

Abordagens Multiperíodo e Periódica para o Tratamento do Problema de Controle de Densidade em Redes de Sensores sem Fio

Fabiola Guerra Nakamura¹, Flavio Vinícius Cruzeiro Martins²

¹Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal do Amazonas (UFAM)

²Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Minas Gerais

fabiola.ufam@gmail.com, flavio@cpdee.ufmg.br

Abstract. *The Density Control Problem in WSN (DCP-WSN) can deal with the coverage, connectivity and, routing problems, separately or at the same time. This work treats the DCP in two ways: multi-period and periodic. The Multi-period Approach consists in dividing the expect network lifetime in periods and define the best subset of nodes to assure the area coverage and the nodes connectivity in each period. This approach has a global vision of the network and of the periods and respects the nodes battery. The Periodic Approach consists in, periodically, finding the best subset of nodes to assure the coverage and connectivity. The approach, at each period, updates the network state, especially the nodes residual energy. Both the approaches propose Integer Linear Programming Models to treat the DCP-WSN that are solved by a commercial optimization package. The computational results compare the approaches regarding energy consumption and coverage. Keywords: Coverage, Connectivity, WSN, ILP.*

Resumo. *O Problema de Controle de Densidade em RSSFs (PCD-RSSF) pode lidar, individualmente ou em conjunto, com problemas de cobertura, conectividade e roteamento. Este trabalho propõe um tratar o PCD-RSSF de duas maneiras: multiperíodo e periódica. A Abordagem Multiperíodo consiste em definir, em cada um dos períodos, qual o subconjunto de nós sensores que deve estar ativo para garantir a cobertura da rede e a conectividade entre eles, respeitando-se os seus limites de energia e tendo-se uma visão global da rede e dos períodos. A Abordagem Periódica consiste em encontrar a melhor solução para a rede em um determinado instante de tempo e repetir este procedimento periodicamente levando em consideração o estado atual dos nós da rede em relação a disponibilidade e energia residual. Ambas as abordagens propõe modelos de Programação Linear Inteira para lidar com o PDC. Este modelo é resolvido por um pacote de otimização comercial. Os resultados computacionais comparam as abordagens em relação a cobertura e energia consumida. Palavras-chave: Cobertura, Conectividade, RSSF, PLI.*

1 Introdução

Uma aplicação em RSSFs pode ser definida como o monitoramento de um fenômeno por nós sensores com o objetivo de disseminar os dados coletados a um observador. O nó sensor é o dispositivo que realiza o sensoriamento em um ambiente e dissemina estes dados. O observador é o usuário que solicita os dados aos nós sensores. O fenômeno é a entidade

de interesse do usuário ([Tilak (2002)]). Os nós que geram os dados são denominados nós fontes e estes dados chegam ao observador através de pontos de acesso da rede. Estes pontos de acesso podem ser estações rádio base ou os próprios nós sensores, denominados nós sorvedouros ou monitores. Estas redes poderão ser estabelecidas em áreas de difícil acesso e inóspitas, através do lançamento dos nós nestas regiões e funcionar de maneira autônoma o que por sua vez aumenta bastante seu potencial de aplicações.

Porém as características que fazem as RSSFs redes flexíveis em relação às aplicações também as tornam bastante restritas no aspecto técnico. O tamanho reduzido dos dispositivos restringe-as em termos computacionais, de alcance de comunicação e capacidade de energia. Dentre as soluções para as RSSFs, pode-se destacar o controle de densidade de nós, no qual as atividades da rede são executadas por um subconjunto de nós ativos, enquanto os demais são agendados para dormir ou são desativados. A possibilidade de se realizar controle de densidade em RSSFs se deve principalmente a redundância de nós da rede. Estudos mostram que esquemas de controle de densidade permitem economias significativas de energia e atenuam problemas como colisões de pacotes e interferências.

Quintão et. al [Quintão (2004)] tratam a cobertura e aspectos de conectividade para as RSSFs utilizando algoritmos genéticos e algoritmos em grafos. Siqueira et. al [Siqueira (2004)] desenvolveram um serviço de gerenciamento, de abordagem centralizada, para controlar a densidade de uma RSSF. O Serviço de Controle de Densidade proposto reduz os impactos negativos da alta densidade diminuindo ao mínimo o conjunto de nós sensores em atividade, ou seja, controlando a topologia virtual da rede, comprometendo-se com a garantia a qualidade de serviço de sensoriamento desejada. Os experimentos realizados comprovam que o uso do serviço de gerenciamento proposto obtém sucesso na garantia da qualidade de sensoriamento exigida e no prolongamento do tempo de vida da rede.

