

**ALGORITMOS PARA CONTROLE DE DENSIDADE EM
REDES DE SENSORES SEM FIO**

FABÍOLA GUERRA NAKAMURA

**ALGORITMOS PARA CONTROLE DE DENSIDADE EM
REDES DE SENSORES SEM FIO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Ciência da Computação.

ORIENTADOR: PROF. GERALDO ROBSON MATEUS

Belo Horizonte
Fevereiro de 2010

© 2010, Fabíola Guerra Nakamura.
Todos os direitos reservados.

N163a Nakamura, Fabíola Guerra
Algoritmos para Controle de Densidade em Redes de Sensores sem Fio / Fabíola Guerra Nakamura. — Belo Horizonte, 2010
xxiii, 109 f. : il. ; 29cm

Tese (doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais

Orientador: Prof. Geraldo Robson Mateus

1. Computação — Teses. 2. Redes — Teses.
I. Orientador. II. Título.

CDU 519.6*22 (043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Algoritmos para controle de densidade em redes de sensores sem fio

FABÍOLA GUERRA NAKAMURA

Tese defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

PROF. GERALDO ROBSON MATEUS - Orientador
Departamento de Ciência da Computação - UFMG

PROF. LUIZ SATORU OCHI
Departamento de Ciência da Computação - UFF

PROF. MARKUS ENDLER
Departamento de Informática - PUC - RJ

PROF. RICARDO HIROSHI CALDEIRA TAKAHASHI
Departamento de Matemática - UFMG

PROF. ANTONIO ALFREDO FERREIRA LOUREIRO
Departamento de Ciência da Computação - UFMG

Belo Horizonte, 04 de fevereiro de 2010.

*Ao meu marido Eduardo, minha inspiração e maior fonte de orgulho.
As minhas lindas princesas Bela e Gabi, vocês enriquecem minha vida de uma maneira que
nunca pensei ser possível.*

Agradecimentos

Pensei muito por onde começar uma das seções mais importantes da minha tese.

Mas cheguei a conclusão que ninguém foi menos ou mais importante nessa minha enriquecedora e longa, bem longa, jornada então é melhor mesmo só começar.

Professor Robson é difícil traduzir em palavras tudo que aprendi nesse tempo em que o tive como meu orientador. Seus ensinamentos e sua postura como orientador foram essenciais na minha formação. Nesta longa jornada, nem sempre as coisas saíram como deveriam e por isso mesmo agradeço de coração todo seu apoio e sua compreensão neste meu longo e vitorioso processo, digo vitorioso porque como estou escrevendo meus agradecimentos significa que consegui terminar. Foi uma honra ter sido sua aluna.

Gostaria de agradecer ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais, pela oportunidade de participar deste programa de grande qualidade e que tanto me ensinou. Como um agradecimento especial ao Professor Loureiro por seu apoio desde o início. O tempo que passei em Belo Horizonte, mas especificamente no Departamento de Ciência da Computação da UFMG, me ajudou a definir que carreira eu realmente gostaria de seguir, a de professora. Alguns acham isso ruim e fazem até piada mas eu não poderia estar mais satisfeita com o que escolhi, apesar de reclamar de vez em quando. Mas reclamar faz parte da natureza humana :-).

O que falar da secretaria do DCC então. Para mim, um exemplo de competência e eficiência dificilmente encontrados, principalmente no ambiente do serviço público. Só que não para por ai, porque ainda encontrei em vocês apoio logístico, consultoria para assuntos particulares e claro carinho e amizade. Vocês são demais!

A Universidade Federal do Amazonas por todo o apoio recebido e ao Departamento de Ciência da Computação pelo ambiente excepcional de trabalho e pela força, inspiração e torcida!!

Meus queridos amigos, vocês com certeza fizeram toda a diferença nesse tempo que passei em BH. Sempre que lembro deste tempo tenho muito saudade e vocês são umas das maiores razões para isto. Encontrei amizades que levarei para toda a vida. Vou começar a grande lista e espero não esquecer ninguém. Meus sinceros agradecimentos à Ingrid, Mau-

ricio, Michele, Pinheiro, Giselle, Vilar, Ruth, Ruite, Silvie, Pio, Renata, Sidney, Horácio, Aracelly, Pedro, Raquel, André, Laura, Martin, Elbena, David, Janaina, Fabiano, Céu, Fernando, Michelinha, Aldri, Mateus, Débora e Luiz Henrique. A minha querida Kíssia, uma das primeiras ao me receber no início e que me acolheu com muito carinho no final de minha estada em BH. E claro que não poderiam faltar as crianças, algumas não tão crianças mais, Thaís, Larissa, Juliana, Agatha, Dudu, Mariana e Maria Júlia, meus sobrinhos do coração. Espero não ter esquecido ninguém.

Aos colegas do LAPO pelo ambiente de trabalho e pela paciência de aguentar os *mi-lhões* de testes que precisei fazer. Um agradecimento especial ao Gustavo e ao Martin que começaram esta jornada comigo e ao Fred, Flávio e Iuri, "meninos" dedicados com quem tive o prazer de trabalhar e que hoje vejo seguindo seu próprio caminho com um sucesso mais do que merecido.

Minha família linda seja de sangue seja pelo casamento. Seu apoio incondicional em todos os momentos e acolhidas calorosas nos períodos de férias foram essenciais para que tudo terminasse bem.

Minhas lindas filhas, Isabela Kimiê e Gabriela Sayuri, cujo sorriso ilumina meu dia, as gargalhadas são músicas para meus ouvidos e os abraços me confortam, ninguém, mas ninguém mesmo, senti tanto quanto vocês o que eu senti na reta final do Doutorado. Afinal as duas estiveram comigo, ou melhor, dentro de mim em uma parte da jornada. Minhas angústias, insônia, alegrias e vitórias foram também sentidas por vocês e espero não ter causado nenhum trauma :-). Mamãe ama muito vocês, nunca esqueçam disto.

Meu marido Eduardo Freire Nakamura, meu amor. Na sua tese você disse que não sabia se era um grande homem e ninguém melhor do que eu que te conheço como poucos, com suas qualidades, defeitos e "nakamuragens", para afirmar que você não é um grande homem apenas, você é um grande homem, marido, pai, filho, irmão, professor, pesquisador, etc. Sua dedicação e disciplina foram inspiradoras e seu apoio foi essencial para minha caminhada. Te amo muito!

Finalmente agradeço a Deus porque "Tudo posso naquele que me fortalece (Filipenses 4:13)".

