

## MONITORAMENTO AMBIENTAL UTILIZANDO REDES DE SENSORES SEM FIO TOLERANTES A ATRASOS

Israel L. C. Vasconcelos<sup>1\*</sup>, André L. L. Aquino<sup>2</sup>

1. Estudante de IC do Instituto de Computação da Universidade Federal de Alagoas
2. Universidade Federal de Alagoas / Orientador

### Resumo:

Este trabalho apresenta uma solução baseada em amostragem de dados para redes de sensores sem fio tolerantes a atrasos (ICDT-WSNs) em aplicações *storage-intensive*.

Sendo comum na literatura a utilização de técnicas de descarte de pacotes, essas abordagens apenas levam em consideração parâmetros da camada de rede, dessa forma, a qualidade da informação após a redução é seriamente comprometida.

A proposta de solução consiste em um algoritmo de amostragem sensível aos dados, a fim de preservar a qualidade da observação global da rede, mantendo o compromisso com a utilização eficiente dos recursos de armazenamento disponíveis.

Os resultados obtidos mostram que a solução proposta apresenta uma melhora de 40% na qualidade dos dados e uma cobertura quatro vezes superior em relação à abordagem aleatória, considerada o estado da arte.

**Palavras-chave:** Redes de Sensores; Redução de Dados; Internet das Coisas.

**Apoio financeiro:** CNPq.

**Trabalho selecionado para a JNIC pela instituição:** UFAL.

### Introdução:

Em áreas de monitoramento esparsas, manter os sensores em constante comunicação é uma tarefa complexa. Através da adoção de conceitos de Redes Tolerantes a Atrasos (Curran & Knox, 2008), é possível propor soluções alternativas eficientes para cenários com esta configuração. A nossa abordagem consiste em utilizar nós móveis navegando pela área monitorada, visitando os nós sensores estáticos e coletando os dados diretamente destes.

Utilizamos as Redes Tolerantes a Atrasos de Conexões Intermitentes (ICDT-WSNs, Curran & Knox, 2008) para os cenários estudados. Essas redes são utilizadas em aplicações de monitoramento de vida selvagem, de locais de difícil acesso, de risco,

de desastres naturais, como também de áreas urbanas.

Adicionalmente, devido a natureza *storage-intensive* do problema em estudo, o uso de técnicas de redução de dados torna-se desejável para manter a confiabilidade da rede e o bom comportamento das aplicações. As abordagens tradicionais na literatura **utilizam técnicas não sensíveis aos dados**, como o descarte por critério aleatório ou ordem de chegada dos pacotes (Jain & Chawla, 2014), **comprometendo o desempenho** das aplicações sob a ótica da **qualidade dos dados**. A abordagem proposta neste trabalho utiliza redução **sensível aos dados**, com o **objetivo de tornar mais eficiente a utilização do armazenamento** disponível mantendo o compromisso de **preservar a qualidade da observação** global da rede.

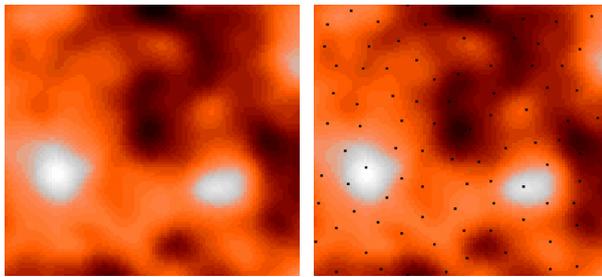
O algoritmo de redução utilizado é baseado no trabalho de Aquino & Nakamura, 2009, que é focado para aplicações de tempo real. Nesse algoritmos, a redução é requisitada quando se esgota a memória de armazenamento do *Sink* e consiste em manipular as amostras a fim de selecionar as mais significativas, realizando os seguintes passos:

1. O **ordenamento crescente** do *stream* em função dos valores das amostras;
2. **Divide o stream** ordenado em dez subconjuntos com intervalos igualmente espaçados, montando um histograma;
3. **Selecionar os dados** ao redor da mediana de cada subconjunto.

Este trabalho possui como principais objetivos a criação de um *framework* para modelagem e simulação de experimentos, definição de diretrizes para experimentação prática e validação das soluções propostas dentro do contexto da avaliação.