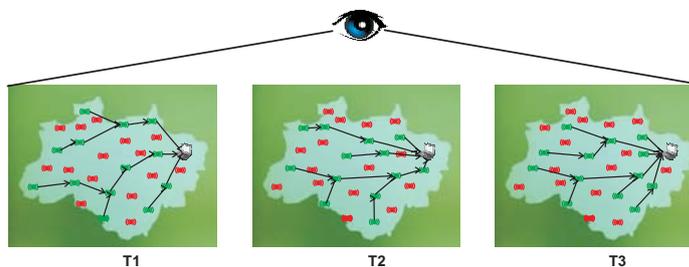
Quintão et. al [Quintão (2005)] comparam a solução do CPLEX para um modelo de PLI para o problema multiperíodo de cobertura com as obtidas por um algoritmo evolucionário, obtendo bons resultados, considerando os valores da função objetivo. Porém os melhores resultados são encontrados nos tempos de execução do algoritmo. Andrade et. al [Andrade (2009)] apresentam uma abordagem utilizando a meta-heurística GRASP para o Problema MultiPeríodo de Controle de Densidade, Cobertura e Roteamento em RSSFs Planas e os resultados obtidos encontrados indicam que o algoritmo conseguiu atender tais requisitos e foi capaz de gerar soluções próximas às soluções ótimas, com reduzidos tempos de execução.

Este trabalho propõe um tratar o PCD-RSSF de duas maneiras: multiperíodo e periódica. A Abordagem Multiperíodo consiste primeiramente em definir um tempo esperado de vida da rede e dividi-lo em períodos de tempo, que podem ou não ter a mesma duração. Nesta abordagem busca-se definir, em cada um dos períodos, qual o subconjunto de nós sensores que deve estar ativo para garantir a cobertura da rede e a conectividade entre eles, respeitando-se os seus limites de energia. O critério para escolha da melhor solução é minimizar o consumo total de energia da rede. A principal vantagem desta solução é que ela é gerada tendo-se uma visão global da rede e dos períodos. A Abordagem Periódica consiste em encontrar a melhor solução para a rede em um determinado instante de tempo e repetir este procedimento periodicamente levando em consideração o estado atual dos nós da rede em relação a disponibilidade e energia residual.

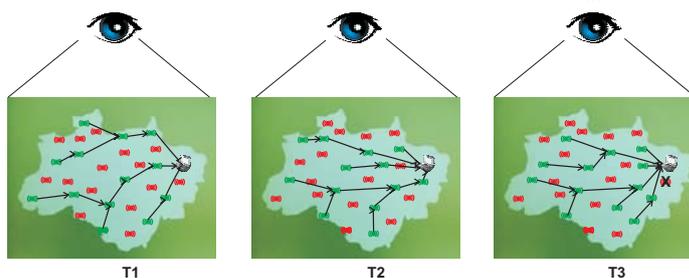
Ambas as abordagens propõe modelos de Programação Linear Inteira para lidar com o PDC, sendo que na periódica são propostas duas opções de função objetivo, uma que minimiza o consumo de energia de rede e outra que minimiza a relação entre energia consumida e energia residual dos nós. Este modelo é resolvido por um pacote de otimização comercial. Os resultados computacionais incluem análises da influência da sorvedouro no tempo de vida da rede e das vantagens de cada umas das funções objetivo propostas e comparam as abordagens multiperíodo e periódica para estabelecer quando a primeira é limite inferior para a segunda.

2 Definição do Problema

A abordagem multiperíodo consiste em estabelecer o tempo T que se deseja que a rede funcione, dividir este tempo em n períodos fixos t_1, t_2, \dots, t_n e tendo uma visão geral da rede definir para cada período quais nós devem estar ativos para garantir a cobertura e a conectividade, minimizando o consumo de energia da rede e respeitando os limites de energia dos nós. O problema passa a ser chamado PCD-RSSF Multiperíodo.



A Abordagem Periódica consiste em, periodicamente e dado o estado atual da rede (número de nós disponíveis, energia residual), definir a melhor solução para o PCD-RSSF, agora denominado PCD-RSSF Periódico. A melhor solução é aquela que garante a cobertura total da área e a conectividade entre os nós com o menor custo de energia. Dadas as restrições de energia da rede os critérios para escolher o subconjunto de nós que resolve o PCD-RSSF Periódico são as energias consumida e residual destes nós.



3 Formulação matemática

O modelo matemático para PCD-RSSF Multiperíodo é baseado no modelo apresentado em [Nakamura (2005)] com a seguinte alteração: ao conjunto de restrições foi acrescentada uma restrição que garante que um número mínimo de nós sensores esteja ativo em todos os períodos. Por motivos de espaço o modelo foi suprimido deste artigo.

O PCD-RSSF Periódico foi formulado por um modelo de Programação Linear Inteira (PLI).

A seguinte notação é utilizada na modelagem:

S conjunto de nós sensores.

D conjunto de pontos de demanda.

M conjunto de nós sorvedouros.

B_{lj} matriz de conectividade, que tem o valor 1 na posição (l, j) se o nó l , um problema de q -cobertura, alcança o ponto de demanda j e 0 caso contrário.

A^s conjunto de arcos que conectam nós sensores.

