

Controle de Densidade em Redes de Sensores: Modelos e Algoritmos

Fabiola G. Nakamura^{1,2}, Flavio V.C. Martins¹, Frederico P. Quintão¹

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

²Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal do Amazonas

Av. Gen. Rodrigo Otavio Jordão Ramos, 3000, Manaus, AM Brazil

{fgnaka,cruzeiro, fred}@dcc.ufmg.br

Resumo. O potencial das aplicações que podem surgir com a popularização das Redes de Sensores sem Fio (RSSFs) intensificou o desenvolvimento de soluções que as tornem mais eficientes na utilização de seus recursos escassos, entre os quais destaca-se a energia. Se por um lado as soluções buscam economizar energia, por outro devem garantir requisitos como cobertura, conectividade e disseminação de dados. Este trabalho apresenta uma formulação de Programação Linear Inteira (PLI) e um algoritmo híbrido, com duas versões de função objetivo e de decisão respectivamente, para resolver o Problema de Controle de Densidade em RSSF (PCD-RSSF). As soluções propostas para o PCD-RSSF devem escolher um sub-conjunto de nós sensores que garanta os requisitos de cobertura da área de monitoramento e conectividade entre os nós minimizando o consumo de energia da rede ou a relação entre a energia consumida e energia residual. Os resultados mostram que ambas as abordagens têm vantagens e desvantagens e sua utilização deve estar associada aos requisitos da aplicação alvo.

PALAVRAS CHAVE. Modelo PLI, Redes de Sensores, Heurísticas.

ÁREA : Redes

Abstract. The potential applications of Wireless Sensor Networks (WSNs) have intensified researches regarding energy-efficient solutions, once energy is one of the most limited resources in these networks. However, the network application depends on the development of solutions that also assure basic WSN aspects such as area coverage and node connectivity. This work proposes an Integer Linear Programming (ILP) formulation and a Hybrid Algorithm, that works globally and locally, to solve the Density Control Problem in high density Wireless Sensor Network (DCP-WSN). The DCP-WSN consists in choosing a subset of sensor nodes that guarantees the area coverage and the nodes connectivity at a minimal energy consumption cost. Both the ILP model and the Hybrid Algorithm have an alternative function to choose solutions that balance low energy consumption and high residual energy. Given the complexity of solving a ILP model, the experiments show that heuristics can be good alternatives to deal with the density problem. In this context, we explore global and local information to solve the problem and we show the advantages of using both when compared to algorithms that make use of just one of them.

KEYWORDS. ILP Model, Sensor Networks, Heuristics.

1. Introdução

As Redes de Sensores sem Fio (RSSFs) são um tipo especial de rede móvel *ad hoc* que surgiram com a evolução de processadores embutidos, rádios e sistemas micro-mecânicos. Tipicamente, cada ele-

mento que compõe uma RSSF é dotado de um rádio, uma placa de sensores, um processador e uma bateria e recebem a denominação de nó sensor. Em um aplicação de RSSF os nós sensores são posicionados em uma área em que se deseja monitorar um determinado fenômeno e via comunicação sem fio disseminam os dados coletadas para o ponto de acesso da rede e eventualmente para um observador.

Uma das características principais da RSSFs é a alta densidade de nós cujo objetivo é prover dados mais precisos e tolerância a falhas. Os dados serão mais precisos porque são resultado de leituras de vários nós sensores, possibilitando que dados discrepantes sejam descartados. A tolerância à falhas ocorre porque se um nó falha, um ou mais nós podem substituí-lo tanto para coleta de dados do fenômeno em estudo quanto para assegurar conectividade. Entretanto, a alta densidade de nós sensores pode trazer problemas como consumo de energia desnecessário, interferências e colisões. O consumo de energia desnecessário é devido ao número de nós ativos que não são necessários para prover cobertura e conectividade. Por outro um número grande de nós disputando o meio aumenta o número de interferências entre os rádios e colisão de pacotes, que por sua vez aumenta o número de re-transmissões e conseqüentemente o consumo de energia.

Para contornar os problemas citados, pesquisadores propõem como solução o uso de esquemas de Controle de Densidade. Nestes esquemas um subconjunto de nós é desligado ou colocado para dormir enquanto os outros permanecem ativos executando as operações na rede. A escolha baseia-se em determinar o subconjunto de nós que cumpra os requisitos de cobertura da área e conectividade da rede com o menor consumo de energia possível.

Chakrabarty et al. (2001) resolvem o problema de controle de densidade em redes de sensores utilizando a área de cobertura como principal requisito para a construção de um modelo de Programação Linear. O modelo matemático é similar a um modelo de localização de facilidades e busca minimizar o custo de posicionar nós sensores heterogêneos na área de monitoramento dados os possíveis locais candidatos.

