

Uma Abordagem Multi-Período para a Solução do Problema de Cobertura e Conectividade em Redes de Sensores Sem Fio Planas

Iuri Bueno Drumond de Andrade,
Geraldo Robson Mateus(Orientador)

¹Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
Av. Antonio Carlos, 6627, 31270-010, Belo Horizonte, MG, Brazil
Telefone / fax: 31 3499-5589 / 31 3499-5858

{bueno, mateus}@dcc.ufmg.br

Resumo. Este artigo apresenta uma nova heurística gulosa para a solução do Problema Multi-período de Cobertura, Conectividade e Roteamento Dinâmico em Redes de Sensores sem Fio Planas. Os resultados computacionais encontrados indicam que a heurística proposta é eficiente fornecendo soluções aproximadas quando comparadas as soluções ótimas, com reduzidos tempos de execução. Ainda mais, possibilita flexibilidade e garantia de cobertura máxima da área sensoreada.

Abstract. This paper presents a new greedy heuristic to solve the Multi-Period Coverage, Connectivity and Dynamic Routing Problem in Flat Wireless Sensor Networks. The computational results suggest that the proposed heuristic is an efficient approach giving approximate solutions when compared to the optimal solutions, with reduced execution times. Moreover, it permits flexibility and guarantee of maximal coverage of the sensed area.

1. Introdução

O crescente aumento das pesquisas nas áreas de processadores embutidos, rádios e sistemas micro-mecânicos, abriu caminho para criação de um novo tipo de rede, as redes de sensores sem fio(RSSFs). As RSSFs são um tipo especial de rede móvel *ad-hoc* (MANET - Mobile Ad-hoc Networks) formadas por dispositivos autônomos e compactos com capacidades de sensoramento, comunicação e processamento. Estes dispositivos são conhecidos como nós sensores. Dentre as características das RSSFs, vale a pena destacar as restrições de energia, comunicação, a redundância, a dependência das aplicações e a possibilidade de serem estabelecidas em áreas de difícil acesso e inóspitas através do lançamento dos nós nestas regiões.

Nas aplicações de RSSFs, os nós sensores são posicionados em uma determinada área em que se deseja monitorar, coletando os dados de um fenômeno. Como os dispositivos se intercomunicam, os dados coletados individualmente por esses podem ser disseminados pela rede e roteados para um nó sorvedouro ou estação rádio base, para então serem processados e analisados por um observador externo à rede.

Devido à possibilidade de redundância na cobertura, que por sua vez leva à redundância de dados, e pelo fato de um dos objetivos das soluções em RSSFs ser a busca

constante por economia de energia, esquemas de escalonamento de nós, também conhecidos como controle de densidade, trazem consideráveis ganhos tanto de energia quanto na disseminação de dados da rede[Tilak et al. 2002]. O controle de densidade consiste em ativar alguns nós, enquanto outros são agendados para ficarem inativos ou entrarem em modo de economia. Nestes esquemas busca-se a melhor maneira de decidir quais nós devem permanecer ativos ou inativos e quando isto deve acontecer. As soluções visam maximizar o tempo de vida da rede e garantir requisitos mínimos de qualidade de serviço como cobertura e roteamento de dados.

Quintão et al. [Quintão et al. 2005] comparam a solução ótima para um modelo de Programação Linear Inteira (PLI) do problema multi-período de cobertura com as obtidas por um algoritmo evolucionário. Foram obtidos bons resultados, quando visto pela ótica dos valores da função objetivo, e principalmente quando comparado ao tempo e execução para conseguir tais resultados.

Este trabalho aborda o Problema Multi-período de Cobertura e Conectividade (PMCC) em Redes de Sensores sem Fio Planas. Seu objetivo é prover soluções para o PMCC que minimizem o consumo de energia da rede, conciliando a maior área de cobertura possível e garantindo o roteamento entre os mesmos e o sorvedouro. A solução proposta resguarda nós que tenham *energia residual*¹ baixa, preocupando-se em não ultrapassar os limites de energia dos nós, para cada período de tempo t , isto é, o problema tratado comporta tais restrições em multi-períodos. Ele é resolvido por uma heurística gulosa que contrói iterativamente a solução para cada período t .

