

Derivando Limites Inferiores para o Consumo de Energia em Redes de Sensores Sem Fio Planas

Adriana Gomes Penaranda, André Ricardo Melo Araújo, Fabíola Guerra Nakamura

¹Programa de Pós-Graduação em Informática - PPGI

Instituto de Computação - IComp

Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Manaus, AM, Brasil

{dricah.gp, andremeloaraujo}@gmail.com, fabiola@icomp.ufam.edu.br

RESUMO

As Redes de Sensores Sem Fios (RSSFs) são um tipo especial de rede móvel *ad hoc* formadas com alta densidade de nós sensores. Essas redes têm alto tráfego de dados e gastam energia com um número desnecessário de nós sensores ativos. Neste trabalho abordamos o Problema de Controle de Densidade, Cobertura e Conectividade (PCDCC) em RSSFs, que consiste na ativação de um subconjunto de nós sensores, que garantam a cobertura da área, conectividade entre nós sensores ativos e minimize o consumo de energia. Propomos uma abordagem Multiperíodo baseada em uma abordagem Periódica. A abordagem Multiperíodo divide o tempo esperado de vida da rede em períodos de tempo e calcula, de forma global, uma solução para cada período, e a abordagem Periódica encontra a melhor solução em um dado período de tempo. Estas abordagens são modelados através de Programação Linear Inteira (PLI). As soluções ótimas são comparadas com *Geographical Adaptive Fidelity* (GAF) e *Hierarchical Geographical Adaptive Fidelity* (HGAF).

PALAVRAS CHAVE: Problema de Controle de Densidade. PLI. RSSFs.

Área principal: Otimização Combinatória.

ABSTRACT

Wireless Sensor Networks (WSNs) are a special kind of ad hoc networks designed to comprise a high density of sensor nodes. These networks have high traffic of data and waste energy with an unnecessary number of active sensor nodes. In this paper we address the Density Control, Coverage and Connectivity Problem (DCCCP) in WSNs, that consists in activating a subset of sensor nodes, which assure the area coverage and the nodes connectivity, and minimize the energy consumption. We propose a Multiperiod approach based on Periodic approach. The Multiperiod approach divides the expected network lifetime in time periods and calculates, in a global way, a solution for each period, and a Periodic Approach finds the best solution in a given time. These approaches are modeled through Integer Linear Programming (ILP). We compare the optimal solutions with *Geographical Adaptive Fidelity* (GAF) and *Hierarchical Geographical Adaptive Fidelity* (HGAF).

KEYWORDS: Density Control Problem. ILP. WSNs.

Main area: Combinatorial Optimization.

1. Introdução

As Redes de Sensores sem Fios (RSSFs) são um tipo especial de rede móvel *ad hoc* que têm como objetivo monitorar ambientes e transmitir dados coletados a um observador. São compostas por nós sensores que devido ao tamanho reduzido possuem restrições de energia, processamento e comunicação. Estas redes possuem diversas áreas de aplicação como no ambiente, fazendo rastreamento de animais; no tráfego, monitorando os veículos; na medicina, monitorando o funcionamento de órgãos; e na área militar, detectando presença de inimigos [Loureiro et al. (2002)].

A alta concentração de nós sensores por área é utilizada para garantir o atendimento dos requisitos da aplicação, como, por exemplo, cobertura da área e conectividade dos nós sensores. No entanto, a alta concentração de nós sensores pode levar a problemas como o consumo desnecessário de energia, interferências, e colisão de pacotes. O Problema de Controle de Densidade, Cobertura e Conectividade (PCDCC) proposto neste trabalho, consiste em determinar um subconjunto de nós sensores para ficarem ativos enquanto os demais serão desativados ou agendados para dormir. Este subconjunto deve garantir a cobertura da área, conectividade dos nós sensores e minimizar o consumo de energia [Shang & Shi (2005); Nguyen et al. (2010); Cheng & Yen (2006)].

Dois abordagens são utilizadas para tratar o PCDCC: uma Multiperíodo e outra Periódica. A abordagem multiperíodo estima o tempo de vida da rede, o divide em períodos de tempo e calcula, de forma global, uma solução para o PCDCC em cada período, respeitando o total de períodos que um nó sensor pode ficar ativo. A abordagem periódica encontra a solução para o PCDCC em um determinado período de tempo e repete esse procedimento periodicamente. Antes de cada rodada, a lista de nós sensores disponíveis é atualizada. Estas abordagens são modeladas com Programação Linear Inteira (PLI) e resolvidas por um pacote de otimização comercial. A função objetivo minimiza a energia gasta com ativação, transmissão e manutenção do nó sensor, que é a soma da energia consumida pela placa, pelo processador e pelo rádio. O objetivo é usar as soluções ótimas para obter limites inferiores para o consumo de energia em redes de sensores. As soluções ótimas são comparadas com os algoritmos *Geographical Adaptive Fidelity* (GAF) e *Hierarchical Geographical Adaptive Fidelity* (HGAF).

O trabalho está organizado da seguinte forma. Seção 2 lista alguns algoritmos conhecidos para controle de densidade em RSSFs. Seção 3 define formalmente o PCDCC e apresenta as abordagens propostas. Seção 4 mostra e analisa os resultados computacionais e a Seção 5 apresenta as considerações finais.

