

HEURÍSTICA PARA O PROBLEMA DE COBERTURA EM REDES DE SENSORES SEM FIO VOLTADA AO RASTREAMENTO DE ANIMAIS

André Ricardo Melo Araújo¹, Adriana Gomes Penaranda¹,
Fabiola Guerra Nakamura^{1,2}, Rosiane de Freitas Rodrigues^{1,2}

¹Programa de Pós-Graduação em Informática – PPGI

²Departamento de Ciência da Computação – DCC
Universidade Federal do Amazonas (UFAM)

{andremelhoaraujo,drica.gp}@gmail.com, {fabiola,rosiane}@dcc.ufam.edu.br

RESUMO

Este trabalho aborda o problema de cobertura em redes de sensores sem fios, voltada ao rastreamento de animais. O cenário de estudo consistiu em dois conjuntos distintos de pontos de demanda, na mesma área de cobertura, sendo um em relação ao clima e outro para o rastreamento dos animais. Para o rastreamento de animais é necessário estimar a localização geográfica dos mesmos, o que é feito através da obtenção da posição a partir de três sensores, aplicando a técnica de triangulação. Assim, deseja-se minimizar a quantidade de nós sensores necessários para a garantia de cobertura de todos os pontos de demanda, considerando os dois conjuntos estipulados. Foi proposto um método heurístico iterativo composto por algoritmos de construção e de busca local. Resultados significativos foram obtidos, o que respalda a adequabilidade do método proposto, principalmente nos casos de teste onde o valor do raio de sensoriamento aumenta.

PALAVRAS CHAVE: redes de sensores sem fio, heurísticas, rastreamento de animais.

Área principal: Otimização Combinatória.

ABSTRACT

This paper presents the problem of coverage in wireless sensor networks, for animal tracking. The research scenario consists of two distinct sets of demand points, to the same coverage area, one in relation to climate and the other for animal tracking. For the latter, it is necessary to estimate their geographical location, by the position from three sensors, applying triangulation technique. So, we want to minimize the amount of sensor nodes required to guarantee coverage of all demand points, considering the two stipulated sets. We proposed an iterative heuristic method, involving construction and local search algorithms. Relevant results were obtained, which supports the suitability of the proposed method, especially when the radius of sensing area increases.

KEYWORDS: wireless sensor networks, heuristics, animal tracking.

Main area: Combinatorial Optimization.

1. Introdução

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são um tipo especial de redes *ad hoc* constituídas por dispositivos capazes de processar, armazenar, sensoriar o ambiente e transmitir dados via interface de comunicação sem fio, denominados nós sensores [Loureiro et. al. (2003)]. Este tipo de rede pode ser utilizada em diversos cenários, abrangendo: aplicações ambientais, como na coleta dados de temperatura, pressão e umidade de uma região, como no rastreamento de animais; aplicações em centros urbanos, através do monitoramento da qualidade do ar e do tráfego de veículos; aplicações na área de saúde, com sensores especialmente projetados para monitorar o funcionamento de órgãos; e aplicações na área militar para detectar tropas inimigas. As RSSFs são diferentes das redes tradicionais em alguns pontos, tais como limitações de processamento, memória e energia, além de serem altamente sujeita a falhas.

Muitas pesquisas foram feitas tendo em vista a melhoria no consumo de energia de tais redes [Loureiro et. al. (2003)]. Neste contexto destaca-se o Problema da Cobertura, que busca encontrar um subconjunto de nós dispostos na área de demanda para ficar ativo e que cubra toda a área de monitoramento definida pela aplicação, conforme visto na Figura 1. A área de monitoramento pode ser discretizada em um conjunto de pontos de demanda e são estes pontos que devem ser cobertos pelos nós sensores. Muitas vezes, é preciso sensoriar mais de um tipo de dado ao mesmo tempo, por exemplo, uma aplicação pode coletar dados do clima da região e as trajetórias de determinados animais e verificar se existe uma relação entre estes dados.

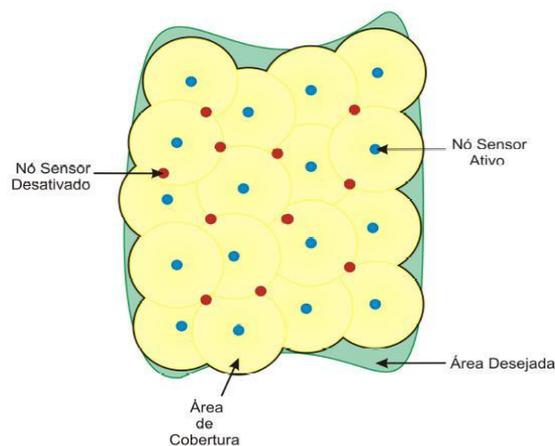


Figura 1. Problema de Cobertura em Redes de Sensores sem Fio.