“No Fim dá Certo: Se não Deu, é Porque não Chegou ao Fim.”
(Fernando Sabino)

Resumo

O Controle de Densidade em Redes de Sensores sem Fio é uma das maneiras mais exploradas para se utilizar os recursos escassos dessas redes de forma eficiente e contribuir para o aumento do seu tempo de vida. Neste trabalho o problema de controle de densidade consiste em escolher um subconjunto de nós que garanta a cobertura de uma área de monitoramento e a conectividade entre os nós ativos, minimize a energia consumida pela rede e obedeça os limites de energia dos nós. Para tratar o problema são propostas uma Abordagem Multiperíodo e uma Abordagem Periódica. A Abordagem Multiperíodo é um tratamento diferenciado e novo para o controle de densidade e que 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. Depois a abordagem define de maneira global a solução para cada um dos períodos, respeitando-se os limites de energia dos nós sensores. O principal objetivo da abordagem multiperíodo é estabelecer limites inferiores para algoritmos periódicos de controle de densidade, uma vez que sua visão global tanto da rede quanto dos períodos leva aos melhores resultados possíveis. O problema de controle de densidade multiperíodo é modelado como um problema de Programação Linear Inteira e é resolvido por um pacote de otimização comercial. Porém, em função de sua natureza combinatória, que impede que grandes instâncias sejam resolvidas são propostas uma Relaxação Lagrangeana e uma Heurística Lagrangeana como alternativas de solução do modelo. Os resultados mostram que a Relaxação proposta é capaz de gerar bons limites inferiores para o problema e que a Heurística é uma boa opção para geração de uma solução viável para o problema, ficando em vários casos bem próxima dos valores da solução ótima. A Abordagem Periódica consiste em encontrar a melhor solução para a rede em um determinado instante de tempo e repetir este procedimento periodicamente. O tratamento periódico é proposto como uma alternativa à abordagem multiperíodo. Também nesta abordagem é proposto um modelo de Programação Linear Inteira com 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. Porém, novamente esbarra-se em um problema combinatório e em virtude disto é desenvolvido um Algoritmo Híbrido que utiliza

pontos fortes de estratégia globais e locais para tratar o problema. Os testes mostram que o Algoritmo Híbrido teve um bom desempenho, tanto em termos de qualidade de solução mas principalmente em tempo de execução, quando comparado à solução ótima obtida pela resolução do modelo. Outros testes incluem análises da influência do sorvedouro no tempo de vida da rede e das vantagens de cada uma das funções objetivo propostas e comparam as abordagens multiperíodo e periódica para estabelecer quando a primeira é limite inferior para a segunda.

Abstract

Density Control is an effective way towards the efficient resource usage and lifetime extension in wireless sensor networks. In this work, the models and algorithms proposed for density control aims at guaranteeing coverage and connectivity, while minimizing the overall energy consumption and takes into account the battery capacity of the nodes. The Density Control Problem (DCP) is addressed by using two different approaches: Multiperiod and Periodic.

The Multiperiod Approach is a density control scheme that primarily divides the expected network lifetime in time periods, which may or may not have the same duration. The approach calculates, in a global way, a solution for the density control problem at each period, respecting the battery capacity of the node. Given the global aspect of the approach regarding the available nodes and the network lifetime, the optimal solution provides a network configuration that has the best coverage possible with the minimum overall energy consumption. Hence, a multiperiod solution could provide a lower bound for periodic density control schemes.

The Multiperiod Density Control Problem (MDCP) is modeled as a Integer Linear Programming (ILP) Problem and is solved by a commercial optimization package. However, the MDCP is a combinatorial problem which means large instances may not be solved at reasonable time. Then, we use different optimization techniques, such as Lagrangian Relaxation and Lagrangian Heuristics to address the problem. Results show that the Lagrangian Relaxation derives good lower bounds. The Lagrangian Heuristics is a good choice to generates a viable solution, that in some cases is very close the optimal solution, regarding the objective function.

The Periodic Approach is proposed as an alternative to the MDCP and consists in finding the optimal solution for the DCP in a given time and to repeat this procedure periodically. We model the Periodic Density Control Problem (PDCP) as a ILP problem with two objective functions, one that minimizes the energy consumption and other that minimizes the ratio between the energy consumption and the residual energy of the nodes. Given the combinatorial nature of the model, for small instances, we generate the solutions with

a commercial optimization package and for large instances we propose a Hybrid Algorithm (HA), that combines global and local strategies, to derive the solutions. Results show that, compared to the optimal solution of the model, the HA generates good solutions, considering both the quality of the solution and the execution time. Additional results include analysis of the sink node position into the network lifetime, advantages and disadvantages of each objective function, and compare the two density control approaches.

Lista de Figuras

1.1	PCDCC-RSSF	5
2.1	Rede de sensores sem fio	9
2.2	Provedor e consumidores de energia de um nó sensor.	12
2.3	Cobertura em Redes de Sensores sem Fio.	16
3.1	PCDM-RSSF	24
3.2	REDE	35
3.3	REDE	44
4.1	Distribuição de Energia Residual no Instante $t = 1$ para uma rede de 36 nós sensores.	70
4.2	Distribuição de Energia Residual no Instante $t = 35$	71
4.3	Distribuição de Energia das Soluções no Instante $t = 70$	72
4.4	Comportamento da Cobertura no tempo para os Modelos 1 e 2 para uma rede de 36 nós sensores	72
4.5	Consumo de Energia para os Modelos 1 e 2 para uma rede de 36 nós sensores	72
4.6	Comparação entre os Algoritmos Híbrido, Global Periódico, <i>Online</i> Puro e a Solução Ótima para o modelo 1 e para a instância t3650.	75
4.7	Comparação entre os Algoritmos Híbrido, Global Periódico, <i>Online</i> Puro e a Solução Ótima para o modelo 1 e para a instância t6450.	76
4.8	Comparação entre os Algoritmos Híbrido, Global Periódica, <i>Online</i> Puro e a Solução Ótima para o modelo 1 e para a instância t10050.	77
4.9	Comparação entre os tempos de execução dos Algoritmos Híbrido, <i>Online</i> Puro e a Solução Ótima para o modelo 1.	77
4.10	Comparação entre os Algoritmos Híbrido, Global Periódico, <i>Online</i> Puro e a Solução Ótima para o modelo 2 e para a instância t3650.	78
4.11	Comparação entre os Algoritmos Híbrido, Global Periódico, <i>Online</i> Puro e a Solução Ótima para o modelo 1 e para a instância t6450.	79