A^m conjunto de arcos que conectam nós sensores e nós sorvedouros.

$E^l(A)$ conjunto de arcos que entram no nó sensor $l \in S$ e que pertencem ao conjunto A .

$S^l(A)$ conjunto de arcos que saem do nó sensor $l \in S$ e que pertencem ao conjunto A .

q precisão na cobertura que indica o número de nós sensores que devem cobrir um ponto de demanda. Em geral é feito igual a 1.

n número mínimo de nós sensores que devem estar ativos por período.

EA_l energia de ativação do nó l , que representa o custo de energia na transição do estado inativo para o estado ativo. Não é indexado por t porque seu valor independe da duração do período.

EM_l^t energia de manutenção do nó l ativo em cada período, que representa o consumo de energia do nó com o sensoriamento, processamento e escuta de canal em cada intervalo t .

ET_{li}^t energia consumida pelo nó l ativo com a operação de transmissão dos pacotes gerados para o nó i em cada período t .

ER_l^t energia consumida pelo nó l ativo com a operação de recepção dos pacotes em cada período t .

As variáveis do modelo são:

x_{lj} variável que indica se o nó l está cobrindo o ponto de demanda j .

z_{lki} variável de decisão que possui valor 1 se o arco ki faz parte da rota entre o nó l e um nó sorvedouro, e 0 caso contrário

y_l variável de decisão que possui valor 1 se o nó l está ativo, e 0 caso contrário

O modelo é apresentado a seguir. A função objetivo minimiza a soma do consumo de corrente dos nós ativos para ativação, manutenção, transmissão e recepção.

Função Objetivo

$$Z_p = \min \sum_{l \in S} ((EM_l + EA_l) \times y_l + \sum_{k \in (S-l)} \sum_{i \in E^l(A^s)} ER_l \times z_{kil} + \sum_{k \in S} \sum_{li \in S^l(A^s \cup A^m)} ET_{li} \times z_{kli})$$

O modelo está sujeito a um conjunto de restrições de cobertura, restrições de conectividade e restrições que definem os tipos de variáveis.

As restrições (1) e (2) lidam com o problema da cobertura garantindo que cada ponto de demanda que esteja no raio de sensoriamento dos nós sensores seja coberto por pelo menos um deles e que um nó só possa estar sensoriando se estiver ativo. Além disso é definido que para um nó poder realizar o sensoriamento ele deve estar ativo.

$$\sum_{l \in S} B_{lj} \times x_{lj} \geq m, \forall j \in D \tag{1}$$

$$0 \leq B_{lj} \times x_{lj} \leq y_l, \forall l \in S \text{ e } \forall j \in D \quad (2)$$

As restrições (3), (4), (5) e (6) referem-se ao problema de conectividade e garantem que para cada nó ativo para sensoriamento deve existir uma rota até um nó sorvedouro.

$$\sum_{ip \in E^p(A^s)} z_{lip} - \sum_{pk \in S^p(A^s \cup A^m)} z_{lpk} = 0, \forall p \in (S \cup M - l), \forall l \in S \quad (3)$$

$$- \sum_{pk \in S^p(A^s \cup A^m)} z_{lpk} = -y_l, p = l, \forall l \in S \quad (4)$$

$$z_{lip} \leq y_i, \forall i \in S, \forall l \in (S - p), \forall ip \in (A^s \cup A^m) \quad (5)$$

$$z_{lip} \leq y_p, \forall p \in S, \forall l \in (S - p), \forall ip \in (A^s \cup A^m) \quad (6)$$

A restrição (7) define as variáveis de decisão como binárias.

$$y, z \in \{0, 1\} \quad (7)$$

A solução do modelo é gerada periodicamente (ou quando necessário) e indica quais nós devem cobrir quais pontos de demanda e garante pelo menos uma rota entre estes nós sensores e um nó sorvedouro. As diferenças do modelo periódico para o multiperíodo são que não se fixam mais o número e a duração dos períodos, não se estabelece o tempo de vida total da rede e as restrições com os limites de energia não fazem parte explicitamente do modelo e sim do procedimento para utilização da abordagem, ou seja, se um nó não tem energia residual ele é excluído do conjunto S na próxima execução do modelo. O mesmo acontece com os pontos de demanda descobertos, se a partir de um determinado momento não existe nenhum nó na rede que cubra ele é excluído do conjunto D, porém ele é contabilizado como ponto de demanda descoberto na avaliação da solução.