Campos e Nakamura (2009) propõem um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para o Problema de Cobertura em Rede de Sensores sem Fio planas voltado ao rastreamento de animais. O objetivo da aplicação de rastreamento é manter uma rede de sensores fixa na floresta para coletar dados de micro-clima da região e ao mesmo tempo detectar macacos da espécie saim-de-coleira que passem pela área. Para que isto seja possível os macacos possuirão sensores implantados em seus corpos e que serão responsáveis por enviar sinais periodicamente, de tal modo que quando detectados pelos nós fixos poderão auxiliar na localização e identificação do animal. O modelo matemático proposto neste trabalho deve determinar qual a melhor localização dos nós sensores para que a aplicação possa ser viabilizada.

O objetivo deste trabalho é propor uma solução heurística para resolver o problema de cobertura em RSSFs voltado ao rastreamento de animais. Esta solução possui dois conjuntos de pontos de demanda, na mesma área de cobertura, sendo um em relação ao clima e o outro para o rastreamento dos animais. Para o rastreamento de animais é necessário obter a posição a partir de 3 (três) sensores para obter a sua localização exata, utilizando a técnica de triangulação, [Boukeche et. al. (2007)].

Este documento é organizado como segue. Na Seção 2 são apresentados os trabalhos relacionados. Na Seção 3 é apresentada a definição do problema e a formulação matemática. A

Seção 4 apresenta a solução heurística proposta. Na Seção 5 são mostrados os testes realizados e resultados obtidos. E, na Seção 6 são feitas as considerações finais sobre o trabalho.

2. Trabalhos Relacionados

Diversas técnicas foram propostas na literatura para o Problema de Cobertura em RSSF. Meguerdichian et. al. (2001) utiliza um algoritmo que através da combinação da geometria computacional, especificamente o diagrama de Voronoi e algoritmos de busca gráfica descobre os nós que estão monitorando uma mesma área, desativando-os temporariamente para não causarem interferência nem aumentarem o número de colisões. Assim como em Viera et. al. (2003), que também utiliza o diagrama de Voronoi.

Nakamura et. al. (2005) propuseram dois modelos multiperíodo de Programação Linear Inteira Mista tanto para o Problema de Cobertura quanto para o de conectividade em RSSF. Eles atualizam a topologia da rede em intervalos de tempo pré-definidos, através da análise do consumo de energia da rede. Quintão et. al. (2003) apresentam uma abordagem utilizando algoritmos genéticos para o Problema de Cobertura em RSSF cujo objetivo principal é coletar dados de micro-clima. Os resultados obtidos por essa heurística foram comparados com um modelo de Programação Linear, muito semelhante ao modelo apresentado neste trabalho.

Andrade e Mateus (2008) apresentam uma heurística gulosa para o Problema Multiperíodo de Cobertura, Conectividade e Roteamento Dinâmico em Redes de Sensores sem Fio Planas, que fornece soluções aproximadas quando comparadas as soluções ótimas, com reduzido tempo de execução. Menezes et. al. (2005) propõem uma abordagem paralela que tem por objetivo resolver o problema de cobertura e conectividade em RSSF.

3. Definição do problema

O Problema de Cobertura voltado para o rastreamento de animais e micro-clima pode ser definido como: *dado um conjunto de nós sensores S e dois conjuntos de pontos de demanda D_1 e D_2 , o problema consiste em garantir que, para todo ponto de demanda $j \in D_1$, pelo menos um nó sensor $s \in S$ o cubra e que para todo ponto de demanda $k \in D_2$, pelo menos três nós sensores $s_1, s_2, s_3 \in S$ o cubram.*

3.1. Formulação matemática

Para este problema pode ser deduzido uma formulação matemática baseada no modelo proposto por Quintão et. al. (2003). No entanto, foram realizadas algumas mudanças para realizar a tarefa de rastreamento, que serão apresentadas a seguir.

A área monitorada é representada por um conjunto finito de pontos distribuídos na região que necessitam de sensoriamento, denominados pontos de demanda. No entanto, neste modelo a área será representada por dois conjuntos de pontos de demanda. O primeiro, denominado D_1 , representa os locais onde é necessário coletar dados de micro-clima. O segundo, denominado D_2 , representa as possíveis localizações dos animais na região. Esses pontos são sobrepostos e podem existir pontos pertencentes aos dois conjuntos. A quantidade de elementos dos dois conjuntos dependerá da precisão requerida pela aplicação. Quanto maior for a quantidade de pontos de demanda na área, mais precisa será a cobertura da rede. Porém, maior será o tempo de resolução do modelo. Como os pontos do conjunto D_2 representam a localização do animal, então é aconselhável que ele tenha mais pontos que o conjunto D_1 .

