma RSSF em fazendas ou plantações, com o intuito de monitorar variáveis relacionadas ao manejo agrícola (como temperatura, pressão, umidade do solo e nível de radiação solar), é o principal tópico investigado na literatura [20], buscando a otimização da irrigação e um maior benefício da atividade agrícola.

Estas redes podem ser utilizadas, dentre outras possibilidades, na definição de mapas de gerenciamento de informações que, correlacionadas com mapas de colheita, permitem a definição de fatores geradores de maior produtividade em determinadas áreas de cultivo [21]. Com a transmissão sem fio destas informações a uma central ou estação de controle, pode-se gerenciar uma plantação de modo a reduzir o consumo de água e de energia elétrica, recursos que encarecem a produção agrícola.

A Figura 2 ilustra um exemplo de sistema para aquisição de dados em uma plantação por meio de redes de sensores sem fio. Os pontos em branco representam os sensores espalhados pela área cultivada, que encaminham os dados coletados (por meio das trajetórias indicadas na figura) até a estação de controle da fazenda, sem a necessidade de fios ou cabos interligando os sensores.



Figura 2. Exemplo de aquisição de dados na agricultura de precisão.

Muitos trabalhos estudam detalhadamente as aplicações de RSSF no meio agrícola. Países que sofrem com problemas de estiagem e que dependem fortemente da agricultura para o sustento de sua população têm desenvolvido várias pesquisas

nesta área. Um dos primeiros artigos científicos a analisar as possibilidades do uso de redes de sensores sem fio na agricultura de precisão foi publicado no ano de 2004 [22].

Diferentes tecnologias de sensoriamento aplicadas na agricultura de precisão (passando pelos sensores voltados à coleta de dados do solo e de características ambientais até a transmissão das informações coletadas por distintas tecnologias sem fio) são analisadas em [23]. Pesquisa semelhante avalia técnicas de sensoriamento para a análise de qualidade e inspeção de plantações [24].

Uma revisão sobre a necessidade de uso de redes de sensores sem fio na agricultura, analisando diferentes aspectos desta tecnologia, é detalhada em [25]. Um método de calibração de sensores para medição de temperatura e umidade do solo por intermédio de redes de sensores sem fio é apresentado em [26].

Diversos casos práticos de aplicações de RSSF na agricultura de precisão são detalhados e comparados em [27]. O trabalho descrito em [28] apresenta uma integração de redes de sensores sem fio com sistemas de informação para agricultura de precisão, como uma forma de prover dados de campo com maior frequência ao longo do ciclo das culturas. Um sistema distribuído de medição baseado em uma rede de sensores sem fios é utilizado na estimação do teor de água de vegetação em campos agrícolas [29].

Pesquisa desenvolvida no semi-árido da Espanha utilizou quatro tipos de sensores agrícolas distintos para medição de características do solo (temperatura, umidade e salinidade). Os dados obtidos foram transmitidos à estação central da horticultura analisada por intermédio de sensores sem fio [30]. Uma RSSF foi montada para acompanhar a variação de temperatura e radiação solar em vinícolas na Itália [31]. Pesquisa semelhante, realizada na China, é detalhada em [32].

A implantação de redes de sensores para controlar o consumo de água e energia elétrica, bem como para fins de monitoramento e segurança em estufas, é detalhado em [33], [34]. Trabalho semelhante foi desenvolvido em estufas para plantação de melão e repolho [35]. Um sistema para monitoramento de plantações de arroz foi projetado a partir de uma rede baseada no padrão ZigBee em [36] e [37]. Com o objetivo de monitorar o nível de água em uma plantação para evitar os efeitos da seca, detalha-se uma rede de sensores que foi testada em laboratório e em seguida foi implantada em uma plantação de chá [38].

A proposta de utilização de uma rede de sensores sem fio para evitar a propagação de um fungo em plantações de batata foi apresentada em [39]; de modo a combater o fungo, a rede de sensores monitorou a umidade e temperatura na plantação. Pesquisa desenvolvida no Brasil analisou a aplicação de uma RSSF em cultivos de milho, eucalipto e pinhão [21].