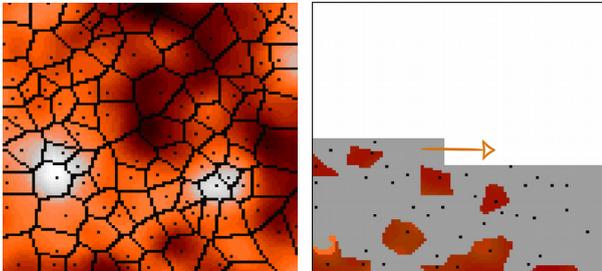
### Metodologia:

A execução do experimento segue as etapas na sequência descrita a seguir (figuras 1-5):



1) Simulação do Fenômeno

2) Distribuição dos Nós



3) Cobertura dos Nós

4) Navegação e Amostragem



5) Entrega dos Dados

**1. Simulação do Fenômeno:** A área de interesse (Figura 1) é representada através de um Campo Gaussiano Aleatório (Wood & Chan, 1994), onde os pontos encontram-se espacialmente correlacionados em função do Modelo de Covariância de Matérn (Diggle & Ribeiro, 2007). É possível interpretar este campo como uma subárea de interesse dentro de um ambiente maior, assim sendo possível replicar várias instâncias através de computação paralela e escalabilizar a produção dos resultados.

**2. Configuração da Rede:** Nesta etapa, as características físicas já encontram-se definidas após a execução dos procedimentos descritos em 1, assim, é possível iniciar a modelagem dos atributos da rede detalhados a seguir.

a. **Distribuição Espacial dos Nós:** Neste trabalho utilizamos uma distribuição dos nós seguindo o processo SSI (Simple-Sequential Inhibition), Baddeley (2007), que consiste em definir um raio de repulsão em torno de cada nó, onde não é possível inserir outro nó na área interna a este raio: obtendo assim uma distribuição mais realista, **parcialmente**

**aleatória.** Este procedimento é ilustrado na Figura 2.

b. **Cobertura dos Nós:** Para delimitar a área pela qual cada nó é responsável por cobrir é construído sobre o campo um diagrama de Voronoi (Aurenhammer, 1991). Onde as sementes do diagrama serão os nós-sensores e a dominância é a sub-área coberta por cada nó. Esta sub-área é conhecida como Célula de Voronoi. Cada sensor será capaz de medir apenas dados do fenômeno contidos em sua respectiva célula de Voronoi. Este procedimento é ilustrado na Figura 3.

c. **Mobilidade:** O sink móvel (MULE) se desloca através da rede utilizando um algoritmo de movimento aleatório (Random Walk), que consiste em estipular aleatoriamente um par de coordenadas destino (x,y) e dirigir-se até ele em linha reta, escolhendo um novo ponto a medida que o anterior é alcançado. Os procedimentos de amostragem e redução dos dados são descritos na **Introdução**. Esta etapa é ilustrada na Figura 4.

d. **Características de Transmissão:** O cenário considera a possibilidade de colisão de pacotes em faixas de frequências similares e falhas de transmissão por potência baixa, os nós utilizam o modelo de rádio CC2420 (2.4 GHz, IEEE 802.15.4).

i. **Roteamento:** A aplicação consiste em um nó *sink* móvel (MULE) que visita os nós sensores estáticos, o algoritmo de roteamento implementado utiliza apenas um salto na transmissão de qualquer pacote, enviando-o diretamente ao sink pois a comunicação é feita de forma oportunista no momento em que este entra no raio de alcance dos nós estáticos.

ii. **Taxa de Transferência:** O sink é capaz de receber por volta de 60 pacotes por segundo em rajadas de 15 a cada 0,25s, em média, medido empiricamente.

iii. **Alcance de Transmissão:** Todos os nós (inclusive o próprio *Sink*) possuem um raio comunicação com *range* de 80 metros, na configuração padrão.

### Resultados e Discussão:

Nos experimentos descritos a seguir, o campo é dado por uma área quadrada de comprimento fixo implementada por uma matriz de 100×100, representando uma área

de  $100\text{m} \times 100\text{m} = 10000\text{m}^2$ , adotado como padrão de forma empírica.

As amostras são inseridas em cada metro quadrado de sua extensão, com valores seguindo uma distribuição normal de **média = 25** e **variância = 64**, escolhidos levando em consideração o comportamento da temperatura num cenário em que podem ser observadas as condições normais de temperatura e pressão, ou seja,  $25^\circ\text{C}$  em geral.

Os experimentos foram realizados através de simulação computacional, utilizando a linguagem R, para geração e reconstrução dos conjuntos de dados, distribuição e cobertura dos nós, além das avaliações estatísticas dos resultados gerados.