Para que um ponto de demanda pertencente a D_1 seja coberto, é necessário que este ponto esteja contido na área de cobertura de pelo menos um nó sensor. Consideramos que a área de cobertura de um nó é formada por um círculo de raio Rs_1 , sendo Rs_1Rs_2 o raio de sensoriamento do nó. Além dessa primeira área de cobertura, consideramos também que o nó possui uma segunda área, formada por um círculo de raio Rs_1Rs_2 , sendo Rs_2 a capacidade do nó de detectar a presença do animal na região. Ele consegue detectar um animal de interesse graças ao sinal emitido pelo rádio que está embutido no mesmo. Os nós sensores que estão nas proximidades escutam esse sinal e, com base nisso, estimam a localização. Sendo assim, para que um ponto de demanda pertencente a D_2 (que representam as possíveis localizações dos animais) seja coberto, é

necessário que ele esteja contido na segunda área de cobertura de pelo menos três nós sensores. O motivo dessa restrição é para que seja possível utilizar as técnicas de cálculo de posição para localização das espécies monitoradas, como as apresentadas em Boukeche et. al. (2007).

Assim, a notação utilizada no modelo é a seguinte:

S : conjunto de todos os nós sensores presentes na rede.

D_1 : conjunto de pontos de demanda que representa onde serão coletadas informações de micro-clima.

D_2 : conjunto de pontos de demanda que representa as possíveis localizações dos animais monitorados.

c_i : custo relacionado a ativação do nó sensor i .

$EH1_j$: penalidade por não cobertura do ponto de demanda $j \in D_1$.

$EH2_k$: penalidade por não cobertura do ponto de demanda $k \in D_2$.

B_{ij} : parâmetro que indica se o nó sensor i alcança o ponto de demanda $j \in D_1$.

C_{ik} : parâmetro que indica se o nó sensor i alcança o ponto de demanda $k \in D_2$.

As variáveis de decisão utilizadas no modelo são:

y_i : variável binária que recebe 1 se o nó i estiver ativo ou 0, caso contrário.

x_{ij} : variável que recebe 1 se o nó sensor i cobre o ponto de demanda $j \in D_1$.

z_{ik} : variável que recebe 1 se o nó sensor i cobre o ponto de demanda $k \in D_2$.

$h1_j$: variável que recebe um valor maior que 0 se o ponto $j \in D_1$ não for coberto.

$h2_k$: variável que recebe um valor maior que 0 se o ponto $k \in D_2$ não for coberto.

Abaixo temos o modelo do problema:

Função Objetivo:

$$\min \sum_{i \in S} c_i \times y_i + \sum_{j \in S} EH1_j \times h1_j + \sum_{k \in S} EH2_k \times h2_k \quad (1)$$

A Equação 1 é a função objetivo do modelo e visa minimizar o número de nós ativos e o número de pontos de demanda descobertos. Caso haja ponto de demanda não coberto, a solução receberá uma penalidade, representada pelos parâmetros $EH1$ ou $EH2$. Como a penalidade por não cobertura é bem maior que o custo de ativação dos nós, então se existir nó sensor que alcance um ponto de demanda, ele será ativado.

Sujeito a:

$$\sum_{i \in S} B_{ij} \times x_{ij} + h1_j \geq 1, \forall j \in D_1 \quad (2)$$

$$\sum_{i \in S} C_{ik} \times z_{ik} + h2_k \geq 3, \forall k \in D_2 \quad (3)$$

As Restrições 2 e 3 garantem que todos os pontos do conjunto D_1 e D_2 devem ser cobertos por, no mínimo, um e três nós sensores, respectivamente. Se isto não ocorrer, a variável $h1$ ou $h2$ receberá um valor maior que 0, resultando em uma penalidade. Além disso, se garante que apenas os nós que alcançam um determinado ponto de demanda podem monitorá-lo.

$$x_{ij} \leq y_i, \forall i \in S \quad e \quad \forall j \in D_1 \quad (4)$$

$$z_{ik} \leq y_i, \forall i \in S \quad e \quad \forall k \in D_2 \quad (5)$$

As Restrições 4 e 5 garantem que apenas os nós sensores que estão ativos podem sensoriar os pontos de demanda do conjunto D_1 e D_2 , respectivamente.

$$y_i \in \{0,1\} \quad (6)$$

A Restrição 6 define y_i como uma variável binária. Já as Restrições 7, 8, 9 e 10 definem os limites das variáveis x , z , $h1$ e $h2$, respectivamente.

$$0 \leq x_{ij} \leq 1, \forall i \in S \quad e \quad \forall j \in D_1 \quad (7)$$

$$0 \leq z_{ik} \leq 1, \forall i \in S \quad e \quad \forall k \in D_2 \quad (8)$$

$$h1_j \geq 0, \forall j \in D_1 \quad (9)$$

$$h2_k \geq 0, \forall k \in D_2 \quad (10)$$

Por fim, a Restrição 11 define as variáveis x , z , $h1$ e $h2$ como reais.

$$x, z, h1, h2 \in \mathfrak{R} \quad (11)$$

4. Método Heurístico proposto

A heurística proposta neste trabalho é baseada nos algoritmos implementados por Andrade e Mateus (2008), que propõe uma solução gulosa para o problema de cobertura, e Menezes et. al. (2005) que apresenta um algoritmo que divide a área de monitoramento em partes iguais e resolve o problema de cobertura e conectividade em cada uma destas área em paralelo, formando a fase de construção. A heurística conta ainda com uma fase de refinamento que é feito por uma busca local para otimizar a solução encontrada na construção.