2. Objetivo

A abordagem proposta para o PMCC visa garantir a redução do consumo de energia da rede, conciliando, ao mesmo tempo, a maximização de sua área de cobertura, e garantindo roteamento entre os nós. Para isso, a heurística analisa a energia residual dos nós da rede, juntamente com a porcentagem de redundância em suas áreas cobertas, de forma a tentar encontrar soluções, para cada período de tempo t , que distribuam uniformemente a energia consumida pela rede e maximizem sua área de cobertura. Portanto, sua atuação visa encontrar soluções para multi-períodos.

Para se tratar o problema e contabilizar a cobertura, a área a ser monitorada é discretizada em um conjunto de quadrados de dimensões iguais, onde são projetados em seus centros, *um ponto que demanda por sensoriamento*. No decorrer do texto esses serão denominados *pontos de demanda*. Já a área sensoreada por um nó corresponderá a um círculo de raio R_s , onde R_s é o raio de sensoriamento do nó [Wang et al. 2003],[Huang and Tseng 2003]. Para este trabalho, considera-se uma área plana e sem obstáculos, onde todo ponto de demanda contido na área do círculo de raio R_s está coberto. Dessa forma, o problema de cobertura se restringe a verificar, para cada um destes pontos de demanda, se existe um nó sensor que o cobre.

Considerando que os dados que não chegam ao observador não têm validade alguma para a aplicação, necessita-se de alguma garantia para sua disseminação. Isso pode ser feito assegurando o roteamento da rede, ou seja, assegurando que existe uma rota de cada nó ativo a um nó sorvedouro.

¹Energia contida no nó.

O problema tratado neste trabalho pode ser formalmente definido como: *Dada uma área de monitoramento A , com um conjunto de pontos de demanda D , um conjunto de nós sensores S , um conjunto de nós sorvedouros M e t períodos, sendo $t = 1, \dots, t = T$ (tempo de vida esperado da rede), o Problema de Controle de Densidade em Redes de Sensores sem Fio (PCD-RSSF) Multi-Período consiste em garantir para cada ponto de demanda $d \in D$ na área A que pelo menos q nós sensores $s \in S$ o cubram e que exista uma rota entre cada nó sensor ativo $s \in S$ e um nó sorvedouro $m \in M$ em cada período t , respeitando-se os limites de energia dos nós sensores.*

Nakamura et al. [Nakamura et al. 2005] modelam este problema com um modelo de Programação Linear Inteira, resolvido através de um *software* de otimização comercial. A avaliação da heurística gulosa para o PMCC será feita comparando-se a solução ótima do modelo de PLI com os resultados obtidos pelo algoritmo.

3. Solução Proposta

Como citado anteriormente, em RSSFs existe a possibilidade de redundância na área coberta pelos nós ativos, causando um consumo desnecessário de energia. A heurística proposta pretende diminuir tais redundâncias, criando políticas de desligamento desses, caso o ganho na área de cobertura da rede ao se ligá-los seja baixo. Ao mesmo tempo, ela tenta distribuir uniformemente o consumo de energia por todos os nós, equilibrando assim, a energia residual da rede.

Para isso, a heurística verifica a área que somente o nó analisado cobre, quer dizer, verifica-se a quantidade de pontos de demanda que não são cobertos por nenhum outro nó ativo da rede, chamada de *área própria de cobertura*. A relação entre essa e a área total coberta pelo nó analisado é comparada com um valor limite α , fixando-o como desligado caso tal valor seja superado.

Desta forma, a heurística consegue controlar a quantidade de nós que serão ligados, já que aqueles que apresentarem muita área redundante serão fixados como desligados, implicando em economia de energia para a rede.

Para este trabalho, atribuiu-se um valor limite α constante durante toda a busca, de forma que:

$$\alpha \in [0, 1]$$

Seguindo o que foi descrito anteriormente, a solução é construída de forma iterativa, baseada no conceito da busca gulosa, dividindo-se o problema em sub-problemas, os quais podem ser resolvidos localmente, e portanto adequados ao conceito de vizinhança para melhor explanação da heurística.

O **algoritmo 1** ilustra a construção da solução. A cada iteração, avalia-se toda vizinhança do nó corrente, onde escolhe-se seu melhor vizinho para inseri-lo à solução parcial. Para isso, estes vizinhos são avaliados a partir de uma *função objetivo* em conjunto com o critério de desligamento citado anteriormente. A fim de garantir o roteamento entre os nós da rede, a heurística inicia a construção da solução a partir do nó sorvedouro.