Nakamura et al. (2005) propõem um modelo de PLI para o problema multi-período de controle de densidade, cobertura e conectividade em RSSF planas e o resolvem com o pacote de otimização comercial CPLEX ILOG (2006). O modelo acrescenta, ao conjunto de restrições tradicionais de cobertura e conectividade em redes de sensores, um conjunto de restrições de energia cujo objetivo é prover soluções que garantam os requisitos da rede sem ultrapassar os limites de energia dos nós sensores.

Quintao et al. (2004) propõem um algoritmo híbrido para resolver o problema estático de controle de densidade, cobertura e conectividade em redes de sensores. A abordagem híbrida é composta de um Algoritmo Genético (AG) que resolve o problema de cobertura e usa os algoritmos de Árvore Geradora Mínima (AGM) e Caminho Mínimo para tratar o problema de conectividade. A função de aptidão avalia as soluções em termos de consumo de energia e falha na cobertura. As melhores soluções são aquelas que balanceiam o consumo de energia e falha na cobertura. Este algoritmo, com algumas modificações, é um dos componentes da abordagem híbrida proposta neste trabalho.

Zhang and Hou (2005) apresentam o algoritmo OGDC (*Optimal Geographical Density Control*). Segundo os autores, o algoritmo é totalmente descentralizado e localizado. O OGDC é baseado no fato de que, caso o raio de comunicação seja pelo menos duas vezes maior do que o de sensoriamento, a garantia da cobertura implica na garantia da conectividade. A partir desta observação, os autores apresentam um conjunto de condições ótimas sobre as quais um conjunto de nós ativos pode ser encontrado para garantir cobertura total da rede, e apresentam um algoritmo que mantém estas condições quando a rede possui alta densidade e cada nó sabe a sua localização.

Este trabalho propõe um modelo de Programação Linear Inteira (PLI) para o Problema

de Controle de Densidade (PCD) em RSSFs e um Algoritmo Híbrido (AH) como alternativa de solução ao PCD-RSSF em virtude da complexidade do problema. Este trabalho está dividido como segue: na seção seguinte o problema alvo é formalmente definido, a seção 3 apresentado o modelo de PLI proposto. A seção 4 descreve a abordagem híbrida desenvolvida, a seção 5 traz os resultados computacionais obtidos e na seção 6 são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

2. Definição do Problema

O problema de controle de densidade pode ser definido como: *Dada uma área de monitoramento A , um conjunto de nós sensores S , um conjunto de nós sorvedouros M , um conjunto de pontos de demanda D , o Problema de Controle de Densidade em Redes de Sensores sem Fio (PCD-RSSF) consiste em garantir para cada ponto de demanda $d \in D$ na área A que pelo menos 1 (um) nó sensor $s \in S$ o cubra e que existe uma rota entre cada nó sensor ativo $s \in S$ e um nó sorvedouro $m \in M$. Dadas as restrições de energia da rede, os critérios para escolher o subconjunto de nós que resolve o PCD-RSSF são as energias consumida e residual desses nós. Neste trabalho esta visão estática é estendida para um ambiente dinâmico, onde é simulada uma RSSF com nós sujeitos à restrições de energia e falhas. Na seção seguinte é proposta uma formalização matemática do problema.*

3. Modelo Matemático

O PCD-RSSF estático pode ser modelado como um problema de PLI. Para a concepção do modelo e algoritmos as seguintes considerações são feitas: os nós possuem um identificador único e sabem sua localização, a aplicação requer monitoramento contínuo e disseminação de dados periódica e o tráfego é relativo apenas a dados da aplicação. A área de monitoramento é discretizada em um conjunto de pontos denominados pontos de demanda e a área de cobertura de um nó é considerada como um círculo de raio R , onde R é o raio de sensoriamento do nó. Se a distância entre um ponto de demanda e um nó é menor que R então este ponto pode ser coberto por este nó.

O seguintes parâmetros são utilizados na formulação.

S conjunto de nós sensores

D conjunto de pontos de demanda

A^d conjunto de arcos conectando nós sensores e pontos de demanda

A^s conjunto de arcos conectando os nós sensores

A^m conjunto de arcos conectando os nós sensores aos nós sorvedouros

E^d conjunto de arcos (i, j) que entram no ponto de demanda $j \in D$

E^s conjunto de arcos (i, j) que entram no nó sensor $j \in S$

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

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

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

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

ER_i energia de recepção do nó $i \in S$

ERe_i energia residual do nó $i \in S$

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

A formulação proposta é apresentada a seguir.