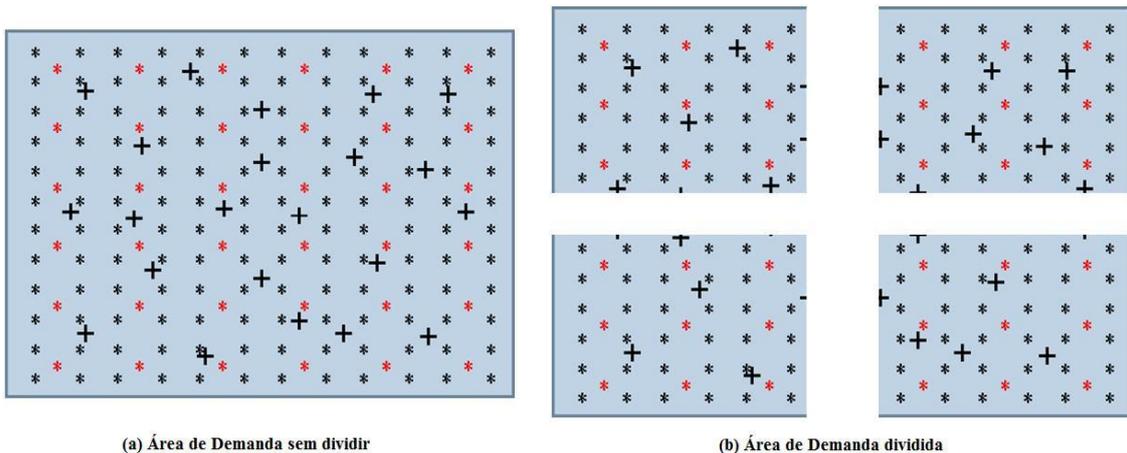


Figura 2. Exemplo de uma Área de Demanda, onde o ‘*’ vermelho representa a área de demanda menos densa, D_1 , e o ‘*’ preto representa a área de demanda mais densa, D_2 , a ‘+’ representa os nós sensores distribuídos na área.

4.1. Fase de Construção

A heurística de construção, como dito anteriormente, é realizada de forma paralela, sendo assim, os dois conjuntos de pontos de demanda são divididos em partes de mesmo tamanho, como mostrado em Figura 2, e cada processo realiza em paralelo o algoritmo guloso em uma das partes. No final é realizado um refinamento para retirar as redundâncias, nós que podem ser desligados sem prejuízo para cobertura. Este procedimento é mostrado no Algoritmo 1.

Algoritmo 1 Heurística Paralela

Entrada: $n \rightarrow$ número de processos

$D1, D2 \rightarrow$ conjuntos de pontos de demanda

$S \rightarrow$ conjuntos de nós sensores

Saída: $x^* \rightarrow$ Vetor com os nós ativos

- 1: **Definição das variáveis**
 - 2: my_rank - identificador do processo corrente;
 - 3: $PD1_i$ - Partes do conjunto de demandas $D1$;
 - 4: $PD2_i$ - Partes do conjunto de demandas $D2$;
 - 5: NO_j - Partes do conjunto de nós;
 - 6: N - Numero de processos;
 - 7: **Inicialização das variáveis**
 - 8: Divide o conjunto de demanda $D1, D2$ em N partes;
 - 9: Divide o conjunto de nós S em N partes;
 - 10: **Inicia a execução Paralela**
 - 11: **para** cada processo identificado por my_rank **faça**
 - 12: Executar *Heuristica_Gulosa*($NO_{my_rank}, PD1_{my_rank}, PD2_{my_rank}$);
 - 13: **fim para**
 - 14: **Fim da execução paralela**
 - 15: Mesclar Resultados.
 - 16: **Executar** *Heuristica_Gulosa*(Dados Mesclados) para arquivo de saída gerado.
 - 17: Gerar saída final.
 - 18: **retorna** x^*
-

O algoritmo paralelo usa a idéia da divisão e conquista, que divide a área de demanda em partes, executa o procedimento em cada uma das partes paralelamente e depois as une, acelera o tempo de obtenção da solução.

Como visto no Algoritmo 1 cada processo executa de forma paralela a heurística gulosa. Esta heurística gulosa é baseada em Andrade e Mateus (2008) e no método guloso clássico para o Problema de Cobertura de Conjuntos. Neste procedimento, a cada iteração, é incluído na solução o nó que cobre mais pontos de demanda. Toda vez que um nó é incluído na solução, a lista de pontos de demanda descobertos é atualizada. O algoritmo termina quando todos os pontos de demanda estiverem cobertos. Este procedimento sofreu ajustes para se encaixar no problema proposto neste trabalho, onde temos em vez de uma área de demanda teremos duas e em uma delas os pontos de demanda terão que ser cobertos por três nós. A proposta é apresentada no Algoritmo 2.