4.12	Comparação entre os Algoritmos Híbrido, Global Periódico, <i>Online</i> Puro e a Solução Ótima para o modelo 1 e para a instância t10050.	80
4.13	Comparação entre as Energias Consumidas da Solução Ótima para o Modelo 1 e instâncias t3650, t4950, t6450, t8150 e t10050.	80
4.14	Comparação entre os Algoritmos Híbrido, Global Periódico e <i>Online</i> Puro para o modelo 1 e para a instância t3650 em um ambiente com falhas.	81
4.15	Comparação entre os Algoritmos Híbrido, Global Periódico e <i>Online</i> Puro para o modelo 1 e para a instância t6450 em um ambiente com falhas.	82
4.16	Comparação entre os Algoritmos Híbrido, Global Periódico e <i>Online</i> Puro para o modelo 1 e para a instância t10050 em um ambiente com falhas.	83
4.17	Comparação entre a Solução Ótima para o modelo 1 e para a instância t3650 com os Sorvedouro nas Posições (0,0) e (25,25).	84
4.18	Comparação entre a Solução Ótima para o modelo 1 e para a instância t6450 com os Sorvedouro nas Posições (0,0) e (25,25).	85
4.19	Comparação entre a Solução Ótima para o modelo 1 e para a instância t10050 com os Sorvedouro nas Posições (0,0) e (25,25).	86
4.20	Conectividade entre nós sensores e o nó sorvedouro.	86
4.21	Comparação entre as Energias Consumidas pelos Modelos Periódico e Multiperíodo para a instância t4010	89
4.22	Comparação entre os Modelos Periódico e Multiperíodo para a instância t3650	90

Lista de Tabelas

2.1	Consumo de corrente do Rádio da Plataforma MicaZ da Crossbow.	14
3.1	Corrente consumida com transmissão em função da distância.	48
3.2	Instâncias de teste	49
3.3	Resultados da Bateria 1 comparando os limites das Relaxações Linear, Lagrangeana e Solução Ótima	50
3.4	Tempo de Execução dos Testes da Bateria 1	51
3.5	Resultados da Bateria 2 para as Instâncias com 4 Períodos	52
3.6	Resultados da Bateria 2 para as Instâncias com 5 Períodos	52
3.7	Resultados da Bateria 2 para as Instâncias com 6 Períodos	52
3.8	Resultados da Bateria 2 para as Instâncias com 7 Períodos	53
3.9	Comparação entre os limites das Relaxações Lagrangeana das baterias 1 e 2 e entre o limite da Heurística Lagrangeana e a Solução Ótima	54
4.1	Corrente consumida com transmissão em função da distância.	69
4.2	Tempo de Vida da Rede para os Modelos 1 e 2	73
4.3	Instâncias de teste para a Bateria 2	74
4.4	Tempo de Vida em Relação a Posição do Sorvedouro	87
4.5	Consumo Total e Falha de Cobertura Média para a instância t4050 para as Abordagens Multiperíodo e Periódica	90
4.6	Consumo Total e Falha de Cobertura Média para a instância t3650 para as Abordagens Multiperíodo e Periódica	91

Sumário

Agradecimentos	ix
Resumo	xiii
Abstract	xv
Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xix
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo	3
1.2.1 Definição do Problema de Controle de Densidade	3
1.2.2 Contribuições da Tese	4
1.3 Estrutura do documento	7
2 Fundamentos	9
2.1 Energia em Redes de Sensores sem Fio	12
2.1.1 Provedor de energia	13
2.1.2 Consumidores de energia	14
2.2 Problemas de Controle de Densidade em Redes de Sensores sem Fio	15
2.2.1 Cobertura em Redes de Sensores sem Fio	15
2.2.2 Conectividade em Redes de Sensores sem Fio	16
2.2.3 Problema de Controle de Densidade e Cobertura em Redes de Sensores sem Fio Planas	17
2.2.4 Problema de Controle de Densidade, Cobertura e Conectividade em Redes de Sensores sem Fio Planas	17

2.2.5	Problema de Controle de Densidade, Cobertura e Conectividade em Redes de Sensores sem Fio Hierárquicas	17
2.2.6	Conectividade em Redes de Sensores sem Fio	18
2.3	Trabalhos relacionados	18
2.4	Considerações Finais	21
3	Abordagem Multiperíodo	23
3.1	Definição do Problema	24
3.2	Formulação matemática	25
3.2.1	Número Mínimo de Nós Ativos	29
3.2.2	Solução do Modelo Matemático	30
3.3	Modelo Multiperíodo Relaxado	32
3.3.1	Relaxação Lagrangeana	32
3.3.2	Problema Lagrangeano	32
3.3.3	Limite Inferior	36
3.3.4	Lagrangeano Dual	39
3.3.5	Limite Superior	41
3.4	Resultados Computacionais	46
3.4.1	Parâmetros de Entrada	47
3.4.2	Métricas de Avaliação	48
3.4.3	Resultados da Bateria 1	49
3.4.4	Resultados da Bateria 2	51
3.5	Considerações Finais	53
4	Abordagem Periódica	57
4.1	Definição do Problema	58
4.2	Formulação matemática	58
4.3	Algoritmo Híbrido	61
4.3.1	Algoritmos para Comparação	65
4.3.2	Método de Geração de falhas	66
4.4	Resultados Computacionais	67
4.4.1	Bateria de Testes 1: Comparação entre os Modelos Matemáticos	67
4.4.2	Bateria de Testes 2 : Avaliação do Algoritmo Híbrido	73
4.4.3	Bateria de Testes 3 : Avaliação dos Algoritmos Propostos em um ambiente com falhas	78
4.4.4	Bateria de Testes 4 : Avaliação da Influência do Sorvedouro no tempo de vida da rede	83

4.4.5	Bateria de Testes 5: Comparação entre as Abordagens Multiperíodo e Periódica	87
4.5	Considerações Finais	91
5	Considerações Finais	93
5.1	Conclusões	93
5.2	Trabalhos Publicados	97
5.3	Trabalhos Futuros	100
	Referências Bibliográficas	103

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Na última década a tecnologia na área das comunicações apresentou diversos avanços como o aumento da abrangência da *internet* em termos de conteúdo, serviços e usuários, a grande expansão no número de serviços ofertados por operadoras de telefonia celular e a popularização de redes sem fio *ad hoc*. Esta última foi impulsionada principalmente pelo surgimento de protocolos de comunicação como *IEEE 802.11* e *bluetooth*. Na área de redes *ad hoc*, a expansão atinge tanto ambientes acadêmicos e profissionais quanto residenciais. Sua utilização vai de aplicações bem simples, como no caso de *mouses* e teclados sem fio, bem populares, como redes móveis, até sofisticados sistemas de rastreamento.

Neste mesmo período, diversas pesquisas avaliaram e alertaram sobre o crescente e talvez irreversível impacto do progresso no meio ambiente. Outras questões modernas, como responsabilidade social, juntaram-se a este cenário e fizeram com que pesquisadores de áreas como engenharia eletrônica e computação encontrassem no meio ambiente um novo nicho para desenvolvimento de pesquisas.