2. Trabalhos Relacionados

2.1. *Optimal Geographical Density Control Algorithm*

O *Optimal Geographical Density Control Algorithm* (OGDC) é um algoritmo descentralizado e localizado que define um conjunto de condições ótimas sobre as quais um conjunto de nós sensores ativos é encontrado [Zang & Hou (2005)]. No OGDC, os nós sensores inicializam no estado *Undecided* e enviam mensagens para escolher quais ficaram *On* ou *Off* [Zang & Hou (2005); Siqueira et al. (2006)]. O estado do nó sensor é mudado durante o processo de seleção dos nós sensores que ficarão ativos. O processo de seleção começa escolhendo, de forma aleatória, um nó sensor A voluntário para ser o nó inicial. A partir desse nó inicial é selecionado outro nó sensor B com distância de aproximadamente $\sqrt{3r}$.

Em seguida é calculada qual seria a posição ótima para um terceiro nó sensor, de forma que este cubra o ponto de intersecção entre A e B . O que estiver mais próximo da posição desejada é o selecionado. No final do processo de seleção todos os nós sensores devem estar com estado *On* ou *Off* e permanecem assim até o início da próxima rodada.

Se a bateria do nó sensor for menor que um limite P_t ou os vizinhos já cobrem toda a área então o estado é mudado para *Off*. Os nós sensores não voluntários a nó inicial possuem um temporizador T_s que é cancelado quando o estado é mudado, porém no caso de não ocorrer mudança de estado e T_s expirar então o processo de seleção de nós é repetido. Os nós sensores voltam para o estado *Undecided* ao termino de cada rodada.

Para o funcionamento do algoritmo algumas suposições precisam ser atendidas:

- O raio de comunicação deve ser pelo menos duas vezes o raio de sensoriamento. Segundo Zang and Hou (2005) esta condição garante que a cobertura completa da área resulta na conectividade dos nós sensores ativos.
- Todo nó sensor deve ter conhecimento de sua posição. Esta condição é necessária durante o processo de escolha dos nós sensores que ficarão ativos.
- Todos os nós sensores devem estar sincronizados. Isto é necessário pois para cada rodada os nós sensores devem estar disponíveis no tempo certo, por isso devem estar sincronizados desde a primeira rodada [Aioffi & Mateus (2007)].

2.2. *Geographical Adaptive Fidelity e Hierarchical Geographical Adaptive Fidelity*

O *Geographical Adaptive Fidelity* (GAF) é um algoritmo que explora a redundância dos nós sensores para reduzir o consumo de energia. Isto é feito através da identificação dos nós sensores que são equivalentes do ponto de vista de roteamento e desligamento dos nós sensores desnecessários [Xu et al. (2001)]. Assim, mantendo um nível constante, que os autores chamam, de fidelidade de roteamento.

Para determinar a equivalência dos nós sensores são utilizadas informações de localização e grades virtuais. As grades virtuais são utilizadas para determinar grupos de nós sensores equivalentes. Se um nó sensor é equivalente em um grupo de nós sensores este pode não ser equivalente a outros grupos. O algoritmo divide a área em grades e um nó sensor pertence somente a uma grade virtual. Esses grades virtuais são compostas por duas grades adjacentes A e B , tal que todos os nós sensores em A podem se comunicar com todos os nós sensores em B e vice-versa. Assim, todos os nós sensores, em cada grade, são equivalentes. A figura 1 mostra um exemplo de grades virtuais. Para garantir a

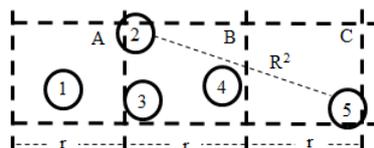


Figura 1. Exemplo de grade virtual [Xu et al. (2001)]

comunicação entre os nós sensores de grades adjacentes, o tamanho da grade é calculada em função do raio de comunicação R . Neste caso temos:

$$r^2 + (2r)^2 \leq R^2 \quad \text{ou} \quad r \leq R/\sqrt{5} \quad (1)$$

Os nós sensores possuem três estados: *Discovery*, *Active* e *Sleeping*. No estado *Discovery*, os nós sensores ligam o rádio e enviam mensagens de descoberta. Essas mensagens são utilizadas para encontrar os nós sensores que pertencem à mesma grade. O estado *Active* consiste no sensoriamento, roteamento, envio e recebimento de mensagens. No estado *Sleeping*, os nós sensores desligam o rádio.

O número de grades virtuais define o número de nós sensores ativos em cada rodada. O GAF pode ativar um número desnecessário de nós sensores devido a grande quantidade de grades [Inagaki & Ishihara (2009)].

Inagaki and Ishihara (2009) propõem uma variação do GAF, chamada *Hierarchical Geographical Adaptive Fidelity* (HGAF). A idéia é reduzir o número de grades, assim, reduzindo o número de nós sensores ativos. Para isto, o HGAF aumenta o tamanho da grade e divide, cada grade, em N^2 subgrades. A figura 2 mostra a divisão da grade.