Nesta abordagem é proposta uma função objetivo alternativa que considera a energia residual do nó como um dos parâmetros de geração da solução. Seja ER_{el} a energia residual do nó l , a nova função objetivo é mostrada na Função 8

Função Objetivo

$$Z_{p2} = \min \sum_{l \in S} ((EM_l + EA_l) \times y_l^t + \sum_{k \in (S-l)} \sum_{il \in E^l(A^s)} ER_l \times z_{kil} + \sum_{k \in S} \sum_{li \in S^l(A^s \cup A^m)} ET_{li} \times z_{kli})) / ER_{el}$$

sujeito as restrições (1) a (7)

4 Resultados Computacionais

Os testes foram divididos em três baterias cujos objetivos são:

- Avaliar e comparar o Modelo de PLI com as duas opções de função objetivo, com e sem energia residual, para definir as vantagens e desvantagens de cada um deles.
- Avaliar a influência do posicionamento do nó sorvedouro no tempo de vida da rede.
- Comparar os resultados obtidos pelos modelo matemáticos multiperíodo e periódico e verificar em que condições a abordagem multiperíodo é um limite inferior para soluções periódicas e quão longe deste limite inferior encontra-se a solução periódica.

4.1 Bateria de Testes 1: Comparação entre os Modelos Matemáticos

O objetivo da Bateria de Testes 1 é avaliar e comparar o modelo matemático periódico apresentado com as duas funções objetivo (Funções 1 e 8) para identificar as vantagens e desvantagens de cada um deles e para observar qual a influência da energia residual na geração das soluções.

4.1.1 Parâmetros de Entrada

Seja o Modelo 1 o modelo matemático cuja função objetivo é calculada pela Função 1 e o Modelo 2 pela Função 8. Seja u.d. a unidade para quantificar distância, u.t. a unidade para quantificar tempo, u.e. a unidade utilizada para quantificar o consumo de energia de uma determinada operação do nó sensor por unidade de tempo e $u.e \cdot t$ a unidade para quantificar a energia armazenada na bateria ou a energia consumida pelo nó, os parâmetros de entrada para o teste são os seguintes: área de Monitoramento igual a $50u.d. \times 50u.d.$, 36 nós sensores, raio de sensoriamento de $15u.d.$, raio de comunicação de $25u.d.$, sorvedouro na coordenada(0,0), 2500 pontos de demanda, 75 Períodos com duração de 1u.t., Energia Residual Inicial de 1000 u.e*t. O posicionamento dos nós sensores na área de monitoramento foi gerado aleatoriamente com distribuição uniforme.

As métricas de avaliação propostas para esta bateria são a distribuição da energia residual entre os nós da rede em um determinado período de tempo e o valor da cobertura em cada período de tempo. O teste foi realizado resolvendo-se a cada unidade de tempo uma nova instância do problema, considerando-se apenas os nós disponíveis naquele período e os valores atuais de energia residual de cada um destes nós. A cobertura é dada em função da porcentagem de pontos de demanda cobertos. Uma métrica adicional é o tempo de vida da rede, aqui considerado o último instante de tempo t onde há cobertura e conectividade na rede, ou seja, mesmo que apenas um nó esteja cobrindo a área ele deve estar conectado ao sorvedouro para garantir a disseminação dos dados coletados.

Os modelos foram executados durante 75 u.t. e os resultados da distribuição de energia residual obtidos nos instantes $t = 1$, $t = 35$ e $t = 70$ são mostrados nas Figuras 1 e 2.

No instante 1 os resultados são iguais porque a energia residual é a mesma para todos os nós, o que significa que na função objetivo a energia consumida por todos os nós sensores será dividida pela mesma constante (energia residual inicial) e poderia até ser excluída. Em termos da solução isto significa que não há diferença entre a solução dos Modelos 1 e 2. Os nós que apresentam os menores valores de energia residual são aqueles que servem como roteadores para os nós que estão longe do sorvedouro e portanto tem um consumo maior com recepção e transmissão de dados.

Na Figura 1 nota-se que já existe um nó com energia esgotada para o Modelo 1. Isto acontece porque o critério para escolha da solução ótima é o consumo de energia logo para o mesmo conjunto de nós sensores, independente do período, esta solução será sempre a mesma o que na abordagem periódica significa que cada solução gerada é mantida até que alguma falha ocorra. Para o Modelo 2, se um nó apresenta energia residual muito baixa ele só será incluído na solução se seu consumo de energia também for baixo e se ele for necessário para garantir a conectividade da solução. Portanto ainda que o conjunto de nós sensores seja o mesmo em diversos períodos a solução pode não ser a mesma porque a

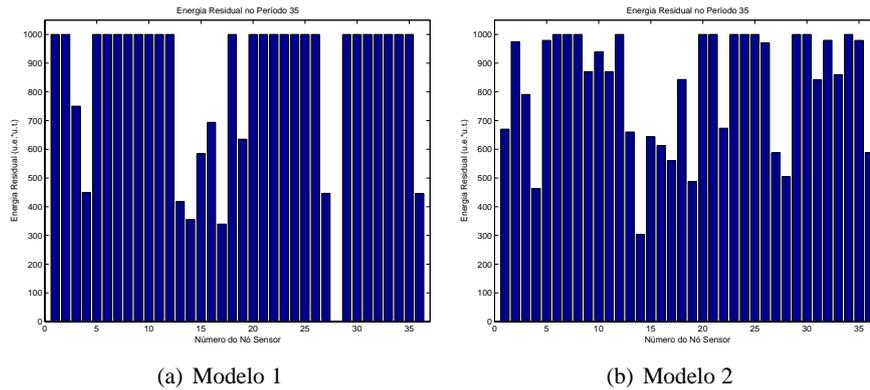


Figura 1. Distribuição de Energia Residual no Instante $t = 35$.