Agregando-se a estes fatores avanços recentes em processadores embutidos e sistemas micromecânicos, um novo tipo de redes surgiu, as Redes de Sensores Sem Fio - RSSF([Savvides et al., 2001]), um tipo especial de rede móvel *ad hoc* (MANET - Mobile Ad hoc Networks) composta por dispositivos autônomos e compactos, denominados nós sensores, que realizam operações de sensoriamento, processamento e comunicação sem fio. Basicamente, quando estabelecidas em uma área, as RSSFs são capazes de monitorar o comportamento de um fenômeno e disseminar os dados coletados para outros nós e finalmente para um observador(Tilak et al. [2002c]). Estas redes poderão ser estabelecidas em áreas de difícil acesso e inóspitas, através do lançamento dos nós nestas regiões. Entre outros objetivos espera-se que as RSSFs conectem o mundo físico às redes de computadores tradicionais

como a Internet e funcionem como uma interface entre os dois mundos.

Inicialmente vislumbraram-se para as RSSFs aplicações como monitoramento de vida selvagem (Campos & Nakamura [2009]), medição de temperaturas, extensão dos danos causados por terremotos, controle de incêndios florestais, monitoramento de vulcões, etc (Estrin et al. [2001]). Porém, conforme os conceitos sobre as RSSFs foram crescendo e se solidificando, a abrangência de suas aplicações também cresceu e aplicações de medição de qualidade do ar em centros urbanos, detecção de presença de pessoas e/ou objetos em um ambiente e a determinação do volume de tráfego em uma cidade passaram também a motivar as pesquisas. Por sua vez, aplicações de rastreamento de veículos realizadas via satélite, podem tornar-se mais baratas e acessíveis quando limitadas a centros urbanos, onde redes de sensores podem ser estrategicamente instaladas e servir como redes de coleta e disseminação de dados sobre os veículos.

Como já citado, as RSSFs são classificadas como redes *ad hoc*, mas possuem diversas particularidades que impedem que soluções já desenvolvidas e comprovadamente eficientes sejam reutilizadas, como por exemplo para roteamento e localização de nós da rede. Entre estas diferenças destacam-se a alta densidade e a redundância de nós, nós sujeitos a falhas, topologia dinâmica, comunicação *broadcast* em contraste com a comunicação ponto-a-ponto das redes tradicionais e nós com capacidade limitada de energia, processamento e memória. Isto significa que algoritmos de roteamento e processamento de *streams* de dados, por exemplo, devem ser adaptados para trabalhar de maneira eficiente e muitas vezes autônoma em um ambiente dinâmico com restrições de energia, processamento e comunicação, e onde falhas não são exceções. Isto torna a pesquisa na área bastante desafiadora.

Além disso, 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. Para contornar ou atenuar esses problemas, pesquisas na área trabalham com aspectos de *hardware* e *software*. No primeiro caso, os pesquisadores concentram-se em tornar os nós mais econômicos no consumo de energia e em aumentar seu poder computacional e de comunicação, mantendo baixos custos. No segundo, eles desenvolvem soluções que, levando em consideração as características e particularidades dessas redes, colaborem para aumentar seu tempo de vida e as tornem mais eficientes tanto em termos de aproveitamento dos recursos quanto da garantia dos requisitos da aplicação. O foco deste trabalho é no segundo caso, o *software*.

Neste trabalho uma característica particular de redes de sensores, que é extremamente importante, é a redundância de nós, ou seja, o número adicional de nós sensores posicionados na região de interesse com o objetivo de possibilitar maior área de cobertura, reforçar a conectividade entre os nós e prover mecanismos de tolerância a falhas.

Dentre as soluções propostas pela área de *software* 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 ([Tilak et al., 2002a]). Contribuições adicionais do controle de densidade são a atenuação de problemas como colisões de pacotes e interferências quando comparados com redes densas.

O problema fundamental no controle de densidade é determinar um subconjunto de nós que garanta os requisitos da aplicação, como por exemplo a cobertura total da área de interesse e a conectividade entre os nós ativos para permitir a disseminação de dados. Dentre os subconjuntos que garantem esses requisitos, o escolhido é aquele que melhor utiliza os recursos da rede, por exemplo aquele que consuma menos energia.

O controle de densidade pode ser tratado de diversas maneiras como por exemplo de maneira estática, na qual dada uma configuração da rede escolhe-se a melhor solução naquele instante, ou de maneira dinâmica, na qual aspectos adicionais como o tempo esperado de vida da rede, a energia residual dos nós e falhas são levados em consideração na escolha da solução. Algoritmos desenvolvidos para o controle de densidade podem ser inseridos em ambientes de gerenciamento de RSSFs como propostos por Ruiz et al. [2003] e auxiliar na operação e utilização eficiente dos recursos da rede.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é tratar o problema de controle de densidade em redes de sensores sem fio, escolhendo o subconjunto de nós sensores que garanta a área de cobertura e a conectividade entre os nós de forma a minimizar a energia consumida pela rede e em alguns casos preservar nós com baixa energia residual. Esta visão estática é estendida para o controle de densidade dinâmico, onde o problema é abordado de duas maneiras: abordagem multi-período e abordagem periódica. Ambas são tratadas com diversas estratégias entre as quais se destacam Modelos Matemáticos de Programação Linear Inteira, Relaxação Lagrangeana, Heurística Lagrangeana e Heurísticas especialmente desenvolvidas para os problemas.

1.2.1 Definição do Problema de Controle de Densidade

O problema de controle de densidade, cobertura e conectividade abordado nesse trabalho é 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, Cobertura e Conectividade em Redes de Sensores sem Fio (PCDCC-RSSF) deve garantir para cada ponto de demanda $j \in D$ na área A que pelo menos q nós sensores $l \in S$ o cubram e que exista uma rota entre cada nó sensor ativo $l \in S$ e um nó sorvedouro $m \in M$, estando o conjunto de nós S sujeito a restrições de energia. A solução deve minimizar a energia consumida pelos nós sensores. O PCDCC-RSSF é ilustrado na Figura 1.1. Esta definição corresponde ao problema de controle de densidade estático. Nos Capítulos 3 e 4 são dadas as definições do problema sob a luz das abordagens multiperíodo e periódica, respectivamente.

1.2.2 Contribuições da Tese

As contribuições da tese são listadas abaixo.