A função objetivo minimiza a energia consumida que é contabilizada em termos da corrente consumida em cada operação que o nó realiza quando está ativo.

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= \min \sum_{l \in S} ((EM_l + EA_l) \times y_l \\
 &+ \sum_{k \in (S-l)} \sum_{i \in E^l(A^s)} ER_l \times z_{kil} \\
 &+ \sum_{k \in S} \sum_{li \in S^l(A^s \cup A^m)} ET_{li} \times z_{kli}) \quad (1)
 \end{aligned}$$

O conjunto de restrições (2), (3) e (4) trata do problema de cobertura. As restrições (2) garantem que pelo menos um nó sensor cubra cada ponto de demanda. As restrições (3) indicam que um nó só pode cobrir um ponto se estiver ativo. As restrições (4) limitam para as variáveis x .

$$\sum_{ij \in E^d} x_{ij} \geq 1, \forall j \in D \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq y_i, \forall i \in S, \forall ij \in A^d \quad (3)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq 1, \forall ij \in A^d \quad (4)$$

O conjunto de restrições (5), (6), (7) e (8) lida com o problema de conectividade. As restrições (5) e (6) asseguram um caminho entre cada nó ativo $l \in S$ e o nó sorvedouro m e as restrições (7) e (8) permitem que apenas nós ativos componham este caminho.

$$\sum_{ij \in E^s} z_{lij} - \sum_{jk \in S^s} z_{ljk} = 0, \forall j \in (S \cup m - l), \forall l \in S \quad (5)$$

$$- \sum_{jk \in S_j^s} z_{ljk} = -y_l, j = l, \forall l \in S \quad (6)$$

$$z_{lij} \leq y_i, \forall i \in S, \forall l \in (S - j), \forall ij \in (A^s \cup A^m) \quad (7)$$

$$z_{lij} \leq y_j, \forall j \in S, \forall l \in (S - j), \forall ij \in (A^s \cup A^m) \quad (8)$$

As restrições (9) definem que a energia consumida por um nó é dada pelas operações de ativação, manutenção e recepção e transmissão de pacotes. Define ainda, que o limite inferior desta energia é zero.

$$\begin{aligned}
 (EA_i + EM_i) \times y_i + \sum_{l \in (S-i)} \sum_{ki \in E_i^s} ER_i \times z_{lki} + \\
 \sum_{l \in S} \sum_{ij \in S_i^s} ET_{ij} \times z_{lij} \geq 0, \forall i \in S \quad (9)
 \end{aligned}$$

As restrições (10) estabelecem as variáveis y e z como booleanas.

$$y, z \in \{0, 1\} \quad (10)$$

A solução do modelo consiste do conjunto Y de nós sensores que devem ser ativos, isto é, $Y = \{i \in S | y_i = 1\}$. Esta solução é gerada periodicamente (ou quando necessário) e indica quais nós devem cobrir quais pontos de demanda e garante pelo menos uma rota entre esses nós sensores e um nó sorvedouro.

A função objetivo alternativa é apresentada na equação 11. O modelo escolhe o conjunto $Y = \{i \in S | y_i = 1\}$ que minimize a relação $EnergiaConsumida/EnergiaResidual$. A idéia é evitar ou minimizar a ocorrência de falhas por energia logo após que uma solução seja gerada, pois esta função preserva nós com baixa capacidade de energia.

$$\begin{aligned} Z_2 = & \min \sum_{l \in S} (((EM_l + EA_l) \times y_l^t \\ & + \sum_{k \in (S-l)} \sum_{i \in E^l(A^s)} ER_l \times z_{kil} \\ & + \sum_{k \in S} \sum_{li \in S^l(A^s \cup A^m)} ET_{li} \times z_{kli}) / ER_{el} \end{aligned} \quad (11)$$

sujeito às restrições (2) à (10).

A partir de agora o modelo PLI com a função objetivo Z1 definida na equação 1 será denominado modelo 1 e o com a função objetivo Z2 definida na equação 11 modelo 2.

O PCD-RSSF é um problema complexo de otimização combinatória, cuja solução é obtida resolvendo-se um problema de Cobertura de Conjuntos entre os nós sensores e os pontos de demanda, que é NP-Difícil (Christofides (1975)), e construindo-se uma árvore de roteamento para conectar os nós ativados na solução do problema de cobertura de conjuntos. Neste cenário, as heurísticas são uma alternativa natural de se obter soluções para o PCD-RSSF.