Para possibilitar uma solução multi-períodos, o algoritmo é executado t vezes, onde t é o número de períodos em que a rede será sensoreada.

Algoritmo 1: Heurística gulosa construtiva para PMCC

Saída:
VetSol - Vetor contendo os nós pertencentes a melhor solução para um período;

- 1 Definição das variáveis;**
- 2** *i* - Nó corrente;
- 3** *j* - Nó vizinho de *i* que será analisado;
- 4** *i** - Melhor nó escolhido através de uma função objetivo na vizinhança de *i*;
- 5** *SORVEDOURO* - Nó sorvedouro;
- 6** α - Limite mínimo de cobertura permitido para que o nó analisado não seja desligado;
- 7 Inicialização das variáveis;**
- 8** $i^* \leftarrow \text{SORVEDOURO}$;
- 9** Pai de $i^* \leftarrow -1$;
- 10 enquanto** Pai de i^* *for diferente de j* **faça**
- 11** $f(i^*) \leftarrow \infty$;
- 12** *Marca i como pai de i* caso este ainda não possua pai*;
- 13** $i \leftarrow i^*$;
- 14** **enquanto** Todos os vizinhos de *i* não forem analisados **faça**
- 15** $x \leftarrow \text{CalcAreaPropria}(j, \text{VetSol})$;
- 16** **se** $x < \alpha$ **então**
- 17** *Marca j como desligado*;
- 18** **fim**
- 19** $f(j) \leftarrow \text{CalcFuncObjetivo}(i, j)$;
- 20** **se** $f(j) < f(i^*)$ **então**
- 21** $f(i^*) \leftarrow f(j)$;
- 22** $i^* \leftarrow j$;
- 23** **fim**
- 24** **fim**
- 25** $\text{VetSol} \leftarrow \text{VetSol} + i^*$;
- 26** $\text{CalcEnergiaReal}(\text{VetSol})$;
- 27** **fim**
- 28** **retorna** *VetSol*

Com isso, pode-se perceber que são criados dois subconjuntos distintos, o conjunto dos nós ativos e o dos nós inativos, ambos pertencentes inicialmente a um conjunto que contém todos os nós em um estado não analisado. Assim, os nós pertencem inicialmente ao conjunto dos não analisados e, após serem analisados, são direcionados a um dos subconjuntos. Para isso, foi utilizado um mecanismo de rotulação por cores para classificar em qual conjunto cada nó pertence. A especificação das cores utilizada é descrita a seguir:

Branco - Cor utilizada para indicar que o nó pertence ao conjunto dos nós não analisados;

Preto - Cor utilizada para indicar que o nó pertence a solução(conjunto de nós ativos);

Vermelho - Cor utilizada para indicar que o nó possui uma área própria de cobertura baixa, devendo ser desativado no período *t*(conjunto de nós inativos);

Todos os nós são inicialmente marcados como branco e podem se tornar vermelho ou preto no decorrer da busca.

Dessa forma, a seleção do proximo nó que será incorporado à solução será feita avaliando-se uma *função objetivo*, dada por:

$$F^t(.) = \frac{F_e^t(.)}{F_c^t(.)} \cdot F_{custo}^t(.) \quad (1)$$

onde,

$$AreaVizinho^t = AreaVizinhoTotal - AreasInterNos \quad (2)$$

$$F_c^t(.) = AreaVizinho^t \quad (3)$$

$$F_e^t(.) = \frac{EnergiaInicialNo}{EnergiaResidual^t} \quad (4)$$

$$F_{custo}^t(.) = PesoCor^t \cdot Restricao^t \quad (5)$$

sendo,

$AreaVizinhoTotal$ = Área de cobertura total do nó vizinho analisado, quer dizer, a quantidade de pontos de demanda total que esse cobre;

$AreasInterNos$ = Áreas de intersecções de todos os nós de coloração preta com o nó vizinho analisado;

$EnergiaInicialNo$ = Capacidade total de energia comportada pela bateria dos nós;

$EnergiaResidual^t$ = Energia restante na bateria do nó vizinho analisado no período t ;

$PesoCor^t$ = Peso que será atribuído a função de acordo com a coloração do nó vizinho analisado no período t (explicado mais adiante);

$Restricao^t$ = Penalidade usada para restringir a escolha de determinados nós no período t (explicado mais adiante);

As variáveis que contém t como indexador na função objetivo, assumem valores distintos a cada período.