A análise dos efeitos das baixas temperaturas em vinícolas é medida por intermédio de uma rede de sensores sem fio montada nos Estados Unidos. O objetivo é o monitoramento da temperatura ambiente durante um ano, utilizando dez sensores [40]. Um sistema estabelecido a partir de redes de sensores sem fio ZigBee e voltado para aplicações de agricultura de precisão é descrito em [41]. Estratégia similar, empregando sensores ZigBee na viticultura, é descrita em [42]

e [43].

A necessidade de investigação dos parâmetros de propagação do sinal de radiofrequência e de um modelamento mais preciso do canal RSSF constitui uma nova abordagem no estudo do canal de comunicações de redes de sensores, conforme descrito em [44]. No trabalho apresentado em [45], uma RSSF é analisada sob os aspectos do ruído que afeta a transmissão dos dados sem fio e da codificação utilizada na transmissão dos dados. As características de propagação da comunicação sem fio entre dispositivos sensores, aplicados em um milharal, são apresentados em [46]. Medições em ambiente *indoor* caracterizam a transmissão de dados entre sensores ZigBee, conforme detalhado em [47].

IV. REDES DE SENSORES SUBAQUÁTICAS

Nos últimos anos, as pesquisas em Redes de Sensores Subaquáticas (*Underwater Sensors Network – UWSN*) têm crescido, e esta tecnologia tem sido utilizada em uma ampla gama de aplicações. A Figura 3 ilustra como sensores subaquáticos podem ser dispostos em uma área a ser monitorada.

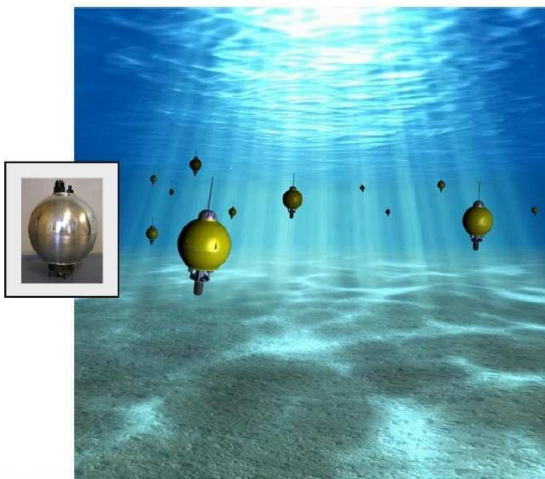


Figura 3. Redes de Sensores Subaquáticas [48].

Devido às características completamente diferentes das redes de sensores usuais, um dos aspectos mais críticos nas UWSN é o seu sistema de comunicação, o qual será tratado a seguir. Nesta seção são apresentadas características do sistema de comunicações de sensores em ambientes subaquáticos, assim como os diversos tipos de protocolos utilizados nas várias camadas da sua pilha de protocolos, em uma abordagem *bottom-to-up*.

A. Camada Física

Os sistemas de comunicação para redes subaquáticas são baseados em ondas eletromagnéticas, ópticas e acústicas. Esses três tipos de transmissão apresentam vantagens e limitações [48], [49], [50]:

- Ondas Ópticas – apresentam como vantagem uma grande taxa de transferência de dados, podendo superar 1 Gbit/s. Entretanto, o sinal óptico é rapidamente absorvido pela água;

- Ondas Eletromagnéticas – a principal limitação desta forma de comunicação é devida à natureza das ondas eletromagnéticas, que não se propagam por longas distâncias na água; isto ocorre pois a penetração destas ondas diminui com o inverso da raiz quadrada da frequência na água. Além disso, a utilização de baixas frequências exige grandes antenas, resultando em pequena largura de banda disponível [51].
- Ondas Acústicas – a transmissão em ondas acústicas é caracterizada por uma menor absorção do sinal em meio aquático, por esta razão tem sido a forma de transmissão mais utilizada; além disso, possui as seguintes características:
 - Alta latência – a velocidade de propagação do som na água é de aproximadamente $1,5 \times 10^3$ m/s, cinco ordens de grandeza menor do que a velocidade de propagação da luz no vácuo. A velocidade de propagação do som na água é modelada pela seguinte equação $v = 1449,05 + 45,7t - 5,21t^2 + 0,23t^3 + (1,333 - 0,126t + 0,009t^2)(S - 35) + 16,3z + 0,18z^2$, em que t é um décimo da temperatura da água em graus Celsius, z é a profundidade em metros, e S é a salinidade da água;
 - Baixa largura de banda – a largura de banda depende da frequência e do alcance. O produto banda x alcance é limitado a 40 kbit/s X km, valor muito menor do que rádios em redes terrestres, que alcançam 5 Mbit/s X 1 km (Padrão IEEE 802.11 b/a/g);
 - Desvanecimento multi-percurso (*Multipath Fading*);
 - Alta taxa de erros de bits é outra característica da transmissão acústica.