4. Algoritmo Híbrido

O Algoritmo Híbrido (AH) proposto combina as vantagens de se resolver o PCD-RSSF de maneira global e de maneira local. A abordagem global resolve o problema todo (incluindo todos os elementos dos conjuntos S, D e M) e pode gerar melhores soluções porque, com uma visão global da rede, encontra melhores nós para compô-las. Por outro lado resolver o problema todo pode gerar problemas de escalabilidade e tem custos elevados de processamento e disseminação da solução. A abordagem local pode se adequar melhor as RSSFs porque sua idéia principal é resolver o problema apenas na região em que a falha ocorreu, o que a torna mais barata computacionalmente, mais escalável e mais fácil de ser adaptada para uma versão distribuída. Por outro lado a visão local pode levar à geração de soluções piores, quando comparada a visão global, porque os nós sensores candidatos estão restritos a uma área específica, o que leva a ativações desnecessárias.

Levando em consideração os pontos levantados, é proposto um Algoritmo Híbrido para o PCD-RSSF composto de um Algoritmo Global Sob-demanda (AGS) que constrói a solução globalmente, quando requerido pela aplicação e de um Algoritmo Local *Online* (ALO) que a cada ocorrência de falha tenta restaurar localmente, e se necessário, a cobertura e a conectividade da rede. Ambos os algoritmos são centralizados.

O AGS utiliza um Algoritmo Genético (AG) para resolver um Problema de Cobertura baseado no Problema de Cobertura de Conjunto e utiliza os algoritmos de Árvore Geradora Mínima (AGM) e Caminho Mínimo, para construir uma árvore de conectividade que garanta a disseminação de dados. A função de aptidão do algoritmo genético inclui o custo para ativar o nó e o custo do caminho mínimo entre o nó i e o sorvedouro mais próximo (denominado CM_i), o qual contabiliza

o custo de transmissão dos nós. A função de aptidão é mostrada na equação (12). Mais detalhes sobre este algoritmo estão em Quintao et al. (2004).

$$aptidao(H) = \sum_{i \in S} (EA_i + EM_i + CM_i) \times y_i \quad (12)$$

onde CM_i é o caminho mínimo do nó i ao sorvedouro m , calculado por um algoritmo de caminho mínimo e cujo custo dos arcos é dado pela energia de transmissão entre os nós. Os arcos que compõem o grafo são aqueles cuja distância entre os nós não ultrapassa o raio de comunicação máximo do nó transmissor. Este parâmetro é utilizado para penalizar os nós que possuem caminhos muito caros para alcançar o sorvedouro.

A função de aptidão que considera a energia residual é apresentada na função 13.

$$aptidao(H) = \sum_{i \in S'} ((EA_i + EM_i + CM_i) \times y_i / ERe_i) \quad (13)$$

O procedimento de conectividade consiste em calcular a árvore geradora mínima entre os nós ativados pelo AG para criar uma estrutura de roteamento entre os nós e garantir a disseminação de dados. Se esse procedimento conseguir conectar todos os nós o algoritmo é finalizado, senão cada nó desconectado é incluído na rede por um procedimento de caminho mínimo, que ativa os nós necessários para garantir a conectividade.

Dado que o algoritmo pode gerar soluções que não garantam a cobertura total da área de monitoramento o termo representado pela Expressão 14 é adicionado às funções de aptidão para penalizar soluções com falhas de cobertura altas.

$$FalhaCobertura = \sum_{j \in D} PN_j \times h_j \quad (14)$$

onde PN_j é a penalidade aplicada a cada ponto de demanda não coberto e h_j é uma variável que tem valor 1 se o ponto de demanda j está descoberto e 0 caso contrário.

O procedimento do AGS é mostrado no Algoritmo 1.

Algorithm 1: Algoritmo Global Periódico para o PCD

Entrada: S, m, D, RS (raio de sensoriamento), RC (raio de comunicação)

```
1 início
2   Inicie população aleatoriamente
3   para todo ( $l \in S$ ) faça
4      $CM_l = CaminhoMinimo(l, sorvedouro)$ 
5   enquanto (!condição de parada) faça
6     Calcule função de aptidão de cada cromossomo (Funções (12) ou (13))
7     Aplique operadores genéticos sobre a população
8     Compute Árvore Geradora Mínima(nós ativos)
9   enquanto (houver um nó  $l$  não conectado ao sorvedouro) faça
10     $CM_l = CaminhoMinimo(l, sorvedouro)$ 
11  Compute a função objetivo
12 fim
```