Na equação 3, a função busca maximizar a quantidade de pontos cobertos por cada nó ativo da rede, já que pretende ter a menor área de intersecção possível ou a maior área própria de cobertura.

Já na equação 4, visa-se a busca por nós que possuam energia residual alta no período t , de forma a distribuir o consumo de energia mais uniformemente entre os nós da rede.

A equação 5 é utilizada para ponderar determinados critérios como o peso relacionado a cor do nó ou criar restrições quanto a seleção desses no período t . Isso é necessário já que nós de quaisquer colorações podem ser analisados. Dessa forma, $PesoCor$ é utilizado para mapear tais cores através de pesos, usando a seguinte relação:

$$PesoBranco < PesoPreto < PesoVermelho \quad (6)$$

A partir desta relação, percebe-se que há uma ordem de escolha dos nós baseada em suas cores, de forma a priorizar nós ainda não analisados, evitando a utilização de nós inativos, já que a heurística tende a minimização da função objetivo. Portanto, através de experimentações, definiram-se tais pesos como:

$$PesoBranco = 1 \quad (7)$$

$$PesoPreto = AreaMaximaNo \quad (8)$$

$$PesoVermelho = AreaMaximaNo * EnergiaInicialNo \quad (9)$$

Onde *AreaMaximaNo* representa a *área máxima coberta* possível por um nó, ou a quantidade máxima de pontos de demanda que o nó pode cobrir.

Já em relação a **Restricao**, foi considerado três tipos de restrições quanto a escolha dos nós analisados:

- 1 - Restrições quanto a formação de ciclos;
- 2 - Restrições quanto a seleção de nós vizinhos ao sorvedouro;
- 3 - Restrições quanto a quantidade de descendentes que o nó corrente consegue comportar;

A restrição **1** é gerada ao impedir que os nós analisados escolham nós de coloração preta que não sejam seus pais. Isto garante com que a solução tenha apenas um único caminho entre um nó qualquer e o sorvedouro.

Já **2** é gerada ao impedir que os nós escolham, durante a busca, vizinhos que pertençam à vizinhança do sorvedouro. Isso tenta tornar a solução mais ramificada, criando-se vários caminhos a partir desse, de forma que os nós de cada caminho sejam menos sobrecarregados (já que possuirão menos descendentes), uma vez que a busca apresenta a característica de retornar ao sorvedouro caso não haja *vizinhos viáveis*² para se escolher (tal característica será explicada mais adiante). Do contrário a solução poderá conter somente um único caminho partindo do sorvedouro, não permitindo com que esse possa tentar um novo, já que seus vizinhos ou estão ativos ou marcados como desligado, o que tornaria os nós do único caminho bastante sobrecarregados.

Isto pode ser verificado analisando-se a figura 1, onde a solução encontrada sobrecarrega muito seus nós (principalmente o nó A). Já na figura 2, percebe-se que a solução tenta distribuir pela vizinhança do sorvedouro os nós pertencentes a essa, de forma a diminuir a sobrecarga de cada um.

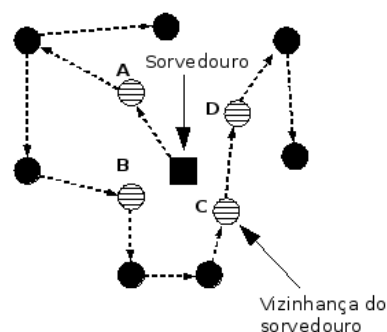


Figura 1. Restrição 2 desabilitada

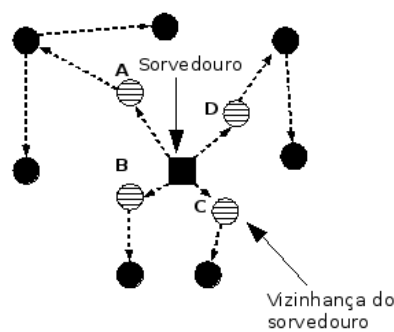


Figura 2. Restrição 2 habilitada

A restrição **3** analisa a energia residual do nó corrente, calculando-se a quantidade de descendentes que este nó poderá comportar com essa energia, no período t . Se o valor encontrado for menor do que dois, significa que tal nó não consegue comportar mais do que a si próprio, impedindo-se que o caminho continue a partir dele. Tal restrição é necessária pois pode haver casos em que, dada uma vizinhança qualquer, um nó analisado, embora possuindo baixa energia residual, pode vir a ser escolhido, caso os demais candidatos apresentem algum tipo de impedimento (restrições ou nó marcado como desligado).