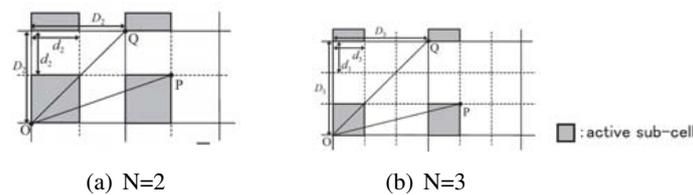


Figura 2. Divisão da grade em N^2 subgrades [Inagaki & Ishihara (2009)]

Assim com no GAF, o HGAF considera que os nós sensores em grades adjacentes devem garantir comunicação entre eles, por isso cada grade necessita ativar um nó sensor em uma subgrade com posição equivalente a subgrade da grade adjacente. Para garantir a comunicação, a distância entre os nós sensores em grades adjacentes não pode ser maior que o raio de comunicação R . Neste caso temos:

$$(d_N)^2 + ((N + 1)d_N)^2 \leq R^2 \quad (2)$$

Assim, o tamanho da subgrade d_N e da grade D_N é:

$$d_N \leq \frac{1}{\sqrt{(N + 1)^2 + 1}} R \quad D_N \leq \frac{N}{\sqrt{(N + 1)^2 + 1}} R \quad (3)$$

Quando $N \geq 3$ o tamanho da grade é:

$$\sqrt{2}D_N \leq R \quad (4)$$

3. Abordagens Multiperíodo e Periódica

Neste trabalho a área de monitoramento é discretizada em pontos de demanda, pois este conceito permite avaliar a cobertura em um espaço discreto, é útil para fins de modelagem, e permite quantificar a cobertura. Formalmente, podemos definir o Problema de Controle de Densidade, Cobertura e Conectividade Estático da seguinte forma:

Dada uma área de monitoramento A , um conjunto de nós sensores S , um conjunto de sorvedouros M , um conjunto de pontos de demanda D , o problema de controle de densidade consiste em garantir, se possível, para cada ponto de demanda $d \in D$ na área A que

pelos menos q nós sensores $s \in S$ o cubram e que exista uma rota entre cada nó sensor ativo $s \in S$ e um sorvedouro $m \in M$.

A Abordagem Periódica consiste em resolver o problema estático periodicamente. A abordagem encontra a melhor solução para um dado instante de tempo, independentemente da topologia de períodos anteriores. No início de cada período o conjunto de nós de sensores é atualizado, e os nós sensores sem energia são retirados da lista de nós disponíveis. A abordagem periódica não tem uma visão geral dos períodos e escolhe a melhor solução para o período atual, sem levar em consideração que no futuro pode haver grandes regiões descobertas ou desconectadas.

A abordagem multiperíodo estima ou define um tempo de vida esperado para a rede, divide-o em períodos e escolhe, globalmente, a solução para cada período. Isto é feito levando em consideração a topologia definida em períodos anteriores [Andrade et al. (2010)]. A melhor solução é a que minimiza o consumo de energia e a falha na cobertura globais, ou seja, somando todos os períodos.

Ambas as abordagens são modeladas como problemas de Programação Linear Inteira e consideram que a área de cobertura do nó sensor é um círculo de raio R , onde R é o raio de sensoriamento do nó sensor. Se a distância entre um ponto de demanda e um nó sensor for menor que o valor R então o nó sensor cobre este ponto. Os modelos assumem que os nós sensores sabem a sua localização e têm um número de identificação único. Para quantificar o consumo de energia dos nós sensores é definido que a aplicação requer sensoriamento contínuo e disseminação periódica, e o tráfego refere-se apenas a transmissão de dados. O problema é modelado como um grafo onde os vértices são os nós sensores e os arcos representam as distâncias entre os nós sensores.

Para a abordagem periódica foi utilizado o modelo proposto por Menezes [Menezes (2004)]. Com base neste modelo, foi proposto um modelo matemático multiperíodo definido como segue.

Os parâmetros utilizados na formulação são:

S conjunto de nós sensores

D conjunto de pontos de demanda

M conjunto de nós sensores que são sorvedouros

T conjunto de períodos

A^s conjunto de arcos que conectam sensores com outros sensores

A^m conjunto de arcos que conectam sensores com sorvedouros

I^j conjunto de arcos (i, j) que entram em um nó sensor $j \in S$

O^i conjunto de arcos (i, j) que saem de um nó sensor $i \in S$

C_{lj} Matriz de conectividade que possui valor 1 se o nó sensor l alcança o ponto de demanda j e 0 caso contrário

EA_i energia de ativação do nó sensor $i \in S$

EM_i energia de manutenção do nó sensor $i \in S$

ET_{ij} energia de transmissão entre os nós sensores i e j , $\{i, j\} \in \{A^s \cup A^m\}$

EH Penalidade de não cobertura

Fazendo $d(l, j)$ a distância entre o nó sensor l e o ponto de demanda j . A matriz de conectividade C_{lj} é composta pelos arcos (l, j) onde $d(l, j)$ é menor ou igual ao raio de sensoriamento do nó sensor l . Fazendo $d(i, j)$ a distância entre os nós sensores i e j . Os conjuntos

A^s e A^m são compostos pelos arcos cujo $d(i, j)$ é menor ou igual ao raio de comunicação do nó sensor i . Para quantificar a energia de transmissão é utilizada a distância euclidiana entre dois nós sensores, se a distância for maior que o raio de comunicação esses dois nós sensores não se alcançam.