O Algoritmo Local *Online* (ALO) é chamado toda vez que uma falha ocorre para tentar restaurar, se necessário, a cobertura e a conectividade da rede. Ele funciona escolhendo um novo nó para substituir o nó em falha. Seja $ET(i, j)$ a energia consumida pelo nó i para transmitir um dado para o nó j e C o conjunto de nós filhos do nó em falha. O ALO seleciona o nó substituto baseado no valor da equação (15). O fator quadrático é utilizado para escolher um nó substituto que esteja o mais equidistante possível do pai e dos filhos do nó em falha. Se o nó que falhar não tiver filhos o nó substituto será aquele que tiver o melhor custo benefício entre a energia consumida para alcançar o pai do nó falho e a área em falha que ele conseguir cobrir.

$$MelhorNoSubstituto = \min_{k \in S|y_k=0} \left\{ ET^2(k, pai) + \sum_{j \in C} ET^2(j, k) \right\} \quad (15)$$

Onde pai é o pai do nó em falha na árvore de conectividade.

Quando considera-se a energia residual a função de avaliação passa a ser a Equação 16.

$$MelhorNoSubstituto = \min_{k \in S|y_k=0} \left\{ (ET^2(k, pai) + \sum_{j \in C} ET^2(j, k)) / ER_{e_k} \right\} \quad (16)$$

O conjunto S é composto apenas por aqueles nós que nunca falharam. Se não houver perda de cobertura o algoritmo tenta restaurar apenas a conectividade.

A estrutura da abordagem híbrida é mostrada no Algoritmo 2. O AGS é executado para gerar uma solução inicial e então a cada falha o ALO é chamado para resolver os problemas de falha de cobertura e conectividade caso eles tenham ocorrido. Para acionar o AGS, em cada unidade de tempo de simulação, são comparados o número de nós ativos no período anterior e no corrente e se essa diferença for maior que um determinado valor o algoritmo é chamado para melhorar a solução corrente, o que é possível por ele possuir a visão global da rede. Nos testes realizados, o valor para chamada do AGS foi de 10% do valor do número de nós originalmente na rede.

Algorithm 2: Algoritmo Híbrido para o PCD-RSSF

Entrada: S, m, D, RS (raio de sensoriamento), RC (raio de comunicação)

```
1 início
2   Executar AGS
3   enquanto ( $S \neq \emptyset$ ) faça
4     Falha = Verificar Falha de Nós
5     se ( $Falha = TRUE$ ) então
6       Chamar Algoritmo Local Online
7        $S = S - f$ 
8       se ( $Executar\ AGS = TRUE$ ) então
9         Executar AGS
10 fim
```

5. Experimentos Computacionais

Para comparar as abordagens propostas foi simulada uma rede de sensores sujeita à falhas mecânicas, simuladas por um gerador de falhas aleatório, e sujeito à falhas de energia. Foram medidos os valores de cobertura, energias consumida e residual da rede para um tempo de vida pré-definido.

A cobertura é quantificada calculando-se a porcentagem de números de pontos de demanda cobertos por pelo menos um nó sensor. A energia consumida por um nó é dada pela soma das energias de ativação, manutenção e recepção e transmissão de dados. Nos gráficos são mostrados os valores de energia consumida por toda a rede em cada unidade de tempo. A energia residual é calculada subtraindo-se a energia consumida pelo nós da energia presente na bateria de todos os nós. A energia presente na bateria dos nós que falharam é desconsiderada.

Foram utilizados nos testes conjuntos de 36 e 49 nós posicionados aleatoriamente na área de monitoramento. A rede de 49 nós foi gerada adicionando-se 13 nós ao conjunto de 36 nós. Os parâmetros dos nós sensores são raio de sensoriamento igual a 15m, raio de comunicação igual a 25m, EA igual a 5mAh, EM igual a 13mA, ER igual a 2mA, ERe igual a 1000mAh, e tempo de transmissão igual a 0.5h, o que significa que durante o tempo total de operação da rede o nó passa 25% do tempo no modo de transmissão. Todos os valores são baseados no nó sensor Mica2 Technology (2006).

As dimensões da área de monitoramento são $50m \times 50m$ discretizada com um ponto de demanda por metro quadrado, totalizando 2500 pontos. A penalidade PN , para cada ponto não coberto, é 10000.

O tempo total de simulação é de 100 unidades de tempos (u.t.). Para quantificar o consumo de energia cada unidade de tempo representa 1 (uma) hora.

Para simular as falhas de nós, é utilizado um gerador de falhas com probabilidade exponencial, o que significa que conforme a tempo passa a probabilidade do nó falhar cresce. Para a unidade de tempo de simulação 0 (zero) a probabilidade é de 20%, chegando a 60% na unidade 100.