Abordagem Multiperíodo para o Problema de Controle de Densidade em RS-

SFs A Abordagem Multiperíodo é um tratamento diferenciado e novo para o controle de densidade e que 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. A abordagem então define de maneira global a solução para cada um dos períodos, respeitando-se os limites de energia dos nós sensores para o tempo de vida total da rede. O critério para escolha da melhor solução é minimizar o consumo total de energia da rede, ou seja, a soma do consumo de energia de todos os nós em cada um dos períodos. O principal objetivo da abordagem multiperíodo é estabelecer limites inferiores, de consumo de energia e falha de cobertura, para algoritmos periódicos de controle de densidade, uma vez que sua visão global tanto da rede quanto dos períodos leva aos melhores resultados possíveis. A solução multiperíodo é um limite inferior para problemas periódicos quando o número e duração dos períodos são iguais, porém, como é mostrado posteriormente, esta situação nem sempre é necessária. Neste trabalho o problema de controle de densidade multiperíodo é modelado como um problema de Programação Linear Inteira e é resolvido por um pacote de otimização comercial. Este modelo matemático é flexível e capaz de tratar redes homogêneas e heterogêneas e períodos de tempo com diferentes durações, pois estas características são todas traduzidas nos parâmetros de entrada do modelo. Porém, em função de sua natureza combinatória, que impede que grandes instâncias sejam resolvidas são propostas uma Relaxação Lagrangeana e uma Heurística Lagrangeana como alternativas de obter soluções aproximadas do modelo. A Relaxação Lagrangeana relaxa uma ou mais restrições do modelo e atribui a essas restrições escalares denominados Multiplicadores de Lagrange e adicioná-las a função objetivo. A relaxação destas restrições permite que o modelo seja separado em subproblemas para os quais é possível obter um algoritmo que encontre a solução ótima. Para cada subproblema

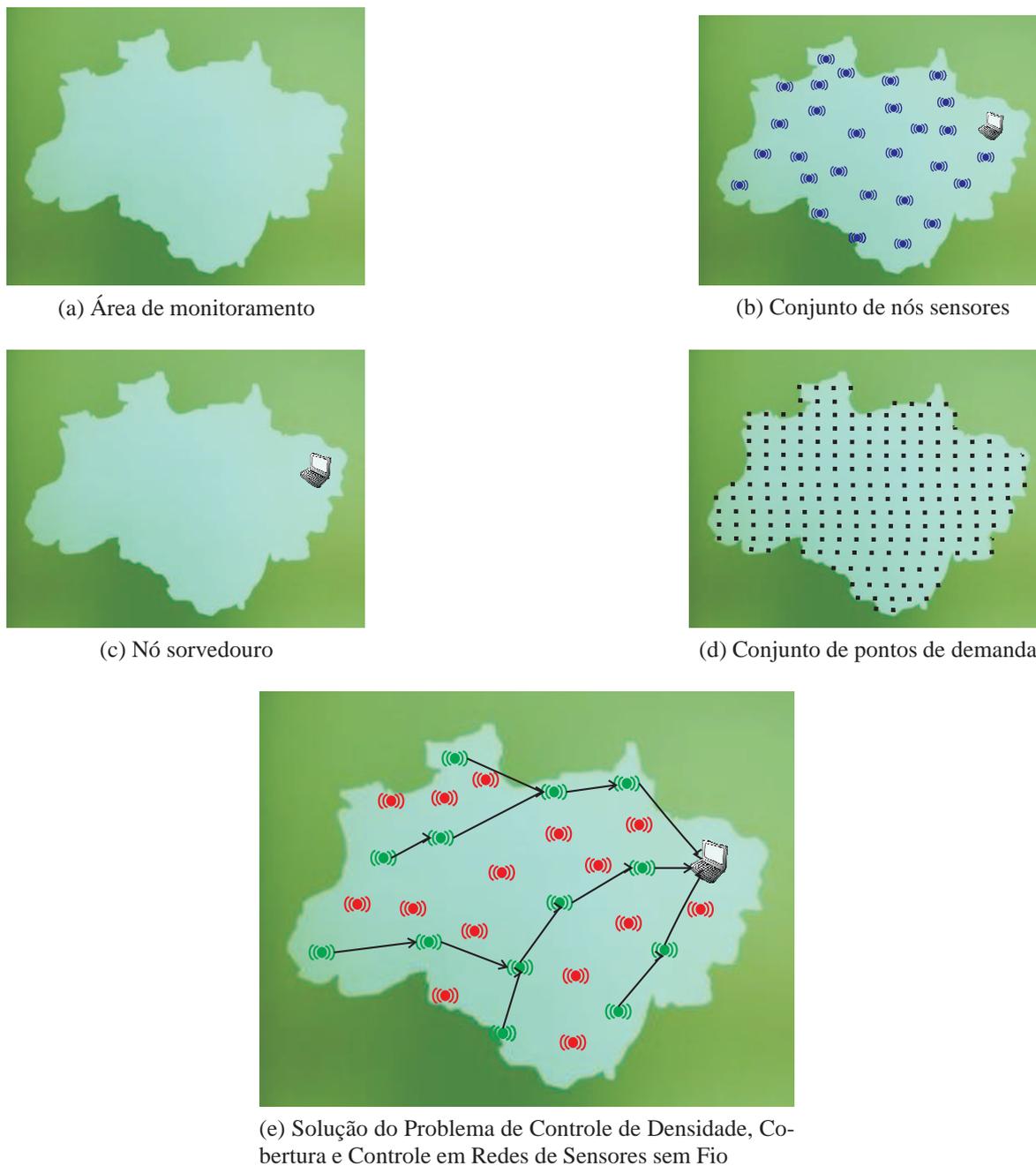


Figura 1.1: Problema de Controle de Densidade, Cobertura e Conectividade em RSSF (PCDCC-RSSF) Planas.

é encontrada a solução ótima e estas são combinadas, obtendo-se um limite inferior para o problema para um determinado conjunto de Multiplicadores de Lagrange quando se trata de um problema de minimização. Neste trabalho escolheu-se para serem relaxadas restrições que desacoplam variáveis, ou seja, restrições que separam as variáveis em subproblemas diferentes. A Heurística Lagrangeana viabiliza as restrições relaxadas e obtém uma solução

primal viável para o problema e por sua vez um limite superior do valor ótimo quando se trata de problemas de minimização. Este procedimento é realizado para diversos valores dos Multiplicadores de Lagrange e no final da execução do algoritmo mantêm-se o maior limite inferior e o menor limite superior obtidos. Quanto menor a diferença entre os limites, melhores os resultados. Os resultados deste trabalho mostram que a Relaxação proposta é capaz de gerar bons limites inferiores para o problema abordado e que a Heurística é uma boa opção para geração de uma solução viável para o problema, ficando em vários casos bem próxima dos valores de uma solução ótima.