As variáveis do modelos são:

x_{ij}^t variáveis que possuem valor 1 se o nó sensor i está cobrindo o ponto de demanda j no período t , e 0 caso contrário

z_{lij}^t variáveis que possuem valor 1 se o arco (i, j) está no caminho entre o nó sensor l e um nó sorvedouro no período t , e 0 caso contrário

w_l^t variável que recebe valor 1 se o nó l é ativado no período t , e 0 caso contrário

y_i^t variável binária que recebe 1 se o nó i está ativo no período t , e 0 caso contrário

h_j^t variáveis que possuem valor 1 se o ponto de demanda j não está coberto no período t , e 0 caso contrário

A formulação proposta é apresentada abaixo. A função objetivo (5) minimiza o consumo de energia da rede. A solução ótima para a formulação matemática indica o conjunto de nós sensores que garantem a melhor cobertura possível e a conectividade do nós sensores, a um menor custo de energia. O segundo termo da função objetivo penaliza pontos de demanda não cobertos.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{l \in S} \sum_{t \in T} (EA_l w_l^t + EM_l y_l^t + \sum_{(i,j) \in A^s \cup A^m} ET_{ij} z_{lij}^t) \\ & + \sum_{j \in D} \sum_{t \in T} EH h_j^t \end{aligned} \quad (5)$$

As restrições (6), (7), e (8) tratam o problema de cobertura. As restrições (6) garantem que pelo menos um nó sensor deve cobrir cada ponto de demanda, a variável h_j^t é incluída na restrição possibilitando a não cobertura de um ponto de demanda. As restrições (7) garantem que um nó sensor inativo para sensoriamento não deve atender um ponto de demanda. As restrições (8) indicam os limites para as variáveis x e h .

$$\sum_{l \in S} (x_{lj}^t C_{lj}) + h_j^t \geq 1, \forall j \in D, \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{j \in D} x_{ij}^t \leq |D| y_i^t, \forall i \in S, \forall t \in T \quad (7)$$

$$0 \leq x, h \leq 1 \quad (8)$$

As restrições (9), (10), (11) e (12) estão relacionadas ao problema de conectividade. As restrições (9) e (10) garantem a conservação de fluxo entre cada sensor $l \in S$ ativo e o nó sorvedouro m e as restrições (11) e (12) garantem que o fluxo só é possível entre os nós sensores ativos.

$$\begin{aligned} \sum_{(i,j) \in I^j(A^s)} z_{lij}^t - \sum_{(j,k) \in O^j(A^s \cup A^m)} z_{ljk}^t &= 0, \\ \forall j \in (S \setminus \{l\}), \forall l \in S, \forall t \in T \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \sum_{(i,j) \in I^j(A^s)} z_{lij}^t - \sum_{(j,k) \in O^j(A^s \cup A^m)} z_{ljk}^t &= -y_l^t, \\ \forall j = l, \forall l \in S, \forall t \in T \end{aligned} \quad (10)$$

$$\sum_{j \in SUM} z_{lij}^t \leq |S| y_i^t, \forall l \in S, \forall i \in S, \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{i \in S} z_{lij}^t \leq |S| y_j^t, \forall l \in S, \forall j \in S, \forall t \in T \quad (12)$$

As restrições (13) e (14) tratam a relação entre as variáveis w e y , o período em que o nó foi ativo e se o nó estava ou não ativo no período anterior.

$$w_l^1 - y_l^1 \geq 0, \quad \forall l \in S \quad (13)$$

$$w_l^t - y_l^t + y_l^{t-1} \geq 0, \quad \forall l \in S, \forall t \in T \text{ e } t \geq 2 \quad (14)$$

As restrições (15) e (16) garantem a quantidade mínima de nós sensores que devem ficar ativos a cada período e o número máximo de períodos que um nó sensor pode ficar ativo. Esta restrição caracteriza o aspecto multiperíodo do modelo.

$$\sum_{l \in S} y_l^t \geq A/\pi r^2 \quad \forall t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{t \in T} y_l^t \leq n \quad \forall l \in S \quad (16)$$

As restrições (17) definem as variáveis y e z como booleanas.

$$y, z \in \{0, 1\} \quad (17)$$

4. Parâmetros e Resultados Computacionais

Considerando u.d. a unidade para quantificar distância, u.e. a unidade para quantificar o consumo de energia e u.t. a unidade para quantificar o tempo, tem-se como parâmetros de entrada:

Área de Monitoramento: 10u.d. x 10u.d.

Número de Pontos de Demanda: 100, que corresponde a 1 ponto de demanda por (u.d.)²

Duração do Período: 1 u.t.

Energia de Ativação: 10 u.e.

Energia de Manutenção: 1.2 u.e.