²Nós que não foram marcados como desligados ou que não apresentam restrições.

Portanto, pela função objetivo, *pretende-se equilibrar o consumo de energia da rede, tornando-a mais uniforme no decorrer dos períodos* ao mesmo tempo que visa-se maximizar sua área de cobertura. Como tanto na equação 3 quanto na 4 são almejados os menores valores possíveis, na função objetivo é de esperar que isso também ocorra.

O peso atribuído a cada tipo de coloração possível para o nó tem como objetivo permitir que a busca seja bidirecional, quer dizer, se um nó corrente não possuir nós vizinhos viáveis, ele pode retornar ao seu pai que então escolhe um novo vizinho. Com isso, o algoritmo se aproxima de uma busca do tipo *backtracking* só que mais atenuada, já que não procura em toda a árvore de combinações.

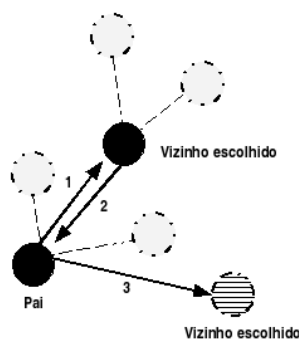


Figura 3. Exemplo de como o algoritmo caminha baseado nas cores

Como se pode ver na figura 5, o nó corrente escolhe seu melhor vizinho em 1. Este vizinho passa a ser o corrente, iniciando a procura por seu melhor vizinho. Como não acha nenhum nó viável, ele retorna ao seu pai em 2 que inicia uma nova busca em sua vizinhança, escolhendo um novo melhor vizinho em 3. Porém, a sua antiga escolha permanece na solução, criando uma solução mais ramificada.

Ao fim desse processo uma solução é obtida. Em seguida, ocorre a atualização do estado de energia em cada nó, baseado em [Nakamura et al. 2004], já que neste momento a heurística sabe exatamente quantos descendentes estes nós possuem. Porém, durante esta fase, pode acontecer de alguns nós analisados não conseguirem comportar tal desconto, devido à quantidade de descendentes que os mesmos possuem. Caso isto ocorra, a heurística tentará executar um *mecanismo de troca de paternidade*, através dos seguintes passos:

- 1 - Caso haja algum nó de coloração preta vizinho ao sorvedouro e a algum descendente do nó analisado, e que possua energia para se conectar a este descendente, troca-se a paternidade do segundo pelo primeiro e recalcula-se o desconto de energia para toda a rede;
- 2 - Se houver algum nó que possa ser ativado (nós de coloração branca ou vermelha), que seja vizinho ao sorvedouro e a algum descendente do nó analisado, e que possua energia para se conectar a este descendente, ele será inserido na solução(modificando sua cor para preta), ligado ao sorvedouro, e será feita a troca da paternidade do segundo pelo primeiro, recalculando o desconto de energia para toda a rede;

- 3 - Caso o passo 1 e 2 sejam falsos, os descendentes sem filhos do nó analisado são retirados até que o mesmo consiga suportar o desconto de energia;

A ordem imposta acima foi necessária pois atentou-se ao fato de que no passo 1 tenta-se preservar a área coberta, juntamente com a minimização do consumo de energia pela rede, já que não foi necessário ativar nós extras para tentar garantir a cobertura encontrada. Em 2 isto também ocorre porém sem a tentativa de minimização do consumo, já que tenta-se ligar nós extras para isto. Já em 3, o objetivo é simplesmente tentar garantir com que o nó analisado consiga suportar o desconto de energia, sacrificando a cobertura encontrada.

O critério de parada se baseia no fato de que durante as iterações, pode haver a possibilidade do nó corrente escolher seu pai como melhor vizinho caso não haja vizinhança viável para ser escolhida. Isto faz com que a solução caminhe de volta ao nó sorvedouro, para que esse escolha um novo melhor vizinho. A partir disso, a busca será interrompida toda vez que o melhor vizinho escolhido pelo nó sorvedouro for seu descendente, visto que o nó escolhido como melhor vizinho já o fora em alguma iteração anterior, não havendo necessidade de repeti-lo.