5.1. Método de Avaliação

O Algoritmo Híbrido é comparado a três abordagens: a solução ótima, o AGS Periódico e o ALO Puro considerando as versões com e sem energia residual.

A solução ótima é obtida resolvendo-se os modelos propostos com o pacote de otimização Cplex. A solução inicial é obtida, então a cada ocorrência de falha o nó em falha é excluído da lista de parâmetros de entrada e uma nova solução é gerada. Antes de gerar uma nova solução, realiza-se um pré-processamento que exclui do conjunto de pontos de demanda aqueles que não podem mais ser cobertos. Estes pontos passam a ser computados como falha de cobertura. Além disso energia de ativação dos nós que estão ativos na solução corrente é zerada. O modelo 1 só é executado novamente em caso de falha, seja ela simulada ou por falta de energia, uma vez que sua solução não muda até que um destes eventos ocorra. O modelo 2 é executado periodicamente e a cada ocorrência de falha.

Na abordagem periódica do AGS, o algoritmo é chamado a cada 10 unidades de tempo. Conforme os nós vão falhando eles vão sendo excluídos do conjunto S para que na nova execução do algoritmo eles não apareçam como candidatos. Esta abordagem não tenta se recuperar imediatamente de falhas, uma vez que o custo de processá-la e disseminá-la na rede é alto, o que significa que enquanto a nova solução não é gerada os dados dos nós que pertencem a sub-árvore do nó em falha não são entregues ao sorvedouro. Entretanto, eles continuam a executar suas tarefas e consumir energia.

Para comparar a solução híbrida com o ALO Puro, o primeiro passo é utilizar o algoritmo AGS para criar uma solução inicial. Então a cada ocorrência de falha, de destaca perda de cobertura e/ou conectividade, o algoritmo é imediatamente executado.

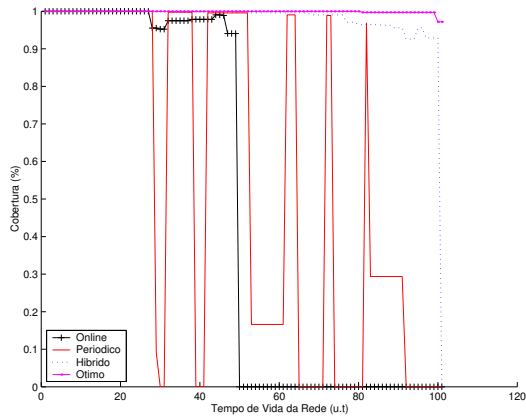
5.2. Resultados Computacionais

Por apresentarem comportamento bastante similar apenas os gráficos referentes à rede de 49 nós são apresentados. As figuras 1 e 2 mostram os resultados computacionais obtidos. Os comentários gerais são apresentados a seguir. Os gráficos de cobertura das figuras 1(a), e 2(a) mostram, como esperado, que a solução ótima mantém a cobertura mais alta possível até cair completamente. Observando os gráficos das figuras 1(c) e 2(c) pode-se perceber que a rede ainda possui energia residual, o que leva a conclusão de que a falha na cobertura se dá por falta de conectividade com o nó sorvedouro.

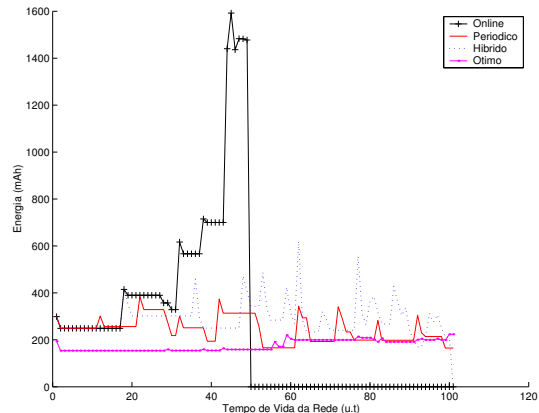
Quando a cobertura é a mesma para todas as curvas, a solução ótima apresenta o menor valor de energia consumida como mostrado nos gráficos das figuras 1(b) e 2(b). Quando a energia consumida pelos algoritmos é menor que a da solução ótima, a cobertura apresenta valores inferiores a desta solução. Como esperado a energia residual, mostrada nos gráficos das figuras 1(c) e 2(c), apresenta os maiores valores para a solução ótima porque a cada unidade de tempo seu resultado é o melhor possível em termos de energia consumida.