A idéia do algoritmo 2 é que cada ponto de demanda na área tenha um contador informando quantos nós ainda precisam cobri-lo para que sua demanda seja atendida. A função Atualizar $PD1_k$ e $PD2_z$, vista nas linhas 11 e 16, ajusta os contadores sempre que um nó cobrir algum ponto de demanda. Como feito na linha 18, toda vez que um ponto de demanda é coberto por um número de nós suficientes para considerá-lo coberto, ele é retirado da lista de pontos de demanda descobertos. As funções Calcular No_i e Recalcular No_i nas linhas 7, 12, 19, calculam quantos pontos de demanda cada nó cobre e transforma num valor de custo assim como na função de seleção, equação 12. A função de seleção tem como entrada o $d1$ e $d2$, que representam quantos pontos de demanda das Áreas 1 e 2 o nó cobre. Os D_1 e D_2 , são os conjuntos de ponto de demanda 1 e 2 respectivamente. O λ (lambda) é uma probabilidade que indica a importância de um conjunto de demanda sobre o outro, o valor de lambda está dentro do intervalo $[0, 1]$.

Função de Seleção:

$$\left[\frac{d1}{|D_1|} \times \lambda \right] + \left[\frac{d2}{|D_2|} \times (1 - \lambda) \right] \quad (12)$$

Algoritmo 2 Heurística Gulosa

Entrada: $D1, D2 \rightarrow$ conjunto de pontos de demanda

$S \rightarrow$ conjunto de nós sensores

Saída: $VetSol \rightarrow$ Vetor contendo os nós pertencentes a melhor solução

- 1: Definição das variáveis
 - 2: i - Nó corrente;
 - 3: $PD1_k$ - indica quantos nós faltam para o ponto de demanda $k \in D1$ ser coberto.
 - 4: $PD2_z$ - indica quantos nós faltam para o ponto de demanda $z \in D2$ ser coberto.
 - 5: No_i - indica quantos pontos de demanda cada nó cobre.
 - 6: Inicialização das variáveis
 - 7: Calcular No_i para cada nó, apartir da equação de seleção;
 - 8: Inicializa $PD1_k = 1$ e $PD2_z = 3$;
 - 9: $i =$ Nó que cobrir mais pontos de demanda de $D1$ e $D2$;
 - 10: Marcar i como visitado;
 - 11: Atualizar $PD1_k$ e $PD2_z$;
 - 12: Recalcular No_i para cada nó não visitado, apartir da equação de seleção;
 - 13: enquanto todos os pontos de demanda de $D1$ e $D2$ ainda não estiverem cobertos e ainda tiver nós disponíveis faça
 - 14: $i =$ recebe o nó que cobre mais pontos de demandas (na variável No_i);
 - 15: marcar i como visitado;
 - 16: Atualizar $PD1_k$ e $PD2_z$;
 - 17: para todo ponto de demanda coberto por i e ($PD1_k = 0$ ou $PD2_z = 0$) faça
 - 18: Retirar o ponto já suficientemente coberto do conjunto de pontos de demanda $D1$ ou $D2$;
 - 19: Recalcular No_i para cada nó não visitado, apartir da equação de seleção;
 - 20: fim para
 - 21: $VetSol = VetSol + i$;
 - 22: fim enquanto
 - 23: retorna $VetSol$;
-

4.2. Fase de Refinamento

Na fase de refinamento é realizada uma busca local. Um algoritmo de busca local define, para cada solução, uma vizinhança composta por um conjunto de soluções com características “muito próximas”. Dada uma solução corrente, uma das formas de implementar um algoritmo de busca local é percorrer a vizinhança desta solução em busca de outra com valor menor (para um problema de minimização). Se tal solução vizinha for encontrada, ela torna-se a nova solução corrente e o algoritmo continua. Caso contrário, a solução corrente é um ótimo local em relação à vizinhança adotada, [Talbi (2009)].

A busca local apresentada neste trabalho funciona da seguinte forma: a partir de uma solução, gerada na heurística de construção, é escolhido o nó sensor ativo que cobre menos pontos de demanda. Este nó é desativado e então é verificado se houve alguma melhora na solução. Se houver nó permanece desativado, senão ele é reativado. Depois se verifica todos os nós vizinhos do primeiro nó, que cubram algum ponto de demanda em comum com o primeiro nó, desativando-os e ativando-os. Depois se verifica se houve alguma melhora. Da mesma forma, também se escolhe o nó sensor inativo que cobre mais sensores dos conjuntos de pontos de demanda e o processo se repete com seus vizinhos. A busca local é vista em Algoritmo 3.