4. Resultados Computacionais

Para avaliar o algoritmo proposto foram geradas instâncias de testes para uma área de sensoriamento igual a $100m^2$ com uma distribuição aleatória dos nós ao longo dessa. Considerou-se que, para todas as instâncias, haverá 4 períodos com duração de 1 hora cada, raio de comunicação e de sensoriamento igual a $2m$ e $3m$ respectivamente, capacidade de energia da bateria igual a $400mAh$ e *energia de ativação*³ igual a $10mAh$.

Foi comparado, ainda, o resultado obtido com a solução ótima encontrada através da resolução do modelo descrito por Nakamura et al. [Nakamura et al. 2005] utilizando-se o pacote comercial de otimização CPLEX 7.0 [ilo 2003].

A tabela 1 faz uma comparação entre a solução ótima e as encontradas pela heurística proposta. Ao analisar os resultados obtidos pela solução proposta com $\alpha = 0.7$, percebe-se que embora não tendo garantido cobertura total, o consumo de energia da rede nos períodos ficou próximo ao consumo ótimo (em média, ficaram 14% pior). Porém, na média, a quantidade de nós ativos foi menor na solução proposta. Isso implica que, apesar das restrições impostas durante a busca, ainda há muitos nós sendo sobrecarregados com uma quantidade significativa de descendentes. Dessa forma, uma troca de paternidade entre nós, privilegiando pais que são vizinhos ao sorvedouro reduziria o consumo de energia da rede.

Já em relação a solução proposta com $\alpha = 0.9$, percebe-se que o aumento do parâmetro α implica na tentativa de se garantir a cobertura total da área sensoreada. Porém, como dito anteriormente, isso torna os nós cada vez mais sobrecarregados, causando um consumo excessivo de energia da rede. Percebe-se, entretanto, que quando o mecanismo de troca de paternidade é acionado (representado por um asterisco ao lado do consumo de energia nas instâncias), há uma redução, em média, do consumo de energia

³Energia gasta para se ativar um nó e usado para calcular o desconto de energia de acordo com o modelo descrito em [Nakamura et al. 2004].

Solução Ótima					Solução proposta com $\alpha = 0.7$			Solução proposta com $\alpha = 0.9$		
Nós Sensores	Período	Nós ativos	Área não coberta(%)	Energia Total consumida	Nós ativos	Demanda não atendida(%)	Energia Total consumida	Nós ativos	Área não coberta(%)	Energia Total consumida
40	1	15	0	896,2	11	8	774,80	17	0	1788,00
	2	15	0	746,2	11	7	769,25	17	1	1772,15
	3	15	0	756,2	12	8	921,25	22	0	1341,15*
	4	15	0	746,2	12	6	784,20	20	8	1457,05
45	1	15	0	887,15	11	8	776,35	17	0	1788,95
	2	15	0	737,15	12	7	830,25	18	1	1978,10
	3	15	0	737,15	13	6	858,00	18	1	1491,70*
	4	15	0	737,15	11	8	697,40	21	1	1583,45
50	1	15	0	887,15	12	5	888,35	17	0	1788,95
	2	15	0	737,15	13	4	898,25	18	2	1990,05
	3	15	0	737,15	14	3	932,90	19	0	1634,60*
	4	15	0	737,15	13	6	1003,05	21	0	1899,85
55	1	14	0	852,85	12	5	903,75	17	0	1788,85
	2	14	0	713,45	12	6	827,25	17	2	1740,45
	3	14	0	703,45	13	1	937,95	17	0	1421,95*
	4	14	0	742,60	13	8	909,30	18	1	1496,90
60	1	13	0	781,95	13	2	984,60	16	0	1463,10
	2	14	0	705,80	12	6	827,25	17	1	1766,60
	3	14	0	694,95	13	1	937,95	19	0	2077,80
	4	13	0	651,95	13	8	909,30	19	1	1512,90*
Média		14,5	0	759,45	12,3	5,65	868,57	18,25	0,95	1689,13

Tabela 1. Tabela de comparação entre a solução ótima e a heurística proposta

Solução Proposta	Nós Sensores				
	40	45	50	55	60
Ótima	70,93s	120,04s	220,19s	3838,7s	4051s
proposta com $\alpha = 0.7$	< 1s	< 1s	< 1s	< 1s	< 1s
proposta com $\alpha = 0.9$	< 1s	< 1s	< 1s	< 1s	< 1s

Tabela 2. Tabela de comparação entre os tempos de execução entre as soluções

se comparado aos períodos anteriores do em questão, mesmo havendo um aumento de nós ativos.