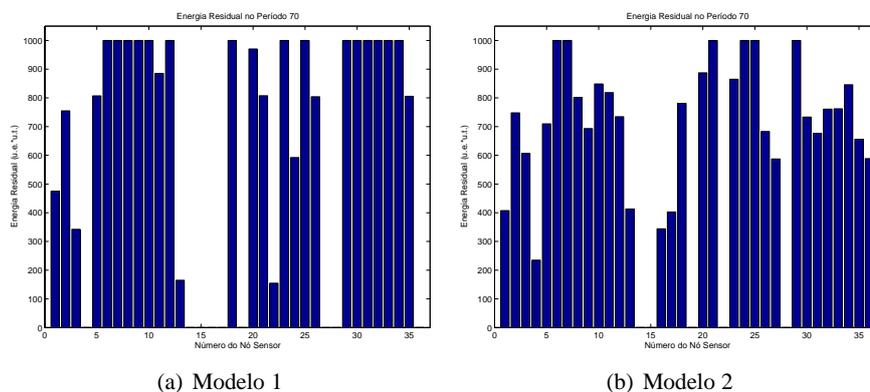


Figura 2. Distribuição de Energia das Soluções no Instante $t = 70$.

energia residual tem papel fundamental na escolha da solução ótima com os nós com maior energia tendo mais chance de serem escolhidos para compô-la. A tendência deste modelo é revezar os nós da solução.

No instante $t = 70$ mostrado na Figura 2 tem-se que o número de nós com energia esgotada é maior para o Modelo 1 porque uma vez que uma solução é calculada, ela só mudará se algum nó falhar por falta de energia. Para o Modelo 2, se um nó possuir energia residual muito baixa ele só será ativado se for essencial para cobertura e/ou conectividade. O número de nós com energia residual alta na solução do modelo 1 é maior porque este critério não é utilizado na sua escolha. Uma outra observação é que a energia residual total da rede na solução do modelo 2 é menor, isto acontece porque como há o revezamento de nós nas soluções há também o custo de se ativar estes novos nós a cada nova solução o que aumenta o consumo de energia total da rede.

A maior vantagem do Modelo 2 aparece quando se avalia a cobertura. A Figura 3 mostra o comportamento da cobertura para os dois modelos. O Modelo 2 apresenta falhas de cobertura menores, exatamente por balancear o consumo de energia dos nós e sua energia residual, o que minimiza as falhas de cobertura por falta de conectividade.

O consumo de energia para cada um dos modelos é mostrado na Figura 4. Como observado anteriormente o fato de trocar os nós a cada solução leva a um maior consumo de energia com ativação e por consequência a um aumento no consumo de energia total da

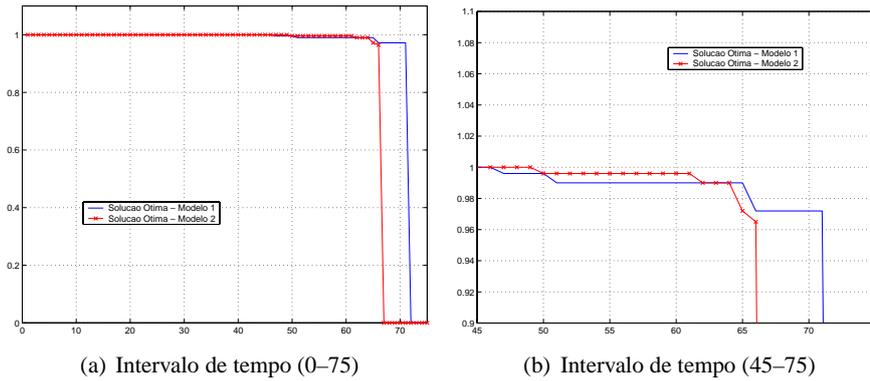


Figura 3. Comportamento da Cobertura no tempo para os Modelos 1 e 2 para uma rede de 36 nós sensores

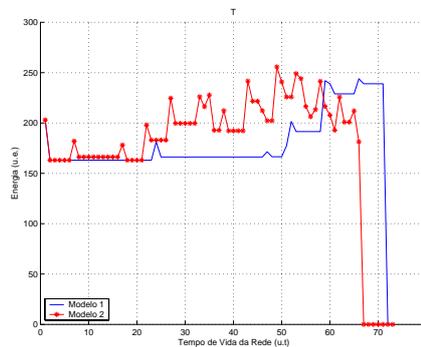


Figura 4. Consumo de Energia para os Modelos 1 e 2 para uma rede de 36 nós sensores

rede e a um tempo de vida menor.