Algoritmo 3 Busca Local

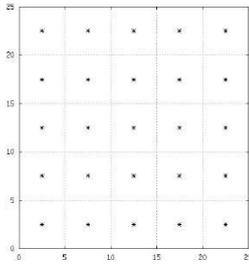
Entrada: Solução inicial x **Saída:** Solução x modificada

```
1:  $m \rightarrow$  Nó ativo que menos cobre Pontos de Demanda;  
2: se  $Verificar\_Melhora(m) = True$  então  
3:    $Trocar(m)$ ;  
4: fim se  
5: para  $i = 0; i < qtdd\_sensor; i++$  faça  
6:   se Nó  $i$  for vizinho do nó  $m$  então  
7:     se  $Verificar\_Melhora(i) = True$  então  
8:        $Trocar(i)$ ;  
9:     fim se  
10:  fim se  
11: fim para  
12:  $m \rightarrow$  Nó inativo que mais cobre Pontos de Demanda;  
13: se  $Verificar\_Melhora(m) = True$  então  
14:    $Trocar(m)$ ;  
15: fim se  
16: para  $i = 0; i < qtdd\_sensor; i++$  faça  
17:   se Nó  $i$  for vizinho do nó  $m$  então  
18:     se  $Verificar\_Melhora(i) = True$  então  
19:        $Trocar(i)$ ;  
20:     fim se  
21:  fim se  
22: fim para
```

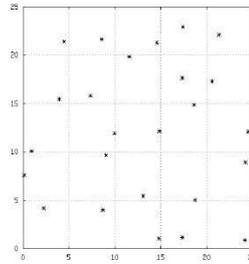
5. Testes e resultados obtidos

Para a fase de testes tiveram que ser definidos alguns parâmetros e linguagens a serem utilizados. O software de otimização utilizado para o resolver o modelo foi o GLPK (2009), para as heurísticas foi utilizada a linguagem C e para paralelizá-las usou-se o software MPICH2, uma implementação do MPI (Message Passing Interface) [Barney (1966)].

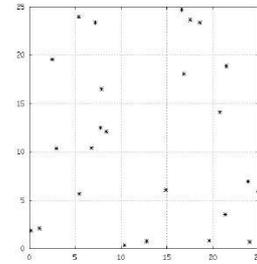
Por motivos de simplificação, foram feitas duas suposições sobre o cenário. A primeira delas é que as redes são homogêneas, ou seja, onde todos os nós possuem as mesmas características. A segunda é que consideramos o cenário plano e sem obstáculos. Assim como em Campos e Nakamura (2009), os testes foram realizados considerando uma área de $400 m^2$. Podem-se dispor os nós na área de três maneiras diferentes: grade regular, onde os nós são dispostos em locais pré-estabelecidos e com distribuição equidistante na área; grade irregular, quando os nós tentam formar uma grade regular, mas, devido a fatores externos, se organizam de forma irregular; e aleatório, que ocorre quando os nós sensores são posicionados em locais aleatórios. Estes métodos de posicionamento são mostrados na Figura 3. Para os testes, foi considerada a grade irregular, pois o problema é voltado ao rastreamento de animais, logo é considerado que fatores do ambiente na qual estarão os sensores sejam o totalmente planos. A heurística paralela foi realizada dividindo a área em quatro partes iguais de $100 m^2$.



(a) Posicionamento em grade regular



(b) Posicionamento em grade irregular



(c) Posicionamento aleatório

Figura 3. Métodos de Posicionamento

Nos testes, não houve limite de tempo de execução, permitindo que todas as instâncias do modelo chegassem à solução ótima. Foi considerado um custo de ativação $c_i = 1$ para todos os nós e que as penalidades $EH1$ e $EH2$ são 100 vezes maiores que c_i . A quantidade de pontos de demanda foi de 400 pontos para $D1$ e de 1600 pontos para $D2$. Teve duas quantidades de sensores, 16 e 25. O Raio de Sensoriamento foi de 6,60 m e 8,80 m, e o raio de comunicação com 9,0 m e 12,0 m. Sendo assim formam-se 4 conjuntos de teste:

- Conjunto C1: 16 nós sensores, Rs_1 igual a 6,60 m e Rs_2 igual a 9,0 m
- Conjunto C2: 16 nós sensores, Rs_1 igual a 8,80 m e Rs_2 igual a 12,0 m
- Conjunto C3: 25 nós sensores, Rs_1 igual a 6,60 m e Rs_2 igual a 9,0 m
- Conjunto C4: 25 nós sensores, Rs_1 igual a 8,80 m e Rs_2 igual a 12,0 m

Para cada conjunto de testes, foram feitas 30 instâncias. A Tabela 1 mostra os resultados obtidos para o modelo matemático, a heurística gulosa sem a divisão, a heurística gulosa paralelizada, sendo as heurísticas sem e com a busca local.