Penalidade de não Cobertura (EH): 1000

A porcentagem de cobertura é calculada somando-se a quantidade de pontos de demanda cobertos em cada período e dividindo pela quantidade total de pontos somando todos os períodos. O consumo de energia considera que os nós sensores gastam energia com ativação, manutenção e transmissão, como é modelado no primeiro termo da Equação 5. Foi considerada uma rede homogênea, plana e com o nó sorvedouro localizado no canto superior esquerdo. Os períodos possuem a mesma duração de 1 u.t.. O posicionamento dos nós sensores na área de monitoramento foi gerado utilizando grade irregular que é quando os nós sensores são distribuídos em locais pré-definidos formando uma grade e após isso soma-se um desvio aleatório nas suas coordenadas (x, y) . A área de monitoramento é discretizada em pontos de demanda gerando uma grade regular com distância de 1 u.d. entre os pontos de demanda. As instâncias contém a quantidade de nós sensores, a quantidade de pontos de demanda, a matriz de energia de transmissão (ET_{ij}) e a matriz de conectividade (C_{ij}). A matriz de energia é formada com as distâncias euclidianas entre os nós sensores. A matriz de conectividade é formada com as distâncias euclidianas entre o nó sensor e

o ponto de demanda, se a distância for menor ou igual ao raio de sensoriamento então o nó sensor alcança o ponto de demanda. Os testes foram divididos em três baterias. Na Bateria 1 foi comparada a solução ótima das abordagens multiperíodo e periódica, ambas resolvidas pelo software de otimização CPLEX [Ilo (2012)]. Na Bateria 2 foi comparada a solução ótima da abordagem periódica com a solução dos algoritmos GAF e HGAF. Por último, a Bateria 3 verifica até que período a rede garante cobertura e conectividade.

Foram geradas instâncias com 25 nós sensores para a Bateria 1, instâncias com 144 e 169 nós sensores para a Bateria 2 e uma instância com 36 nós sensores para a Bateria 3. Os parâmetros dos nós sensores são: Raio de Sensoriamento (RS) igual a 3u.d. e Raio de Comunicação (RC) iguais a 6u.d. e 7u.d.. Os testes foram realizados considerando 2, 3 e 6 períodos de tempo. Os valores de n , a quantidade máxima de períodos de tempo que um nó sensor pode ficar ativo, são 1, 2 e 2 respectivamente.

4.1. Bateria 1

Os resultados são mostrados nas Tabelas 1 e 2. Pode-se notar, que as instâncias File0_25_6 e File3_25_6, na Tabela 1, possuem o mesmo consumo de energia e a mesma porcentagem de cobertura com 2 e 3 períodos. A diferença ocorre com 6 períodos, onde a instância File0_25_6 consome menos energia e garante mais cobertura na abordagem multiperíodo, e a instância File3_25_6 consome um pouco mais de energia porém garante mais cobertura na abordagem multiperíodo, como também ocorre com as instâncias File3_25_7 e File4_25_7 na Tabela 2. Isso ocorre pois a não cobertura de um ponto de demanda é acrescentado como penalidade na função objetivo, assim a abordagem multiperíodo tenta minimizar a quantidade de pontos não cobertos nos períodos ao menos tempo que tenta minimizar o consumo de energia, enquanto que a abordagem periódica procura sempre a melhor solução a cada período e a penalidade de não cobertura é acrescentada somente se não existe nenhum nó sensor que alcance o ponto de demanda.

Também, pode-se destacar as instâncias File1_25_6 na Tabela 1 e File0_25_7, File2_25_7, File3_25_7 e File4_25_7 na Tabela 2, para 2 e 3 períodos, onde o consumo de energia das abordagens é próximo e ambas garantem a mesma porcentagem de cobertura. Isso ocorre pois a abordagem multiperíodo, ao contrário da periódica, nem sempre utiliza o melhor caminho para cada período, assim, possibilitando que melhores caminhos possam ser escolhidos em períodos futuros, totalizando um consumo menor de energia e sem prejudicar a cobertura.

Percebeu-se, também, que com maiores quantidades de períodos a abordagem multiperíodo obtém melhores resultados em comparação com a abordagem periódica, tanto em consumo de energia quanto em garantia de cobertura, onde pode-se destacar a instância File2_25_7, para 6 períodos, na Tabela 2 que garante 100% de cobertura na abordagem multiperíodo enquanto que a abordagem periódica garante 95%. Para melhor entender como a abordagem multiperíodo garantiu um resultado melhor a Tabela 3 mostra os resultados do consumo de energia de cada período, onde pode-se notar que a abordagem multiperíodo consome mais energia nos quatro primeiros períodos, porém nos dois últimos consome menos e garante 100% de cobertura enquanto que a abordagem periódica garante 85%.

Para a maioria dos testes a abordagem Multiperíodo consegue resultados melhores, devido a visão global do tempo esperado de vida da rede. Nos outros testes os resultados são iguais aos da abordagem periódica.