B. Camada de Enlace de Dados

Um dos grandes desafios nas redes UWSN é o projeto de protocolos eficientes da Camada MAC (*Medium Access Control*), a fim de coordenar a comunicação entre os sensores. Uma solução viável deve necessariamente levar em conta um grande atraso na propagação, baixa banda passante disponível, consumo de energia eficiente para aplicações de longo termo e mobilidade dos nós. Basicamente, três classes de protocolos da camada MAC com aplicações em redes UWSN têm sido investigadas [48], [49], [50]:

- Protocolos baseados em divisão:
 - FDMA (Acesso Múltiplo por Divisão em Frequência) – neste caso, a cada nó sensor é associada uma banda de frequência diferente;
 - TDMA (Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo) – cada nó sensor dispõe de um *slot* de tempo para transmitir os dados;
 - CDMA (Acesso Múltiplo por Divisão de Código) – os nós sensores operam de forma concorrente sobre toda a banda de frequências; a diferenciação entre os canais de cada nó se dá pelo uso de um código único, que é usado para o espalhamento espectral.
- Protocolos baseados em acesso aleatório:
 - O protocolo Aloha original é baseado em puro acesso aleatório ao meio. Quando um nó sensor

tem informação a enviar, ele transmite a informação imediatamente. Uma mensagem de confirmação é enviada de volta pelo receptor se o pacote for recebido corretamente. Se ocorrer colisão devido à transmissão concorrente de dados ou de confirmações no receptor e transmissor respectivamente, o transmissor retransmite o mesmo pacote. Devido à contenção e retransmissões, a vazão máxima alcançável pelo Aloha original é de 18%. Existem ainda outras variações deste protocolo, cuja descrição está além do escopo deste artigo;

- CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) – o protocolo CSMA e suas variações tentam evitar colisões na transmissão sensoriando as portadoras antes de cada transmissão. Se o canal estiver ocupado, o nó sensor espera um tempo aleatório até monitorar novamente o canal. Um maior detalhamento deste protocolo foge ao escopo deste artigo.
- Protocolos baseados em reserva e escalonamento – utilizam um acesso via escalonamento determinístico para maximizar a utilização do canal. Esse esquema não divide os recursos entre os nós, mas permite que eles acessem o canal via um escalonamento pré-definido. Portanto, enquanto esses tipos de protocolos aumentam a utilização do canal e transmissões sem colisões, eles não aceitam mudanças dinâmicas na rede, como um nó se juntar à rede, sair, falhar ou mover [48], [52].

C. Protocolos de Roteamento

Existem diversos protocolos de roteamento aplicados em redes móveis terrestres. Geralmente, esses protocolos são classificados como: pró-ativos, reativos ou geográficos. Entretanto, sua aplicação no cenário subaquático não se mostra adequada devido às restrições impostas por este ambiente. Protocolos pró-ativos e reativos requerem descoberta de rota, por meio de *flooding* e/ou manutenção de rotas [48]. Não são apropriados, portanto, para comunicação com baixa largura de banda.

Outros problemas encontrados são as colisões de mensagens e o alto consumo de energia [49]. Diante das restrições e limitações dos protocolos pró-ativos e reativos, conclui-se que os protocolos geográficos são os mais adequados. Entretanto, protocolos geográficos requerem serviços de localização (que provêm a localização do destinatário) [48].