	Conjunto de Testes	Nós Ativos	Desvio Padrão	Demanda 1-coberta D1(%)	Desvio Padrão	Demanda 3-coberta D2(%)	Desvio Padrão
Modelo Ótimo	C1	13,3	0,95	100,00%	0,00%	99,13%	0,62%
	C2	9,1	0,99	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%
	C3	12,4	0,52	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%
	C4	7,6	0,52	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%
Completo	C1	15,1	0,99	100,00%	0,00%	99,13%	0,62%
	C2	10,1	1,10	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%
	C3	15,7	0,95	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%
	C4	9,7	0,82	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%
Dividido	C1	15,1	0,99	100,00%	0,00%	99,13%	0,62%
	C2	9,9	0,99	100,00%	0,00%	99,93%	0,20%
	C3	15,7	0,95	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%
	C4	9,8	0,79	100,00%	0,00%	99,93%	0,18%
Completo + Busca Local	C1	15,1	0,99	100,00%	0,00%	99,13%	0,62%
	C2	10,1	1,10	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%
	C3	15,7	0,95	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%
	C4	9,7	0,82	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%
Dividido + Busca Local	C1	15,1	0,99	100,00%	0,00%	99,13%	0,62%
	C2	9,9	0,99	100,00%	0,00%	99,93%	0,20%
	C3	15,7	0,95	100,00%	0,00%	100,00%	0,00%
	C4	9,8	0,79	100,00%	0,00%	99,93%	0,18%

Tabela 1. Resultados obtidos.

Como visto na Tabela 1, as heurísticas tiveram bom comportamento quando comparadas com o modelo ótimo no fator de nós ativos. Com relação a cobertura a heurística sem divisão teve um resultado superior a heurística dividida, mas ao mesmo tempo próximas (menos 1% de

diferença entre as duas). Pode-se também analisar, que a busca local implementada não teve efeito nos resultados, em todos os casos as respostas foram as mesmas. Também foram feitos testes analisando a influência da função de seleção falada na seção 3.1, a equação (12) mostra a função. O gráfico 1 mostra esses testes utilizando a heurística gulosa simples sem o paralelismo, já no gráfico 2 utiliza-se a heurística com paralelismo.

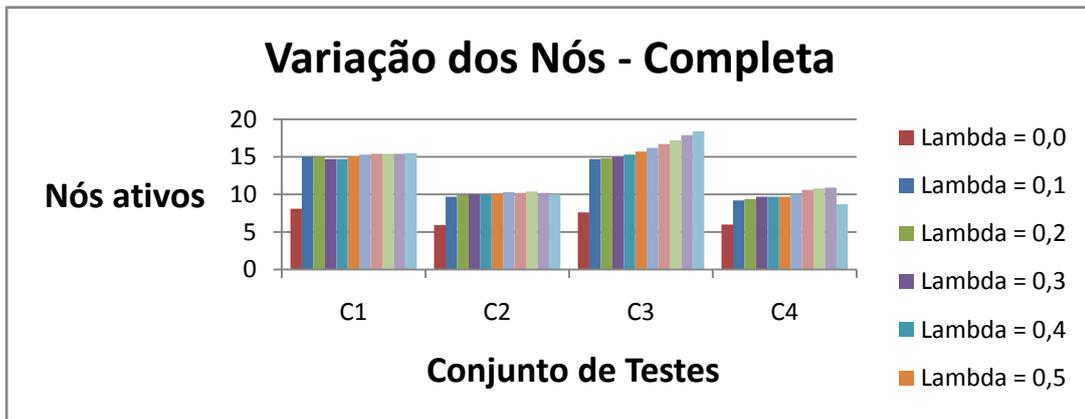


Gráfico 1. Gráfico mostrando as variações do λ considerando a área de demanda sem dividir.

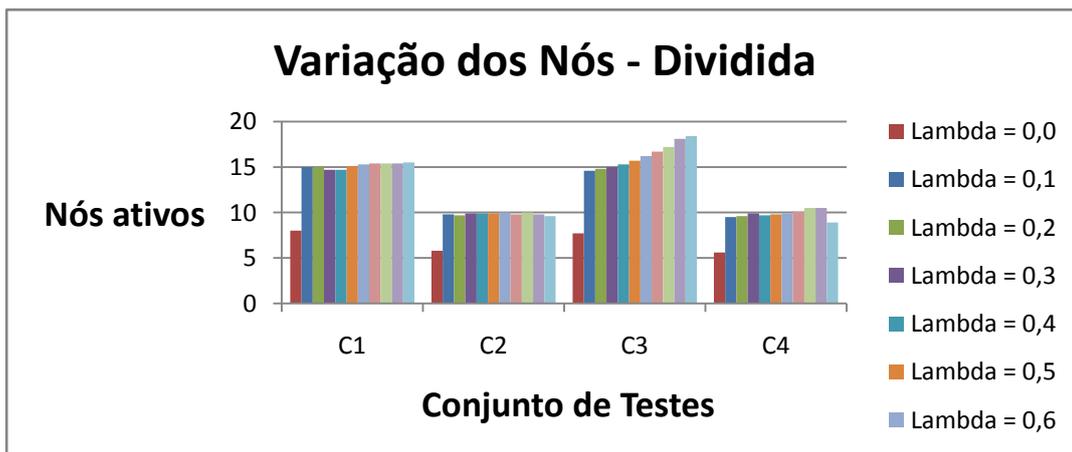


Gráfico 2. Gráfico mostrando as variações do λ considerando a área de demanda dividida.