Abordagem Periódica para o Problema de Controle de Densidade em RSSFs

Esta abordagem consiste em, periodicamente e dado o estado atual da rede (número de nós disponíveis, energia residual), definir a melhor solução para o problema de controle de densidade. É considerada a melhor solução aquela que garante a cobertura total da área e a conectividade entre os nós com o menor custo de energia. O tratamento periódico é uma alternativa à abordagem multiperíodo para tratar o controle de densidade. O problema alvo também é modelado como um problema de Programação Linear Inteira, com 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. O modelo matemático é resolvido por um pacote comercial de otimização. A Abordagem Periódica trata problemas menores que a multiperíodo, por excluir os períodos de sua modelagem, mas também é um problema combinatório, o que significa que a obtenção da solução ótima para instâncias grandes é inviável. Por isso é desenvolvido um Algoritmo Híbrido para tratá-lo e que é composto por um Algoritmo Global Periódico e um Algoritmo Local *Online*. O Algoritmo Global Periódico é uma solução centralizada que reconstrói toda rede com uma visão geral e que é executado sob demanda. O Algoritmo Local *Online* reestrutura a rede para manter a cobertura e a conectividade entre nós no caso de ocorrência de falha de nós, seja esta falha por falta de energia, problemas mecânicos ou fatores externos. A abordagem *Online*, ao contrário da abordagem Global, resolve o problema apenas na região onde ocorreu a falha. O Algoritmo Híbrido funde em uma única solução os aspectos positivos observados e avaliados nas abordagens global e local. Os testes mostram que o Algoritmo Híbrido teve um bom desempenho, tanto em termos de qualidade de solução mas principalmente em tempo de execução, quando comparado à solução ótima obtida pela resolução do modelo. Outros testes incluem análises da influência do 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 confirmar que a primeira é limite inferior para a segunda.

1.3 Estrutura do documento

Este documento é organizado como segue. No Capítulo 2 são apresentados os fundamentos sobre RSSFs e são destacados àqueles mais relevantes ao trabalho. O Capítulo 3 trata da Abordagem Multiperíodo e apresenta e avalia suas estratégias de solução, que incluem a modelagem matemática, a proposta de Relaxação Lagrangeana e a respectiva Heurística Lagrangeana. O modelo matemático com duas opções de função objetivo e o Algoritmo Híbrido para o problema de controle de densidade periódico são propostos e avaliados no Capítulo 4. Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais, uma lista dos trabalhos publicados e os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentos

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, conforme mostrado na Figura 2.1. 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 et al., 2002c]). 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. Em algumas aplicações estes dados podem ser coletados periodicamente por exemplo através de um dispositivo móvel, como um PDA (Personal Digital Assistant) ou por um robô que circula na rede.

Trabalhos na literatura têm levantado a importância das RSSFs para o mundo moderno, bem como o potencial das aplicações que emergem com o progresso dessa tecnologia. Dentre essas aplicações podem ser citados: determinação de qualidade do ar em centros urbanos, monitoramento de inimigos em campos de batalha, garantia de segurança em museus, monitoramento de vida animal, determinação da extensão dos danos causados por um terremoto,

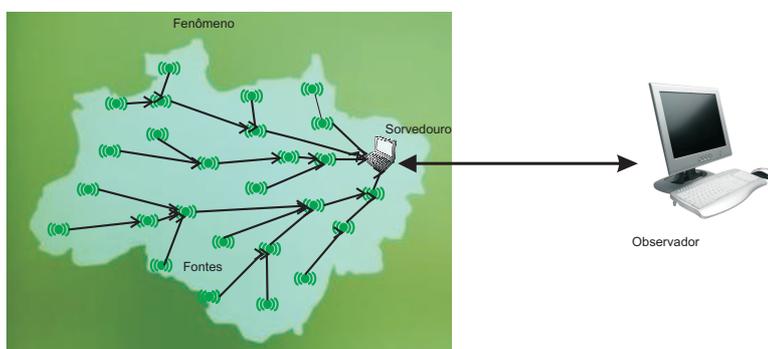


Figura 2.1: Rede de sensores sem fio

controle de incêndios florestais, monitoramento de vulcões, detecção de presença de pessoas e/ou objetos em um ambiente e a determinação do volume de tráfego em uma cidade, entre outros.

As RSSFs executam tarefas colaborativas tais como determinação do valor de um parâmetro no local monitorado, detecção de eventos, classificação de objetos e rastreamento de objetos. A colaboração pode ocorrer combinando-se os dados de diversos nós, e/ou combinando-se dados de diferentes dispositivos sensores. Por exemplo, RSSFs podem auxiliar no controle de incêndios florestais disseminando dados como temperatura, pressão, umidade, luz e velocidade do vento e que utilizados em conjunto com dados sobre vegetação e topografia do local poderiam prever como será o avanço do fogo.

Segundo Ruiz et al. [2003], as RSSFs podem ser classificadas segundo diversas de suas características, tais como composição, densidade de nós, organização dos nós, distribuição de nós e coleta conforme mostrado abaixo.

- Composição
 - Homogêneas : todos os nós são do mesmo tipo.
 - Heterogêneas: os nós são diferentes.
- Organização
 - Planas: redes sem agrupamentos.
 - Hierárquicas: redes com agrupamentos.
- Distribuição
 - Regular: nós são distribuídos de maneira equidistante na área de monitoração.
 - Irregular: nós estão distribuídos de maneira aleatória na área de monitoração.
- Densidade
 - Balanceada: a concentração de nós por área é a mesma em toda a área de monitoração.
 - Densa: a concentração de nós por área é alta.
 - Esparsa: a concentração de nós por área é baixa.
- Controle
 - Aberta: a rede apenas monitora a região.

- Fechada: a rede monitora e atua na região. Neste caso, acoplados a redes podem existir equipamentos que
- Coleta
 - Periódica: coleta de dados realizada em intervalos regulares.
 - Contínua: a coleta é realizada de maneira ininterrupta.
 - Reativa: a coleta de dados é realizada com a ocorrência de um evento.
 - Tempo real: neste caso o objetivo é coletar a maior quantidade possível de dados dentro de um intervalo de tempo.
- Disseminação
 - Programada: os nós disseminam os dados em intervalos programados.
 - Contínua: os dados são disseminados continuamente.
 - Sob demanda: os nós respondem a consultas.
 - Dirigida a evento: os dados são disseminados quando ocorre um evento.
- Cooperação entre os nós
 - Básica: os nós realizam processamento de auto teste, tradução dos dados, filtros de dados.
 - Infra-estrutura: além do processamento básico os nós ainda executam procedimentos relacionados a roteamento, eleição de líder, descoberta de localização, entre outros.
 - Correlação: os nós realizam processamento relacionado a correlação de dados, tais como: fusão, supressão, compressão, entre outros.