A inclusão da energia residual na função objetivo leva a resultados melhores em relação a cobertura e pode aumentar o tempo entre falhas causadas por falta de energia, mas nem sempre é suficiente para aumentar o tempo de vida da rede. Uma alternativa para melhorar os modelos é incluir penalidades nos arcos que saem dos nós que são essenciais à conectividade para tentar distribuir melhor o fluxo de dados. Essas penalidades podem, por exemplo, ser inversamente proporcionais a energia residual do nó.

Os gráficos das Figuras 5 apresentam os resultados obtidos para o modelo 1 com o sorvedouro em duas posições, no canto inferior esquerdo que corresponde a Coordenada(0,0) e no centro da área de monitoramento que corresponde a Coordenada (25,25).

A localização do nó sorvedouro teve um grande impacto no tempo de vida da rede, o que indica que o roteamento tem papel fundamental para o bom funcionamento de uma rede de sensores. O sorvedouro na Coordenada(0,0) apesar de estar melhor localizado para coleta de dado principalmente em redes de sensores estabelecidas em locais de difícil acesso traz diversos problemas como por exemplo rotas de disseminação de dados maiores, que levam a um maior consumo de energia, alta latência, e alto consumo de energia para nós próximos aos sorvedouro. Este último por sua vez leva ao esgotamento de energia de nós essenciais ao roteamento e conseqüentemente à perda de conectividade da rede. O sorvedouro na Coordenada(25,25) tem um número maior de nós conectados diretamente a ele, o que minimiza os problemas de perda de conectividade por esgotamento de energia

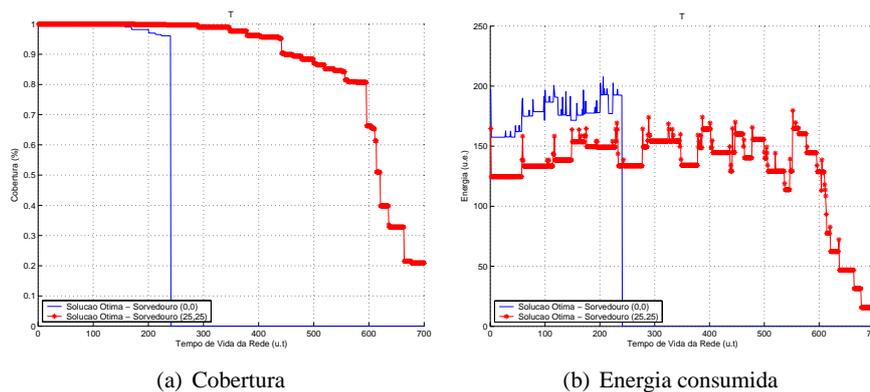


Figura 5. Comparação entre a Solução Ótima para o modelo 1 e para a instância t10050 com os Sorvedouros nas Posições (0,0) e (25,25).

dos nós roteadores e gera rotas menores e mais baratas em termos de consumo de energia.

Em resumo um bom planejamento de uma rede de sensores deve levar em consideração a localização do ou dos nós sorvedouros em função do impacto que esta localização teve no tempo de vida da rede.

4.2 Bateria de Testes 3: Comparação entre as Abordagens Multiperíodo e Periódica

A Bateria de Testes 3 foi idealizada para verificar em que condições o modelo multiperíodo pode ser utilizado com um limite inferior para estratégias periódicas de controle de densidade em redes de sensores. Para a realização dos testes foram utilizados os modelos matemáticos de ambas as abordagens para garantir que a comparação fosse feita em relação a solução ótima. Para complementar os testes são incluídos também os testes para a rede sem controle de densidade, ou seja, quando todos os nós estão ativos, porém a conectividade é garantida de modo que se tenha o menor consumo de energia possível. Quando o número e duração dos períodos é igual o modelo multiperíodo é um limite inferior para o periódico, porém um número muito grande de períodos pode impedir que a abordagem multiperíodo seja utilizada. Para contornar este problema o número de períodos do problema é diminuído e a duração de cada período é aumentada mas estes valores são calculados de maneira a manter a equivalência com o número total de períodos do periódica e com o consumo de energia.

Os parâmetros de entrada para o teste são os seguintes: área de monitoramento igual a $10u.d. \times 10u.d.$, raio de sensoriamento de $2u.d.$, raio de comunicação de $3u.d.$, sorvedouro na coordenada(5,5), 100 pontos de demanda, 75 Períodos com duração de 1u.t., Energia Residual Inicial de 400 u.e*t. O posicionamento dos nós sensores na área de monitoramento foi gerado aleatoriamente com distribuição uniforme. Outros parâmetros dos testes são número de períodos do modelo periódico igual a 150, número de períodos do modelo multiperíodo iguais a 2, 3 e 6, Duração do período do modelo periódico igual a 1 u.t e duração dos períodos do modelo multiperíodo igual a 75, 50 e 25 u.t. para 2, 3 e 6 períodos respectivamente. As métricas de avaliação são cobertura e energia consumida da rede.