Qtde Períodos	Solução Ótima - Abordagem Periódica				Solução Ótima - Abordagem Multiperíodo		
	Instância	Consumo de Energia(u.e.)	Tempo(s)	Cobertura(%)	Consumo de Energia(u.e.)	Tempo(s)	Cobertura(%)
2	File0_25.6	255,75	1,13	100,00%	255,75	4,47	100,00%
	File1_25.6	243,82	0,68	99,50%	240,54	4,73	99,50%
	File2_25.6	256,79	1,07	98,00%	241,44	4,64	98,50%
	File3_25.6	238,93	0,71	98,50%	238,93	4,42	98,50%
3	File4_25.6	300,61	0,60	97,50%	284,65	5,13	98,00%
	File0_25.6	311,42	1,13	100,00%	311,42	14,62	100,00%
	File1_25.6	300,65	0,68	99,67%	297,38	7,53	99,67%
	File2_25.6	311,08	1,07	98,67%	295,73	8,09	99,00%
6	File3_25.6	290,98	0,71	98,67%	290,98	8,6	98,67%
	File4_25.6	369,14	0,60	98,00%	267,86	10,81	98,33%
	File0_25.6	583,58	1,17	96,33%	577,04	440,10	99,00%
	File1_25.6	563,83	0,73	96,33%	521,44	265,91	97,67%
	File2_25.6	616,81	1,11	95,67%	586,57	3844,58	97,33%
	File3_25.6	522,82	0,76	95,00%	525,62	391,40	96,67%
	File4_25.6	597,37	0,63	90,33%	546,43	480,50	95,33%

Tabela 1. 25 Nós Sensores, Raio de Sensoriamento igual a 3u.d. e Raio de Comunicação igual a 6u.d.

Qtde Períodos	Solução Ótima - Abordagem Periódica				Solução Ótima - Abordagem Multiperíodo		
	Instância	Consumo de Energia(u.e.)	Tempo(s)	Cobertura(%)	Consumo de Energia(u.e.)	Tempo(s)	Cobertura(%)
2	File0_25.7	278,25	0,83	99,50%	275,77	4,97	99,50%
	File1_25.7	296,74	0,79	97,00%	294,97	5,22	99,00%
	File2_25.7	252,68	1,20	100,00%	251,36	7,87	100,00%
	File3_25.7	236,53	0,67	100,00%	236,31	4,56	100,00%
3	File4_25.7	242,67	1,05	99,50%	238,01	4,92	99,50%
	File0_25.7	337,86	0,83	99,67%	337,36	38,68	99,67%
	File1_25.7	358,77	0,79	98,00%	356,84	33,45	99,33%
	File2_25.7	305,16	1,20	100,00%	303,24	102,45	100,00%
6	File3_25.7	284,46	0,67	100,00%	284,23	6,67	100,00%
	File4_25.7	298,05	1,05	99,67%	294,49	12,83	99,67%
	File0_25.7	603,68	0,87	96,67%	567,84	157,60	97,67%
	File1_25.7	608,75	0,83	90,67%	529,78	178,22	96,00%
	File2_25.7	601,63	1,25	95,00%	565,34	595,95	100%
	File3_25.7	515,82	0,75	97,33%	536,53	978,99	98,33%
	File4_25.7	550,28	1,12	96,67%	551,80	276,77	98,33%

Tabela 2. 25 Nós Sensores, Raio de Sensoriamento igual a 3u.d. e Raio de Comunicação igual a 7u.d.

4.2. Bateria 2

Para um determinado valor de área de monitoramento e raio de comunicação, a quantidade de nós sensores ativos em cada período dos algoritmos GAF e HGAF não varia, pois o número de grades virtuais é fixa e cada grade deve ativar um nó sensor. Para os parâmetros considerados, o algoritmo GAF ativa 16 nós sensores e o HGAF 9 nós sensores por período. A solução ótima para a abordagem periódica e dos algoritmos GAF e HGAF garantiram 100% de cobertura para todas as instâncias. HGAF usa $N = 2$ que significa dividir cada grade em 4 subgrades.

As Tabelas 4 e 5 mostram os resultados. Pode-se notar que GAF consome mais

Instância	Solução Ótima - Abordagem Periódico			Solução Ótima - Abordagem Multiperíodo	
	Períodos	Consumo de Energia(u.e.)	Cobertura(%)	Consumo de Energia(u.e.)	Cobertura(%)
File2_25.7	Período 1	122,475	100%	128,187	100%
	Período 2	52,475	100%	58,187	100%
	Período 3	130,209	100%	131,917	100%
	Período 4	60,209	100%	61,917	100%
	Período 5	153,132	85%	127,568	100%
	Período 6	83,132	85%	57,568	100%
	Total	601,632	95%	565,344	100%

Tabela 3. Tabela detalhada do consumo de energia para a instância File2_25.7

energia que o HGAF devido ao número de nós sensores exigidos pelo algoritmo. A abordagem periódica consome menos energia que o GAF e HGAF em todas as instâncias uma vez que esta fornece a solução ótima para o PCDC estático. Assim, a abordagem é uma interessante alternativa para gerar limites inferiores para o consumo de energia em redes de sensores, desconsiderando-se mensagens de controle de cada abordagem.

Também foi observado que quando a quantidade de nós sensores diminui, os algoritmos GAF e HGAF podem não funcionar corretamente, pois algumas grades podem ficar sem nó sensor. No entanto, mesmo com redes de baixa densidade é possível encontrar soluções com a abordagem periódica, fazendo alguns ajustes como, por exemplo, excluindo os ponto de demanda que não são alcançados para resolver o modelo e depois incluindo-os como falhas na cobertura.