D. Localização

A localização de nós sensores móveis, devido às correntes marítimas, é indispensável para redes UWSN, uma vez que o dado medido tem pouca utilidade sem a informação sobre onde este foi obtido. Aplicações subaquáticas exigem uma grande precisão na localização dos dados coletados a fim de determinar a posição em que os eventos ocorreram na rede. No entanto, as características de propagação do sinal acústico e da mobilidade dos sensores impõem grandes desafios aos esquemas de localização escalável e com alta precisão. Por exemplo, o sinal de GPS não se propaga adequadamente em ambiente subaquático [53].

Uma solução viável para o problema da localização deve utilizar um pequeno número de troca de mensagens devido ao consumo de energia e baixa largura de banda disponível no meio de comunicação acústico. Esquemas de localização são encontrados na literatura [48], [49].

E. Aplicações

As Redes UWSN têm sido pesquisadas com grande potencial de utilização em uma vasta gama de aplicações, tais como Sistemas de Monitoramento da Costa, Sismologia, Segurança, entre outros. Uma destas possíveis aplicações de redes de sensores corresponde ao combate à poluição nos mares [48].

O oceano tem sido o estágio final de grandes quantidades de lixo, desde o lixo doméstico até escoamentos agrícolas e substâncias químicas tóxicas. Além disso, a cada ano, grandes quantidades de petróleo são derramadas no mar. Pesquisadores que estudam e investigam o clima têm grande preocupação com o nível de CO_2 no oceano. Este dado pode revelar informações importantes acerca do nível de CO_2 na atmosfera e de fenômenos associados, permitindo a realização de predições sobre comportamentos futuros do clima.

Redes subaquáticas podem ser uma boa solução neste contexto. Tais redes podem ser equipadas com sensores para detecção de turbidez, nível de oxigênio, temperatura e pH. Além disso, em situações de emergência, uma rede subaquática pode ser montada rapidamente para detecção e monitoramento em tempo real de vazamentos de petróleo, por exemplo;

V. CONCLUSÕES

As redes de sensores sem fio constituem uma importante tecnologia para o monitoramento ambiental. Neste artigo foram apresentadas várias aplicações de tais redes na agricultura, bem como também foram discutidas as principais características das redes subaquáticas. Após este trabalho de revisão da literatura, os autores pretendem implementar redes de sensores sem fio voltadas para a agricultura de precisão e para ambientes subaquáticos.

REFERÊNCIAS

- [1] C. CHONG e S. KUMAR. *Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges*. Proceedings of the IEEE, Vol.91(8), pp. 1247-1256, August 2003.
- [2] A. NAYAK e I. STOJMENOVIC. *Wireless Sensor and Actuator Networks*. John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 2010.
- [3] M. P. SOUSA e W. T. A. LOPES. *Desafios em Redes de Sensores Sem Fio*. Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação. IECOM - Instituto de Estudos Avançados em Comunicações. Vol.1, p. 41-47, 2011.
- [4] I. AKYILDIZ *et al.*. *A Survey on Sensor Networks*. IEEE Communications Magazine, Vol.40(8), pp. 102-114. 2002.
- [5] H. KARL e A. WILLIG. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, England, 2005.
- [6] Y. WENGUO e G. TIANDI. *The Non-uniform Property of Energy Consumption and its Solution to the Wireless Sensor Network*. Second International Workshop on Education Technology and Computer Science, pp. 186-192. 2010.
- [7] S. SUDEVALAYAM e P. KULKARNI. *Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.13(3), pp. 443-461. 2011.
- [8] H. A. B. F. OLIVEIRA. *Localização no Tempo e no Espaço em Redes de Sensores sem Fio*. Tese de Doutorado. UFMG, Maio 2008.