Analisando-se os gráficos é possível perceber que quanto maior o valor de λ mais nós é necessário para cobrir a área de demanda, isso ocorre por que quando o λ é maior, aqueles nós que cobrem mais pontos da área de demanda mais densa (A área que necessita ser 3-coberta) não tem tanta influência em comparação como quando o λ é menor. Outro item notado é quando o λ é 0,0, há uma grande diferença justamente pelo motivo da área de demanda menos densa ser ignorada. Pode-se perceber, também, que nos casos de testes C3 as diferenças entre os nós ativos de cada caso de teste, é mais destacado que nos outros casos de testes.

7. Considerações Finais

Neste trabalho foi proposto um método heurístico iterativo, aplicando-se algoritmos de construção e de busca local ao problema de cobertura em redes de sensores sem fio voltado para o rastreamento de animais, com o objetivo de minimizar a quantidade de nós sensores necessários para cobrir todos os pontos de demanda das duas áreas estabelecidas. Através da bateria de testes pode-se notar que o método proposto forneceu bons resultados para alguns casos de teste, principalmente quando o valor do raio aumenta.

Como trabalhos futuros, pretende-se configurar melhor a fase de refinamento, pois não houve melhora significativa nas soluções construídas na primeira fase, a de construção, tal como

esperado. Além disto, uma análise empírica mais robusta, envolvendo instâncias maiores, deve ser realizada.

Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio financeiro do CNPq - Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento - através dos projetos número 554087/2006-5 e 575808/2008-0 e da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Amazonas, FAPEAM, Edital 023/2009-PRONEX, através do projeto “Monitoramento de Anuros baseado em redes de sensores sem fio para avaliação precoce de estresse ecológico”.

Referências

Andrade, I. B. D. & Mateus, G. R. (2008). Uma abordagem multi-período para a solução do problema de cobertura e conectividade em redes de sensores sem fio planas. In Anais do XXVIII Congresso da SBC.

Barney, B. (1966). Message passing interface (mpi). *MHPCC - Maui High Performance Computing Center*.

Boukerche, A., Oliveira, H., Nakamura, E., e Loureiro, A. (2007). Localization systems for wireless sensor networks. *Wireless Communications, IEEE*, 14(6):6–12.

Campos, B. e Nakamura, F. (2009). Problema de cobertura em rede de sensores sem fio planas voltado ao rastreamento de animais. In XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO). Porto Seguro, Bahia.

GLPK (2009). Gnu linear programming kit. Disponível em <http://www.gnu.org/software/glpk/>. Acessado em 12 de setembro de 2010

Loureiro, A. A. F., Nogueira, J. M. S., Ruiz, L. B., Mini, R. A. F., Nakamura, E. F., e Figueiredo, C. M. S. (2003). Rede de sensores sem fio. Universidade Federal de Minas Gerais. Simpósio Brasileiro de Computação - Jornada de Atualização da Informática.

Meguerdichian, S., Koushanfar, F., Potkonjak, M., and Srivastava, M. B. (2001) Coverage Problems in Wireless Ad-hoc Sensor Networks. In Proceedings of IEEE INFOCOM.

Menezes, G. C., Lins, A., Cabral, R. da S., Nakamura, F. G. (2005) Uma Abordagem Paralela para os Problemas de Cobertura e Conectividade em Redes de Sensores Sem Fio. Anais do XXXVII SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Gramado, RS.

Nakamura, F. G., Quintão, F. P., Menezes, G. C., e Mateus, G. R. (2005). An optimal node scheduling for flat wireless sensor networks. In ICN (1), pages 475–482.

Quintão, F. P., Mateus, G. R., e Nakamura, F. G. (2003). Uma abordagem evolutiva para o problema de cobertura em redes de sensores sem fio. *Revista Eletrônica de Iniciação Científica (REIC) da Sociedade Brasileira de Computação (SBC)*.

Talbi, E-G. (2009) *Metaheuristics: from design to implementation*. Wiley.

Viera, M., Viera, L., Ruiz, L., Loureiro, A., Fernandes, A., e Nogueira, J. (2003). Scheduling nodes in wireless sensor networks: a voronoi approach. *Local Computer Networks*, 2003. LCN '03. Proceedings. 28th Annual IEEE International Conference on, pages 423–429.