Qtde Períodos	Solução Ótima - Abordagem Periódica				GAF			HGAF		
	Instância	Consumo de Energia(u.e.)	Tempo(s)	Total Sensor	Consumo de Energia(u.e.)	Tempo(s)	Total Sensor	Consumo de Energia(u.e.)	Tempo(s)	Total Sensor
2	F0_144.6	183,90	12390,50	10	574,84	7,00	32	320,08	7,00	18
	F1_144.6	192,48	2999,90	11	578,17	8,00	32	326,33	7,00	18
	F2_144.6	177,51	3321,43	10	579,63	4,00	32	329,09	8,00	18
	F3_144.6	182,14	2848,16	10	576,31	8,00	32	326,99	8,00	18
	F4_144.6	197,40	2819,84	12	577,24	8,00	32	326,50	8,00	18
3	F0_144.6	223,85	12390,50	10	704,91	7,00	32	384,69	7,00	18
	F1_144.6	232,36	2999,90	11	707,74	8,00	32	408,80	7,00	18
	F2_144.6	215,93	3321,43	10	708,29	8,00	32	413,96	8,00	18
	F3_144.6	221,37	2848,16	10	703,42	8,00	32	411,52	8,00	18
	F4_144.6	230,20	2819,84	12	703,22	8,00	32	408,06	8,00	18
6	F0_144.6	406,30	13743,56	15	1251,14	11,00	48	696,55	11,00	27
	F1_144.6	423,09	8157,49	17	1257,95	12,00	48	706,85	11,00	27
	F2_144.6	383,37	4018,05	15	1255,65	11,00	48	714,78	12,00	27
	F3_144.6	410,08	4170,26	16	1251,62	12,00	48	708,73	11,00	27
	F4_144.6	428,82	7421,15	18	1253,80	12,00	48	707,99	11,00	27

Tabela 4. 144 Nós Sensores, Raio de Sensoriamento igual a 3u.d. e Raio de Comunicação igual a 6u.d.

Qtde Períodos	Solução Ótima - Abordagem Periódica				GAF			HGAF		
	Instância	Consumo de Energia(u.e.)	Tempo(s)	Total Sensor	Consumo de Energia(u.e.)	Tempo(s)	Total Sensor	Consumo de Energia(u.e.)	Tempo(s)	Total Sensor
2	F0_169.7	181,56	6812,37	10	574,90	12,00	32	325,56	11,00	18
	F1_169.7	184,21	6020,33	10	574,52	12,00	32	326,33	12,00	18
	F2_169.7	191,55	2725,57	11	575,24	12,00	32	323,48	11,00	18
	F3_169.7	178,14	6017,74	10	572,59	12,00	32	317,54	12,00	18
	F4_169.7	182,27	6905,09	10	578,61	12,00	32	325,10	11,00	18
3	F0_169.7	221,44	6812,37	10	704,39	12,00	32	397,72	11,00	18
	F1_169.7	226,11	6020,33	10	702,68	12,00	32	409,35	12,00	18
	F2_169.7	231,31	5875,46	11	702,35	12,00	32	394,77	11,00	18
	F3_169.7	216,72	6017,74	10	698,70	12,00	32	381,29	12,00	18
	F4_169.7	222,40	6905,09	10	706,29	12,00	32	406,38	11,00	18
6	F0_169.7	398,51	9888,42	15	1249,12	18,00	48	725,65	17,00	27
	F1_169.7	415,52	9146,63	16	1251,36	18,00	48	719,06	18,00	27
	F2_169.7	419,55	5480,07	17	1250,58	18,00	48	722,40	17,00	27
	F3_169.7	394,78	10182,48	15	1244,71	18,00	48	688,81	18,00	27
	F4_169.7	414,69	21638,57	16	1257,46	18,00	48	707,08	17,00	27

Tabela 5. 169 Nós Sensores, Raio de Sensoriamento igual a 3u.d. e Raio de Comunicação igual a 7u.d.

4.3. Bateria 3

Foram executados testes para verificar até que período a rede garante cobertura e conectividade. Para este teste foi considerada uma rede com 36 nós sensores, Raio de Sensoriamento igual a 3u.d. e Raio de Comunicação igual a 6u.d.. O Gráfico 3 mostra o consumo de energia e cobertura. Pode-se notar que os algoritmos GAF e HGAF gastam mais energia e

permanecem ativos menos períodos que as soluções dos modelos, e a abordagem multi-período gasta menos energia e garante mais cobertura em comparação com a abordagem periódica.