Os gráficos de energia das figuras 1(b), 1(c), 2(b) e 2(c) mostram que o AGS periódico apresenta os melhores resultados em relação à energia consumida seguido do AH e finalmente do ALO Puro. O AGS periódico consome menos energia porque sua visão global da rede ativa menos nós, mas como ele não se recupera imediatamente de falhas os resultados combinados de Cobertura x Energia Consumida não são bons. A visão local do ALO Puro ativa mais nós do que necessário consumindo mais energia. O AH balanceia bem a energia e a cobertura, atingindo os melhores resultados combinados de Cobertura x Energia Consumida.

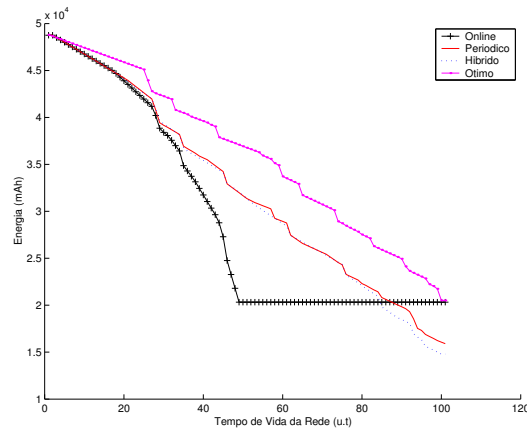
Comparando-se os resultados das figuras 3(a) e 3(b), pode-se notar que a solução do modelo 2 perde conectividade primeiro, isto acontece porque como a função objetivo minimiza a relação entre energias consumida e residual, a cada nova execução do algoritmo novos nós são ativados por apresentarem maior energia residual, o que significa que o consumo com ativação é maior. Por outro lado, a cobertura apresenta resultados superiores por preservar os nós. Um comportamento similar é observado para os AH 1 e AH 2, sem e com energia residual respectivamente. Analisando as duas alternativas de funções percebe-se um *trade-off* entre elas, o que significa que a escolha de uma ou de outra vai depender da aplicação.



(a) Cobertura para rede de 49 nós sensores



(b) Energia Consumida para rede de 49 nós sensores



(c) Energia Residual para rede de 49 nós sensores

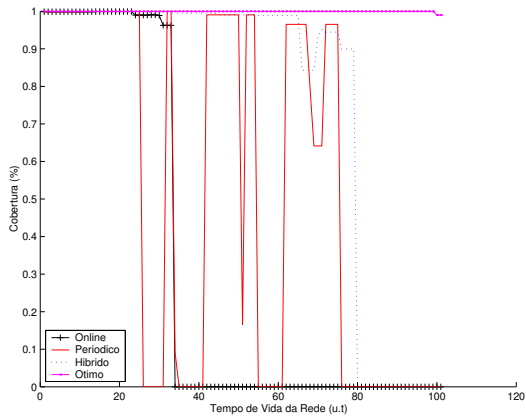
Figura 1. Solução Ótima do Modelo 1 x Algoritmos

6. Considerações Finais

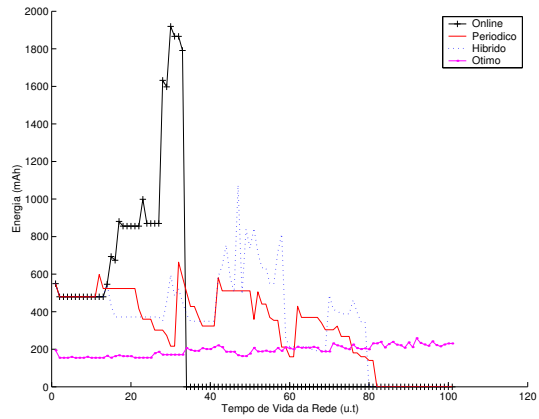
Este trabalho aborda o Problema de Controle de Densidade em Redes de Sensores sem Fio (PCD-RSSF) que consiste em, dado um conjunto de nós sensores, escolher o melhor subconjunto de nós que garanta a cobertura da área de monitoramento e a conectividade entre os nós. O melhor subconjunto é aquele que minimize a energia consumida ou a relação entre as energias consumida e residual. Este problema é modelado como um Problema de Programação Linear Inteira (PLI) que é resolvido por um pacote de otimização comercial. Dada a complexidade do modelo, o problema também é resolvido por um algoritmo híbrido que combina uma abordagem global, que resolve o problema todo, com uma abordagem local, que o trata apenas na região de ocorrência da falha. Para avaliar as soluções, é simulada uma rede de sensores sujeita à falhas de nós. A cada ocorrência de falhas ou quando solicitado pela aplicação, uma nova solução é gerada para restaurar, se necessário, a cobertura e a conectividade, ou para melhorar a solução atual.