Os maiores desafios na pesquisa em rede de sensores sem fio são inerentes da sua própria vocação, uma vez que os custos associados à obtenção de uma rede de comunicação extremamente versátil e adaptativa podem ser caros. O tamanho reduzido dos nós limita a capacidade de seus componentes. Por sua vez o uso de baterias limita a autonomia dos nós em termos de consumo de energia, uma vez que o estado atual de desenvolvimento destes dispositivos de armazenamento não possibilita a atuação prolongada dos nós. Por isso que soluções, tanto de *hardware* quanto de *software*, eficientes em termos de consumo de energia são essenciais em aplicações de RSSFs que necessitam operar por um longo período de tempo.

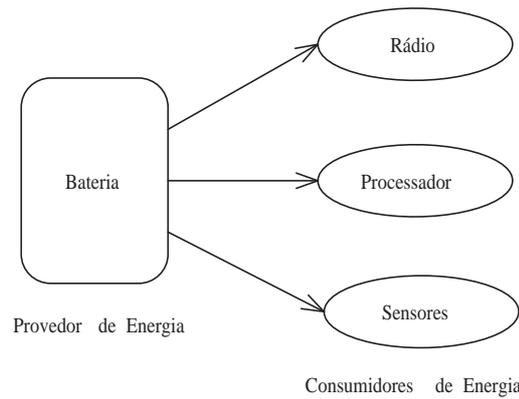


Figura 2.2: Provedor e consumidores de energia de um nó sensor.

2.1 Energia em Redes de Sensores sem Fio

Uma característica extremamente relevante nas RSSFs é a forte restrição de energia, em virtude da bateria limitada dos nós sensores. Determinar o modelo de consumo de energia dos nós sensores e da aplicação auxilia na identificação de características importantes sobre os nós e sobre a rede. Este modelo permite que projetistas de RSSFs se focalizem em fatores que têm o maior potencial de impacto no tempo de vida destas redes ([Bhardwaj et al., 2001]).

Os nós sensores consistem tipicamente de cinco componentes: bateria, memória, processador, sensor e rádio ([Tilak et al., 2002b]). A bateria é o armazenador de energia do dispositivo e possui capacidade limitada com pouca possibilidade de reposição, o que restringe a quantidade de energia da rede. A memória e o processador possuem capacidade reduzida em virtude do tamanho do nó. Os sensores são responsáveis pelo monitoramento da área e pode ser de temperatura, sísmico, detector de movimento, entre outros. O rádio inclui o sistema de transmissão, recepção, amplificador e antena. Estes componentes podem ser divididos em provedor e consumidores de energia ([Park et al., 2000]). Conforme mostrado na Figura 2.2 a bateria é a fonte de energia do nó e o rádio, os dispositivos sensores e o processador são os consumidores. Cada um dos componentes executa uma ou mais operações e, dado que a tensão da bateria é constante, a energia consumida nessas operações pode ser calculada pela seguinte Equação:

$$E_c = i \times t$$

onde:

E_c é a energia consumida na operação

i é a corrente requerida pela operação

t é o tempo total da operação

2.1.1 Provedor de energia

Além da sua capacidade, uma característica importante da bateria é seu modelo de descarga, ou seja, como a quantidade de energia armazenada na bateria é consumida. Park et al. [2001] propõem uma classificação dos modelos de bateria baseados em seu comportamento de descarga, sendo o seu tempo de sua vida teórica calculado pela Equação:

$$T = \frac{C}{I} \quad (2.1)$$

onde T = tempo de vida da bateria, C = capacidade da bateria e I = corrente de descarga, que é a corrente fornecida pela bateria para o dispositivo. Uma das unidades comumente utilizada para indicar a capacidade da bateria é dada em Ah (Âmpere*Hora).

As baterias podem então ser classificadas como lineares e dependentes da taxa de descarga.

No modelo linear a bateria é considerada um armazenador linear de corrente e sua capacidade C_r depois de um uma operação de duração de tempo t_d pode ser calculada pela equação

$$C_r = C' - \int_{t=t_0}^{t_0+t_d} I(t)dt \quad (2.2)$$

onde C' é a capacidade anterior da bateria em Ah e $I(t)$ é a corrente instantânea consumida em A pelo circuito no tempo t em horas, que permanece a mesma enquanto o modo de operação permaneça o mesmo.

Neste caso a Equação 2.2 pode tornar-se:

$$C_r = C' - \int_{t=t_0}^{t_0+t_d} I(t)dt = C' - I.t|_{t=t_0}^{t_0+t_d} = C' - I.t_d \quad (2.3)$$

No modelo dependente da taxa de descarga é introduzido o conceito de do fator k ou fator de eficiência da capacidade da bateria determinado pela taxa de descarga, que passa a considerar o efeito da descarga da bateria na sua capacidade máxima. Este fator é definido pela equação

$$k = \frac{C_{eff}}{C_{max}} \quad (2.4)$$

onde C_{eff} é a capacidade efetiva da bateria e C_{max} a capacidade máxima da bateria, ambas expressas em Ah.

Neste caso a equação 2.3 torna-se:

$$C_r = k.C' - I.t_d \quad (2.5)$$

Operação	Corrente (mA)
Transmissão	17
Recepção	8
Dormindo	0,002

Tabela 2.1: Consumo de corrente do Rádio da Plataforma MicaZ da Crossbow.

Para se calcular a energia residual de um nó sensor, determina-se a energia consumida pelo nó e utiliza-se a Equação 2.2 ou a 2.5.

De posse da energia residual dos nós pode-se construir o Mapa de Energia, que indica o nível de energia da rede através da representação da quantidade de energia em cada nó sensor em um dado momento. O mapa de energia pode ser utilizado como uma ferramenta para auxílio na tomada de decisão no processo de gerenciamento de recursos da rede, e é muito útil em problemas de controle de densidade. Mini et al. [2004] apresentam maneiras eficientes para construção do mapa de energia e Machado et al. [2005] trabalham com o mapa de energia para determinar as melhores rotas para disseminação dos dados.

2.1.2 Consumidores de energia

O rádio é responsável pela comunicação e tem como funções básicas a transmissão e recepção de dados. Em valores absolutos de corrente, o rádio é o maior consumidor de energia do nó. Os valores indicados na Tabela 2.1 são referentes ao consumo de corrente do Rádio do nó sensor MicaZ da *Crossbow* que trabalha na frequência de 2.4GHz([Technology, 2006]). O valor da corrente consumida na transmissão refere-se a transmissão com potência de $0dBm$.

O dispositivo sensor é responsável pela coleta de dados do fenômeno em uma RSSF. Estes sensores podem ser classificados em monitores de condições ambientais e detectores de movimento. Seth Hollar lista diversos tipos de dispositivos sensores que podem compor um nó sensor, entre os quais tem-se magnetômetros, acelerômetros, sensores de luz, temperatura, pressão e umidade, que podem ou não fazer parte da mesma placa de sensores em um nó([Hollar, 1996]). Os dados coletados por diferentes sensores podem ser combinados e fornecer dados mais precisos sobre o fenômeno em observação.