Os gráficos da Figura 6 apresentam o resultado dos testes realizados para a instância com 40 nós. O teste incluiu o modelo periódico resolvido em 150 períodos, com e sem

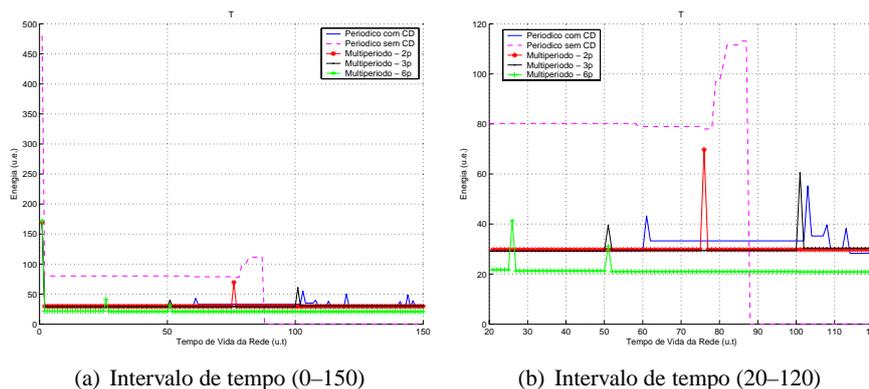


Figura 6. Comparação entre as Energias Consumidas pelos Modelos Periódico e Multiperíodo para a instância t4010

controle de densidade (CD), e o modelo multiperíodo com 2, 3 e 6 períodos, mantendo-se a referência de 150 u.t. Como pode ser observado os valores de energia consumida do modelo multiperíodo são menores que o do modelo periódico conforme esperado e por isso representam um limite inferior para o problema.

A visão global dos períodos permitiu que melhores soluções fossem encontradas. Além disso, quanto maior o número de períodos melhor foi o resultado. Isto ocorre porque, na solução do modelo multiperíodo, um nó só será ativado se tiver energia residual suficiente para ficar ativo durante o período inteiro. Se um período é longo pode ser que um número maior de nós seja ativado, o que aumenta o consumo total de energia da rede, para distribuir a disseminação de dados e diminuir o consumo individual dos nós com transmissão e recepção de dados, permitindo que o nó permaneça ativo o período todo. Com um maior número de períodos isto não ocorre porque a duração destes períodos é menor. O que acontece é que uma mesma solução é repetida por diversos períodos. Sem o controle de densidade tem-se um consumo de energia muito superior ao das soluções propostas e o tempo de vida da rede é bastante reduzido, isso sem contar que em redes reais ainda haveriam problemas de interferência e colisões.

O valor total de energia consumida para cada um dos exemplos é mostrado na Tabela 1. A abordagem periódica sem controle de densidade levou a um consumo de energia elevado e desnecessário e em virtude deste alto consumo por período tem-se o tempo de vida encurtado e portanto uma falha média de cobertura também elevada. O controle de densidade trouxe bastante ganho a rede pois diminui o consumo total e garantiu cobertura total em todos os períodos. A abordagem multiperíodo serviu seu propósito de apresentar um limite inferior para a abordagem periódica e conforme mencionado quanto maior o número de períodos melhores os resultados.

Porém alguns cuidados devem ser tomados para utilizar o modelo multiperíodo como parâmetro de comparação para algoritmos periódicos de controle de densidade. Os gráficos da Figura 7 mostram um exemplo onde isto não acontece. O gráfico 7(a) mostra que a cobertura do modelo multiperíodo neste caso não é a melhor. O gráfico 7(b) de energia consumida também mostra que o modelo multiperíodo não é um limite inferior. O problema ocorreu porque a duração dos períodos é grande e impede que alguns nós possam ser ativados levando a falhas na cobertura maiores que o modelo periódico, ou

Abordagem	Consumo Total de Energia (u.e*t)	Falha Média de Cobertura (%)
Periódica sem CD	7599,04	58%
Periódica com CD	4845,96	0%
Multiperíodo 2p	4646,15	0%
Multiperíodo 3p	4630,70	0%
Multiperíodo 6p	4616,05	0%

Tabela 1. Consumo Total e Falha de Cobertura Média para a instância t4050 para as Abordagens Multiperíodo e Periódica