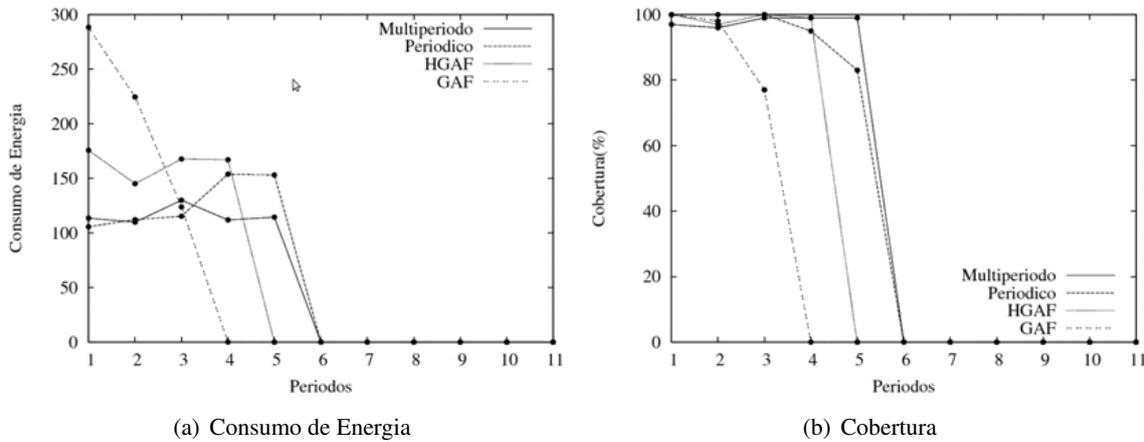


Figura 3. Consumo de Energia

Os teste mostram que a solução considerando que a solução ótima é o somatório de todos os períodos oferece vantagem à abordagem multiperíodo, pois a abordagem tenta fornecer boas soluções para todos os períodos. A abordagem periódica sempre usa os melhores nós sensores, o que significa que a solução de períodos futuros podem ser piores.

5. Considerações Finais

Este trabalho trata o Problema de Controle de Densidade, Cobertura e Conectividade em Rede de Sensores Sem Fio (PCDCC). Duas abordagens diferentes são apresentadas: multiperíodo e periódica, ambas modeladas com formulações matemáticas de PLI e resolvidas no ótimo.

A abordagem multiperíodo divide o tempo esperado de vida da rede em períodos de tempo, que podem ou não ter a mesma duração. A abordagem calcula, de forma global, a solução para o problema de controle de densidade em cada período, respeitando o número de períodos que o nó sensor pode permanecer ativo. A abordagem Periódica é proposta como uma alternativa à abordagem multiperíodo e consiste em encontrar a melhor solução para o PCDCC em um dado período de tempo, e este procedimento é repetido periodicamente. A abordagem periódica é uma alternativa, pois pode trabalhar com redes de alta densidade já que resolve um período de cada vez.

Dado o aspecto global da abordagem multiperíodo quanto aos nós sensores disponíveis e o tempo de vida da rede, a solução ótima fornece a configuração da rede que tem a melhor cobertura possível com o menor consumo de energia total. No entanto, com os parâmetros corretos, ambas as abordagens podem fornecer limites inferiores para o problema de controle de densidade. Devido ao alto custo computacional para alcançar a solução ótima, estamos desenvolvendo trabalhos com métodos exatos e heurísticos para resolver o problema.

GAF e HGAF são algoritmos, conhecidos para o controle de densidade, que dividem toda a área em grades e cada grade deve ativar um nó sensor, o que significa que,

em cada período, o número de nós sensores ativos é fixo. Em comparação com a solução ótima da abordagem periódica, o GAF e HGAF alcançam os mesmos resultados em relação a cobertura, mas consomem mais energia. Assim, consideramos as abordagens alternativas interessantes para gerar limites inferiores para o consumo de energia de aplicações em redes de sensores e, também, para avaliar algoritmos de controle de densidade. Pretendemos estender a avaliação de algoritmos de controle de densidade para outros algoritmos como PEAS, A3, e OGDC.

Agradecimentos

CNPq e FAPEAM projeto 575808/2008-0 (Revelar, CNPq/CT-Amazonia) e 2210.UNI175.3532.03022011 (Projeto Anura, PRONEX CNPq/FAPEAM 023/2009).

Referências

- ILOG CPLEX** (2012). <http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/>.
- Aioffi, W. e Mateus, G.** (2007). Otimização do controle de densidade com sorvedouros móveis em redes de sensores. *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*.
- Andrade, I., Januario, T., Pappa, G., e Mateus, G.** (2010). An evolutionary algorithm to the density control, coverage and routing multi-period problem in wireless sensor networks. In *Congress on Evolutionary Computation (CEC)* (pp. 1 –8).
- Cheng, Y. e Yen, L.** (2006). Range-based density control for wireless sensor networks. *Communication Networks and Services Research Conference (CNSR)*, (pp. 17 – 180).
- Inagaki, T. e Ishihara, S.** (2009). Hgaf: A power saving scheme for wireless sensor networks. *JIP*, 17, 255–266.
- Loureiro, A., Nogueira, J., Ruiz, L., Mini, R., Nakamura, E., e Figueiredo, C.** (2002). Rede de sensores sem fio. *Simpósio Brasileiro de Computação - Jornada de Atualização da Informática*.
- Menezes, G. C.** (2004). Modelo e Algoritmos para a Definição da Densidade, Cobertura e Conectividade em uma Rede de Sensores sem Fio (in Portuguese). Master's thesis, Instituto de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- Nguyen, N., Zalyubovskiy, V., Ha, M., e Choo, H.** (2010). Energy-efficient models for coverage problem using sensors with adjustable sensing ranges. In *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (pp. 1 –6).
- Shang, Y. e Shi, H.** (2005). Coverage and energy tradeoff in density control on sensor networks. *International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)*, (pp. 564 – 570).
- Siqueira, I., Figueiredo, C., Loureiro, A., Nogueira, J., e Ruiz, L.** (2006). An integrated approach for density control and routing in wireless sensor networks. *International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*, (pp. 10).
- Xu, Y., Heidemann, J., e Estrin, D.** (2001). Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In *International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)* (pp. 70–84).
- Zang, H. e Hou, J.** (2005). Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, (pp. 1).