Também foi utilizado o simulador Castalia (versão 3.2), baseado em C++, para modelagem dos atributos da rede: Roteamento, colisão de pacotes, consumo de energia, mobilidade dos nós, coleta e amostragem dos dados, e também as características de transmissão (largura de banda, alcance e especificações do rádio).

Nesta simulação, foram executadas 30 replicações independentes do fenômeno para cada cenário avaliado, utilizando semente única. O erro médio é calculado com intervalo de confiança de 95%.

Os resultados produzidos sob duas métricas de avaliação: Erro de reconstrução e Cobertura Global em nível de aplicação

### 1 Avaliação de Erro de Reconstrução:

Temos um conjunto de dados reduzidos que servirá como entrada para executar o processo de interpolação para, utilizando Kriging Simples, *Hengl (2009)*, reconstruir a informação perdida, resultando no *output* de dados finais produzidos pela aplicação.

### 2 Avaliação Da Cobertura Global:

Para avaliar a cobertura global resultante de cada uma das estratégias, foi montado sobre o campo uma matriz de  $10 \times 10$ , criando um grid de 100 setores, onde cada setor cobre uma área de  $10 \times 10$ . Se um setor possui pelo menos um ponto de informação dentro de sua área, este setor é considerado coberto.

A cobertura global é calculada simplesmente a partir da contagem de quantos setores foram cobertos ao final da execução de cada uma das técnicas sob as condições descritas no parágrafo anterior.

Em todos os casos, nós variamos um único parâmetro, fixando todos os outros em seus valores padrão previamente definidos, a

lista com os parâmetros e seus respectivos *defaults* é mostrada a seguir:

Os resultados obtidos na avaliação de cobertura foram similares em todos os 7 cenários avaliados, onde a técnica de Amostragem Central, proposta, é capaz de atingir, em média, 80% de cobertura do campo, enquanto que utilizando o Descarte Aleatório é capaz de cobrir, em média, 20% dos setores do ambiente. Esses resultados representam uma melhora de 400% em relação ao estado da arte.

- **Tamanho do Buffer:** 500, 1500 e 2000 amostras, onde 1000 amostras é o valor padrão.

- **Avaliação de Erro:** O algoritmo proposto apresentou valores de erro até 42% inferiores em relação ao Descarte Aleatório.

- **Densidade da Rede** (Quantidade de nós): 20, 35 e 100 nós, onde 50 nós é o valor padrão.

- **Avaliação de Erro:** Amostragem Central apresentou valores de erro 33% inferiores, em média.

- **Potência de Transmissão do Rádio:** 0, -10 e -15 dBm, onde -25 dBm é o valor padrão.

- **Avaliação de Erro:** Amostragem Central: 19%, Descarte Aleatório: 30%.

- **Velocidade do Sink:** 2, 3, 4, 5, 6 m/s. Onde 2m/s é o valor padrão.

- **Avaliação de Erro:** Amostragem Central: 19%, Descarte Aleatório: 30%

- **Tempo de navegação:** 250, 1000, 2500 e 10000 segundos, onde 5000 segundos é o valor padrão.

Esta é uma informação particularmente importante para evitar desperdício de recursos, evitando que o *Sink* navegue por mais tempo do que o necessário através da rede. Apresenta convergência de comportamento a partir de 2500s de navegação do *Sink*.

- **Avaliação de Erro:** Amostragem Central: 19%, Descarte Aleatório: 29%.

- **Modelos de Rede:** Ideal (Rota completa, sem perda de pacotes), e Realista (Random Walking e perda de pacotes) como condição padrão.

- **Avaliação de Erro:** No modelo mais ideal possível, o algoritmo de Amostragem Central apresentou erro médio em torno de 9%, e nos casos mais realistas, 15%. Enquanto que a

técnica aleatória apresentou valores de 30% e 24% respectivamente. Esses valores mostram a influência da complexidade da modelagem nos resultados gerados.

- **Ocorrência de eventos:** Cenário sem contaminação (condição padrão), e com eventos externos (campo contaminado).

- **Avaliação de Erro:** O algoritmo proposto apresentou um erro médio de 15% no cenário sem contaminação, mostrando robustez ao manter os mesmos 15% para cenários com evento. Por outro lado, a abordagem Aleatória mostrou-se sensível à ocorrência de eventos, aumentando o erro médio de 21% para 26%.