- [9] L. XIAO e L. GUO. *The Realization of Precision Agriculture Monitoring System Based on Wireless Sensor Network*. International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering, Vol.3, pp. 89-92. 2010.
- [10] Q. ZHANG *et al.*. *Application of WSN in precision forestry*. 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, Vol. 4, p. 320-323. 2011.
- [11] H. GROS-DESORMEAUX *et al.*. *Acoustic Counting Algorithms for Wireless Sensor Networks*. Sixth ACM International Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks. Tenerife, Spain, October 2008.
- [12] P. ZHANG *et al.*. *Hardware Design Experiences in ZebraNet*. Proc. Second ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems, Baltimore, USA, November 2004.
- [13] J. M. R. de S. NETO *et al.*. *Propagation Measurements and Modeling for Monitoring and Tracking in Animal Husbandry Applications*. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), pp. 1181-1185. 2010.
- [14] K. H. KWONG *et al.*. *Implementation of herd management systems with wireless sensor networks*. IET Wireless Sensor Systems, Vol.1(2), pp. 55-65. 2011.
- [15] J. I. HUIRCAN *et al.*. *ZigBee-based wireless sensor network localization for cattle monitoring in grazing fields*. Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 74 (2), p. 258-264. 2010.
- [16] E. F. NUNES *et al.*. *Avaliação da propagação de sinais de radiofrequência para tecnologia Zigbee em granja de frango de corte*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Vol. 15 (1), p. 102-107. 2011.
- [17] W. CHEBBI *et al.*. *Development of a WSN Integrated Weather Station node for an Irrigation Alert Program under Tunisian Conditions*. 8th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices, p. 1-6. 2011.
- [18] P. WANG *et al.*. *On network connectivity of wireless sensor networks for sandstorm monitoring*. Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, Vol. 55 (5). April 2011.
- [19] F. J. PIERCE e T. V. ELLIOTT. *Regional and on-farm wireless sensor networks for agricultural systems in Eastern Washington*. Computers and Electronics in Agriculture, Vol.61 (1). April 2008.
- [20] H. R. BOGENA *et al.*. *Potential of Wireless Sensor Networks for Measuring Soil Water Content Variability*. Vadose Zone Journal 2010 Soil Science Society of America, Vol.9(4), p. 1002-1013. November 2010.
- [21] C. J. ROCCIA. *Avaliação de Redes de Sensores Sem Fio Aplicadas a Cultivos de Milho, Eucalipto e Pinhão*. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Tecnologia - UNICAMP, 2011.
- [22] J. BURRELL, T. BROOKE e R. BECKWITH. *Vineyard computing: sensor networks in agricultural production*. IEEE Pervasive Computing, Vol. 3 (1), p.38-45. 2004.
- [23] W. S. LEE *et al.*. *Sensing technologies for precision specialty crop production*. Computer and Electronics in Agriculture, Vol. 74 (1), p. 2-33. 2010.
- [24] M. RUIZ-ALTISSENT *et al.*. *Sensors for product characterization and quality of specialty crops: A review*. Computer and Electronics in Agriculture, Vol. 74 (2), p. 176-194. 2010.
- [25] A. U. REHMAN *et al.*. *A review of wireless sensors and networks applications in agriculture*. Computer Standards & Interfaces, 2011.
- [26] R. ZHANG *et al.*. *A calibration method of detecting soil water content based on the information-sharing in wireless sensor network*. Computer and Electronics in Agriculture, Vol. 76 (2), p. 161-168. 2011.
- [27] S. E. DIAZ *et al.*. *A novel methodology for the monitoring of the agricultural production process based on wireless sensor networks*. Computer and Electronics in Agriculture, Vol. 76 (2), p. 252-265. 2011.
- [28] C. E. CUGNASCA *et al.*. *Integração de Redes de Sensores Sem Fio com Sistemas de Informação para Agricultura de Precisão*. IX Congresso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola - CLIA 2010, Julho 2010.
- [29] J. C. GIACOMIN, F. H. VASCONCELOS e E. J. SILVA. *A Distributed Measurement System to Estimate Plant Water Content in Agricultural Fields Based on Wireless Sensor Networks*. Revista Controle & Automação, Vol. 19, No. 4., 2008.
- [30] J. A. L. RIQUELME *et al.*. *Wireless Sensor Networks for precision horticulture in Southern Spain*. Computers and Electronics in Agriculture, Vol.68 (1). August 2009.