A importância da troca de paternidade pode ser visto também na solução ótima, onde percebe-se que essa apresenta a característica de manter enquanto possível, nos períodos subsequentes, a solução encontrada no período t , apenas trocando a paternidade dos nós. Isso pode ser verificando principalmente nas instâncias de 40 a 50 nós, onde o decréscimo de energia do primeiro período para os demais é igual a energia de ativação multiplicado pela quantidade de nós ativos. Dessa forma, a solução ótima consegue garantir com que liguem-se menos nós durante os períodos, economizando o consumo de energia da rede.

Entretanto para encontrar a solução ótima através de pacotes comerciais de otimização, gasta-se muito tempo (tabela 2), o que torna inviável sua utilização em grandes instâncias. Em contrapartida, pelo fato da solução proposta apresentar um tempo de execução inferior a 1 segundo, essa torna-se bastante escalável.

5. Conclusão e Trabalhos Futuros

A proposta deste trabalho é resolver o Problema de Cobertura e Conectividade em uma Rede de Sensores Sem Fio Planas. A abordagem escolhida foi o desenvolvimento de

uma heurística gulosa que tenta reduzir o consumo de energia da rede, flexibilizando a necessidade de cobertura máxima de sua área.

Os resultados mostram que a heurística proposta se aproxima da solução ótima em um tempo computacional muito inferior ao obtido através da execução do modelo descrito por Nakamura et al. [Nakamura et al. 2005], o que implica na possibilidade de escalabilidade das instâncias de testes. Além disso, percebe-se que houveram melhorias significativas na solução quando ocorreram as trocas de paternidade dos nós. Isso implica que um esforço maior nesta parte trará bons resultados.

Para trabalhos futuros pretende-se aplicar, sobre a heurística proposta, uma busca local, de forma a tratar a troca de paternidade de maneira mais global ao invés de fazê-lo somente quando algum nó não consiga comportar o desconto de energia. Além disso, pretende-se ativar de maneira inteligente, aqueles nós que foram fixados como inativos mas que cubram alguma área, já que a heurística possui informações sobre esses, de forma a tentar garantir cobertura máxima sem forçar o aumento do parâmetro α .

Agradecimentos

Agradeço a professora Fabíola Guerra Nakamura por me co-orientar neste trabalho, uma vez que sua experiência no problema tratado foi de grande valia. Agradeço também ao colega Flávio Martins Cruzeiro por auxiliar-me nos problemas de decisão que tive durante a construção da heurística.

Referências

- (2003). Ilog cplex. fonte: <http://www.ilog.com/products/cplex/>.
- Huang, C. and Tseng, Y. (2003). The coverage problem in a wireless sensor network. In *Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications*, pages 115–121. ACM Press.
- Nakamura, F., G.C.Menezes, F. Q., and Mateus, G. R. (2004). Planejamento dinâmico para controle de cobertura e conectividade em redes de sensores sem fio. In *Workshop de Comunicação sem Fio e Computação Móvel*, volume 1, pages 182–191.
- Nakamura, F., Quintão, F., Menezes, G., and Mateus, G. R. (2005). An optimal node scheduling for flat wireless sensor networks. In *4th International Conference on Networking - Lecture Notes in Computer Science*, volume 3420, pages 104–483.
- Quintão, F., Nakamura, F. G., and Mateus, G. (2005). A hybrid approach to solve the coverage and connectivity problem in wireless sensor networks. *Journal of the Operational Research Society/Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*. Em avaliação.
- Tilak, S., Abu-Ghazaleh, N. B., and Heinzelman, W. (2002). Infrastructure tradeoffs for sensor networks. In *Proceedings of the First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, pages 49–58. ACM Press.
- Wang, X., Xing, G., Zhang, Y., Lu, C., Pless, R., and Gill, C. (2003). Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks. In *First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)*.