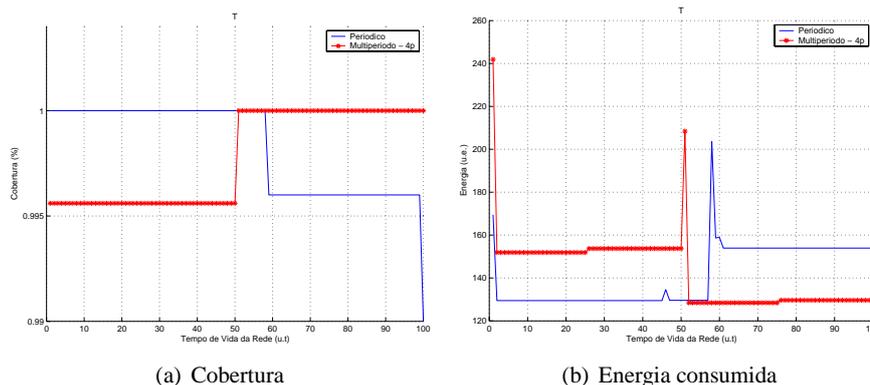


Figura 7. Comparação entre os Modelos Periódico e Multiperíodo para a instância t3650

Abordagem	Consumo Total de Energia (u.e*t)	Falha Média de Cobertura (%)
Multiperíodo	14261,25	98,794
Periódica	13950,75	98,840

Tabela 2. Consumo Total e Falha de Cobertura Média para a instância t3650 para as Abordagens Multiperíodo e Periódica

seja, a definição da duração, em u.t., de cada período na abordagem multiperíodo deve ser observada para garantir a obtenção do limite inferior.

O consumo total de energia e a falha média na cobertura dos testes com 36 nós sensores são mostrados na Tabela 2. Neste caso a abordagem multiperíodo não pode ser utilizada com limite inferior para a periódica porque obteve resultados piores tanto em termos de consumo de energia quanto em termos de cobertura.

Um bom parâmetro para definir a duração máxima de um período para a Abordagem Multiperíodo seria, dada a solução do modelo periódico, identificar em qual instante de tempo t o primeiro nó falhou por falta de energia e fazer os períodos com duração menor do que este valor. Quanto maior o número de períodos melhores os resultados, por outro, ficando a critério do desenvolvedor estabelecer quais os melhores valores dados os requisitos da sua aplicação.

5 Agradecimentos

Este trabalho contou com apoio financeiro do CNPq - Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento - através do projeto número 554087/2006 – 5.

6 Considerações Finais

Este trabalho apresenta duas abordagens para resolver Problema de Controle de Densidade em Redes de Sensores sem Fio: multiperíodo e periódica. A abordagem multiperíodo consiste primeiramente em definir um tempo esperado de vida da rede e dividi-lo em períodos de tempo, que podem ou não ter a mesma duração. Nesta abordagem busca-se definir, em cada um dos períodos, qual o subconjunto de nós sensores que deve estar ativo para garantir a cobertura da rede e a conectividade entre eles, respeitando-se os seus limites de energia. A abordagem periódica consiste em gerar uma solução para o PCD-RSSF em um determinado instante de tempo e depois repetir este procedimento periodicamente.

Os resultados computacionais comparam a influência da energia residual na abordagem periódica. Ao não se considerar a energia residual tem-se que a solução é gerada e só será recalculada quando houver alguma falha nos nós sensores. A energia residual como elemento de tomada de decisão gera um maior consumo de energia em função de ativação de nós o que por sua vez diminui o tempo total de vida da rede mas os resultados de cobertura foram melhores. Os testes ainda concluíram que o sorvedouro no centro da área de monitoramento aumenta bastante este tempo porque leva a um balanceamento da árvore de disseminação de dados minimizando o consumo de energia com transmissão e o número de problemas de perda de conectividade. Por fim é observado que com parâmetros adequados a abordagem multiperíodo pode servir como um limite inferior em relação ao consumo de energia para algoritmos de controle de densidade em redes de sensores.

Referências

- Andrade, I., Mateus, G., and Nakamura, F. (2009). A grasp heuristic to density control: Solving multi-period coverage and routing problems in wireless sensor networks. In *14th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pages 493 – 499. Sousse, Tunisia.
- Nakamura, F., Quintao, F., Menezes, G., and Mateus, G. (2005). An Optimal Node Scheduling for flat Wireless Sensor Networks. In *IEEE International Conference on Networking (ICN)*, volume 3420, pages 475–483. Ilha de Reunião, França.
- Quintao, F., Nakamura, F., and Mateus, G. R. (2004). A Hybrid Approach to solve the Coverage and Connectivity Problem in Wireless Sensor Networks. In *IV European Workshop on Meta-heuristics (EU/ME)*, volume 1.
- Quintão, F., Nakamura, F., and Mateus, G. R. (2005). Evolutionary algorithm for the dynamic coverage problem applied to wireless sensor networks design. In *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, volume 2, pages 1589–1596. Edinburg, UK.
- Siqueira, I., Ruiz, L., Loureiro, A., and Nogueira, J. (2004). Um serviço de gerenciamento para controle de densidade de redes sensores sem fio. In *22o. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, pages 249–262, Gramado, RS.
- Tilak, S., Abu-Ghazaleh, N. B., and Heinzelman, W. (2002). A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 6(2):28–36.