Os resultados mostram que a combinação das duas abordagens gera soluções melhores do que quando elas são utilizadas individualmente e que o algoritmo híbrido se beneficia das vantagens de cada uma e que elas podem ser utilizadas de maneira que uma possa minimizar as desvantagens da outra.

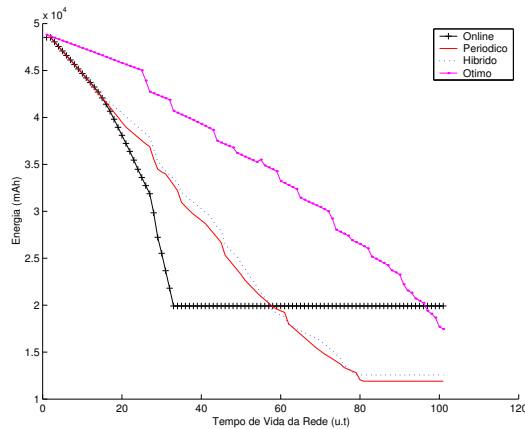
Os trabalhos em andamento estão focando o desenvolvimento de outras funções para chamada do algoritmo global dentro do algoritmo híbrido. Nestas funções serão considerados aspectos



(a) Cobertura para rede de 49 nós sensores



(b) Energia Consumida para rede de 49 nós sensores



(c) Energia Residual para rede de 49 nós sensores

Figura 2. Solução Ótima do Modelo 2 x Algoritmos

combinados de perda de cobertura e energia consumida para melhorar esse mecanismo e o algoritmo como um todo. Em trabalhos futuros pretende-se desenvolver uma solução distribuída do algoritmo local *online*.

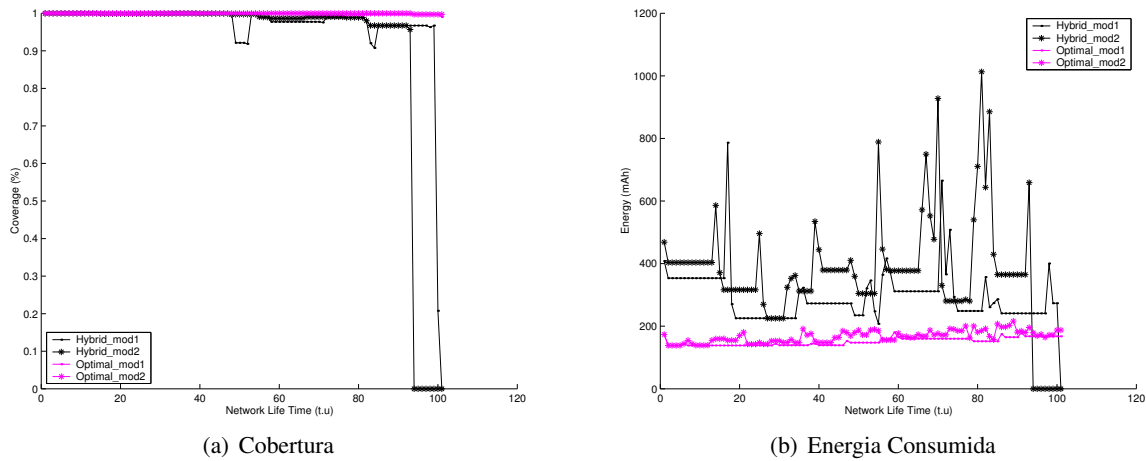


Figura 3. Comparação entre Solução Ótima do Modelo 1, Solução Ótima do Modelo 2, Algoritmo Híbrido 1 e Algoritmo Híbrido 2 para rede de 49 nós sensores

Referências

- Chakrabarty, K., Iyengar, S. S., Qi, H., and Cho, E. (2001). Coding Theory Framework for Target Location in Distributed Sensor Networks. In *Proceedings of the International Symposium on Information Technology: Coding and Computing (ITCC01)*, pages 130–134.
- Christofides, N. (1975). *Graph Theory: An Algorithm Approach*. Academic Press.
- ILOG (2006). Cplex. source: <http://www.ilog.com/products/cplex/>.
- Nakamura, F., Quintao, F., Menezes, G., and Mateus, G. (2005). An Optimal Node Scheduling for flat Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Networking (ICN05)*, volume 3420, pages 475–483.
- Quintao, F., Nakamura, F., and Mateus, G. R. (2004). A Hybrid Approach to solve the Coverage and Connectivity Problem in Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the IV European Workshop on Meta-heuristics (EU/ME04)*, volume 1.
- Technology, C. (2006). Mica2 - wireless measurement system. source: <http://www.xbow.com/>.
- Zhang, H. and Hou, J. (2005). Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. *Wireless ad hoc and Sensor Networks*, 1:89–123.