- [31] A. MATESE *et al.*. *Development Of A Wireless Sensor Network To Understand And Monitor Environmental Variability In Precision Viticulture*. European Conference on Wireless Sensor Networks, 2012.
- [32] Z. LIQIANG *et al.*. *A Crop Monitoring System Based on Wireless Sensor Network*. Procedia Environmental Sciences, Vol. 1, p. 558-565. 2011.
- [33] Z. ZUOJING e Z. HAIHUI. *Design of wireless monitoring and warning system for protected agriculture environment*. 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing, pp. 1-5. 2010.
- [34] X. LI, Y. DENG e L. DING. *Study on Precision Agriculture Monitoring Framework Based on WSN*. 2nd International Conference on Anti-counterfeiting, Security and Identification, pp. 182-185. 2008.
- [35] S. YOO *et al.*. *A²S: Automated Agriculture System based on WSN*. IEEE International Symposium on Consumer Electronics, pp. 1-5. 2007.
- [36] R. KUMAR, P. RANJITH e R. PRABAKARAN. *Real Time Paddy Crop Field Monitoring Using Zigbee Network*. International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology, pp. 1136-1140. 2011.
- [37] Y. SHI *et al.*. *A Web-Based Monitoring System as a Measurement Tool in Greenhouses Using Wireless Sensor Networks*. Computer and Computing Technologies in Agriculture IV - Selected Papers, pp. 289-297. 2010.
- [38] D. SUN *et al.*. *WSN Design and Implementation in a Tea Plantation for Drought Monitoring*. IEEE Computer Society - 2010 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery, pp. 156-159. 2010.
- [39] A. BAGGIO. *Wireless Sensor Networks in precision agriculture*. Disponível em www.sics.se/realwsn05/papers/baggio05wireless.pdf. Acessado em Setembro 2011.
- [40] R. LISCANO *et al.*. *Network Performance of a Wireless Sensor Network for Temperature Monitoring in Vineyards*. Ninth ACM International Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks, Miami, USA, October 2011.
- [41] M. KESHTGARI e A. DELJOO. *A Wireless Sensor Network Solution for Precision Agriculture Based on ZigBee Technology*. Wireless Sensor Network, Vol. 4, p. 25-30. 2012.
- [42] R. MORAIS *et al.*. *A ZigBee multi-powered wireless acquisition device for remote sensing applications in precision viticulture*. Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 62 (2), p. 94-106. 2008.
- [43] E. PERES *et al.*. *An autonomous intelligent gateway infrastructure for in-field processing in precision viticulture*. Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 78 (2), p. 176-187. 2011.
- [44] T. STOYANOVA *et al.*. *A Practical RF Propagation Model for Wireless Sensor Networks*. IEEE Computer Society - 2009 Third International Conference on Sensor Technologies and Applications, pp. 194-199. 2009.
- [45] A. CAMILLI *et al.*. *From wireless sensors to field mapping: Anatomy of an application for precision agriculture*. Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 58, p. 25-36. 2007.
- [46] S. LI e H. GAO. *Propagation Characteristics of 2.4 GHz Wireless Channel in Cornfields*. 2011 IEEE 13th International Conference on Communication Technology (ICCT), p. 136-240. 2011.
- [47] R. M. PELLEGRINI *et al.*. *RF Propagation Analysis for ZigBee Sensor Network using RSSI Measurements*. 2nd International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology, p. 1-5. 2011.
- [48] L. F. M. V. *et al.*. *Redes de Sensores Aquáticas*. Livro de Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2010). Porto Alegre - RS. Sociedade Brasileira de Computação (SBC), 2010.
- [49] L. LIU, S. ZHOU e J. CUI. *Prospects and Problems of Wireless Communication for Underwater Sensor Networks*. Wiley Wireless Communications and Mobile Computing, Special Issue on Underwater Sensor Networks, pp. 977-994, 2008.
- [50] J. A. L. SIRVENT. *Realistic Acoustic Prediction Models to Efficiently Design Higher Layer Protocols in Underwater Wireless Sensor Networks*. Tese de Doutorado. Universidad Miguel Hernández de Elche, Espanha, 2012.
- [51] P. DJUKIC *et al.*. *Localization for Electromagnetic Radio Underwater Sensor Networks*. The Fifth International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2011.
- [52] N. CHIRDOCHO, W. SOH e K. CHUA. *RIPT: A receiver-initiated reservation-based protocol for underwater acoustic networks*. p. 1744-1753. 2008.
- [53] M. EROL-KANTARCI *et al.*. *Localization techniques for underwater acoustic sensor networks*. IEEE Communications Magazine, Vol. 48 (12), p. 152-158. 2010.