### Conclusões:

Tendo desenvolvimento desde 2013, este projeto já produziu quatro publicações em anais de congressos, sendo dois regionais: *Vasconcelos & Aquino (2014)* e *Vasconcelos et al. (2015b)*. E dois internacionais: *Vasconcelos et al. (2015a)* e *Vasconcelos et al. (2015c)*, além de uma submissão planejada para o periódico **Computer Communications Journal (JCR: 1.696)**. Além das publicações, este trabalho foi premiado com **Excelência Acadêmica por três anos consecutivos** (Encontro de Iniciação Científica da UFAL nos anos de 2014, 2015 e 2016) e escolhido *best paper* em *Vasconcelos & Aquino (2014)*.

Este trabalho apresentou uma solução baseada em amostragem para redução de dados de forma a minimizar perda de informação e otimizar a cobertura global da rede, apresentando resultados satisfatórios nos experimentos e superando o estado da arte.

Neste estudo, uma série de fatores inerentes à rede são avaliados, dentre os quais podemos destacar a Densidade da rede, Características de Transmissão, Memória do Sink, bem como sua Rota, Velocidade e Tempo de deslocamento, por exemplo.

Considerando essa modelagem sofisticada e a grande quantidade de cenários levados em conta nos experimentos, os resultados apresentados são conclusivos, consistentes e de larga abrangência, trazendo um conjunto de informações resumidas e de grande utilidade que podem ser aplicadas como diretrizes para a execução de experimentos em ambiente real, poupando tempo, esforços e custos na implementação pois tem-se em mãos um grande leque de resultados disponíveis.

Este projeto também contribui com um arcabouço de software completo, integrando linguagens de programação como R e C++ junto ao simulador Castalia, que permite a fácil modificação de qualquer parâmetro desejado para avaliação de novos cenários de interesse.

Finalmente, as perspectivas futuras incluem a incorporação do *know-how* desenvolvido nesta pesquisa para projeto, experimentação prática e desenvolvimento de novas aplicações.

### Referências bibliográficas

Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. & Cyirci, E. (2002), 'Wireless sensor networks: a survey', *Computer Networks* 38(4), 393–422.

Aquino, A. L. L. & Nakamura, E. (2009), 'Data Centric Sensor Stream Reduction for Real-Time Applications in Wireless Sensor Networks', *Sensors*, 9, 9666-9688

Aurenhammer, F. (1991), 'Voronoi diagrams: A survey of a fundamental data structure', *ACM Computing Surveys* 23, 345–405.

Baddeley, A. (2007), Spatial point processes and their application, in W. Weil, ed., 'Stochastic Geometry', Vol. 1892 of Lecture Notes in Mathematics, Springer, Berlin, pp. 1–75.

Curran, K. & Knox, J. (2008), 'Disruption tolerant networking', *Computer and Information Science* 1, 69–71.

Diggle, P. J. & Ribeiro, P. J. (2007), *Model-based Geostatistics*, Springer.

Hengl, T. (2009), *A Practical Guide to Geostatistical Mapping*.

Jain, S. & Chawla, M. (2014), 'Survey of buffer management policies for delay tolerant networks', *The Journal of Engineering*

Vasconcelos, I. L. C. & Aquino, A. L. L. (2014), Redução de dados baseada em amostragem para redes de sensores sem fio com tolerância a conexões disruptivas., in 'Workshop de Trabalhos de Iniciação Científica e Graduação (WTICGBASE)'.  
 Vasconcelos, I. L. C. et al., (2015a), A coverage algorithm for intermittently connected delay tolerant wireless sensor networks, in 'Proceedings of the 7th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security'.

Vasconcelos, I. L. C. et al., (2015a), A coverage algorithm for intermittently connected delay tolerant wireless sensor networks, in 'Proceedings of the 7th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security'.

Vasconcelos, I. L. C. et al., (2015b), Estratégia de redução de dados baseada em amostragem para redes de sensores sem fio tolerantes a atrasos com conexões intermitentes., in 'XV ERBASE, Workshop de Trabalhos de Iniciação Científica e Graduação (WTICGBASE)'.  
 Vasconcelos, I. L. C. et al., (2015c), A sampling algorithm for intermittently connected delay tolerant wireless sensor networks, in 'Proceedings of the 20th IEEE Symposium on Computers and Communications',.

Wood, A. T. A. & Chan, G. (1994), 'Simulation of stationary gaussian processes in  $[0,1]^d$ ', *Journal of Computational and Graphical Statistics* 3(4), 409–432.