Os processadores de nós sensores, em virtude da limitação de energia do dispositivo, devem economizar o máximo de energia possível. Em função do baixo custo e tamanho reduzido dos nós sensores o processador e a memória apresentam capacidades reduzidas.

2.2 Problemas de Controle de Densidade em Redes de Sensores sem Fio

Nesta seção são estabelecidos os conceitos de cobertura e conectividade que são básicos para se caracterizar do problema de Controle de Densidade de nós em RSSFs e logo após são apresentados alguns problemas de controle de densidade em redes de sensores.

2.2.1 Cobertura em Redes de Sensores sem Fio

Megerian et al. [2002] definem a cobertura como uma medida da habilidade da rede em detectar e observar um elemento na área de monitoramento. Meguerdichian et al. [2001] relacionam a cobertura aos requisitos de qualidade de serviço da RSSF pois pode indicar os níveis de observabilidade da rede. A área de cobertura de uma RSSF corresponde a região coberta pelo dispositivo de sensoriamento dos nós ativos da rede, podendo ou não considerar obstáculos.

Para caracterizar a área de cobertura de uma rede de sensores sem fio, com relação a um tipo de sensor, é primeiro definido que a área de sensoriamento de um nó fonte corresponde a uma região ao redor do nó fonte onde um fenômeno pode ser detectado. Essa região é definida como um círculo de raio R , onde R é o raio de sensoriamento do nó (Figura 2.3(a)). A área de cobertura de uma rede de sensores sem fio corresponde a união de todas as áreas de sensoriamento dos nós ativos como mostrado na Figura 2.3(b). A garantia de cobertura pode ser definida pelo problema de q -cobertura, onde q é maior ou igual a 1. O valor q depende do fenômeno que se deseja monitorar. Em geral quando o objetivo da aplicação é medição de grandezas como temperatura, umidade, pressão, entre outras basta fazer q igual a 1, mas para aplicações de rastreamento de animais apenas um nó cobrindo cada ponto de demanda pode não ser suficiente para determinar por exemplo a trajetória destes animais, porque esta trajetória é geralmente obtida por métodos de triangularização, que necessitam que em cada ponto da trajetória do animal ele seja detectado por pelo menos 3 nós sensores. Este procedimento de detecção é similar ao procedimento para localização de nós em uma rede *ad hoc* [Niculescu & Nath, 2001].

Apesar de alguns dispositivos sensores serem pontuais, como por exemplo sensores de temperatura, a definição de uma área de cobertura do nó significa que variações no fenômeno monitorado que ocorram nesta área circular serão detectadas pelo sensor com maior ou menor intensidade. Os nós que detectaram as variações cooperam entre si trocando seus dados, que por suas vez serão processados e podem estimar a posição onde elas ocorreram, desde que se conheça a localização destes nós. O raio de sensoriamento pode ser entendido também como uma medida que indica qual a distância máxima desejada entre os nós sensores,

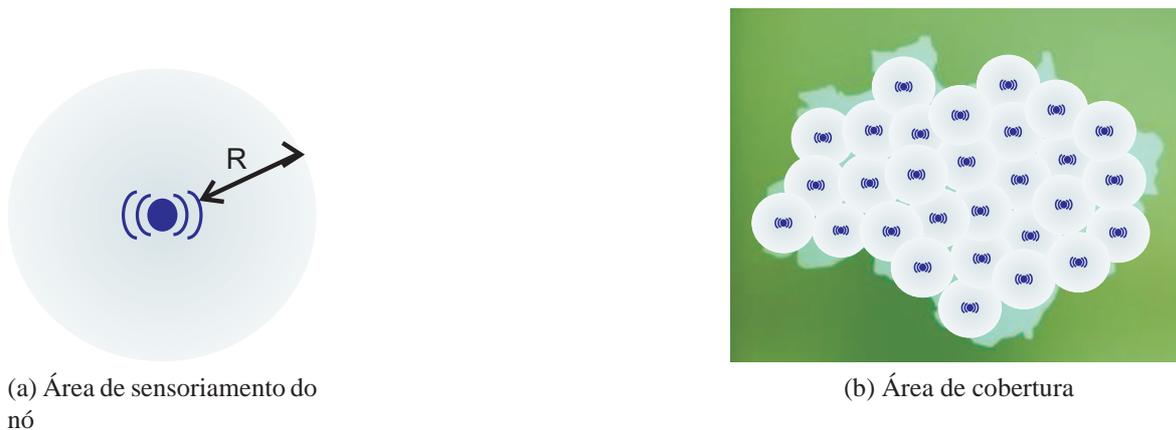


Figura 2.3: Cobertura em Redes de Sensores sem Fio.

em teoria quanto menor está distância mais rápido um evento será detectado.

Para efeitos de modelagem e para simplificar os cálculos da área de cobertura em uma RSSF, considera-se a área de monitoramento como um conjunto de pontos, neste trabalho denominados pontos de demanda, e verifica-se para cada um desses pontos se existe um ou mais nós sensores que o cobrem. A área de cobertura é calculada verificando-se a porcentagem de pontos de demanda cobertos por pelo menos um nó sensor. Por sua vez, a falha na cobertura representa a porcentagem da área de monitoramento que não encontra-se coberta por nenhum nó sensor e é calculada dividindo-se o número de pontos não alcançados por nenhum nó sensor pelo número total de pontos na área. Na prática quanto maior o número de pontos de demanda mais próximo se está da área contínua.

A discretização da área de monitoramento - número de pontos de demanda por unidade de área - é definida baseada nos requisitos da aplicação, parâmetros dos nós, características da própria área e características do fenômeno. Por exemplo em uma aplicação de agricultura de precisão pode ser necessário medir as condições de temperatura, umidade e luz a cada metro na área de plantio e neste caso pode-se determinar que se tenha um ponto de demanda a cada m^2 .

2.2.2 Conectividade em Redes de Sensores sem Fio

Garantir cobertura significa posicionar os nós sensores na área de modo que todos os pontos de demanda estejam cobertos por pelo menos q nós. Porém se os dados coletados não puderem chegar ao observador a aplicação da rede pode ser inviabilizada, por isso torna-se importante em uma rede de sensores garantir também a conectividade entre nós, que neste trabalho é definida como garantir que para cada nó sensor ativo na rede existe um caminho até o sorvedouro. Em outras palavras estabelecer a conectividade significa criar uma

infra-estrutura que permita a disseminação dos dados dos nós fontes ao nó sorvedouro.

O fator primordial para garantir a conectividade da rede é considerar o raio de comunicação máximo de cada nó sensor e baseado neste valor definir qual o número mínimo de nós sensores devem estar ativos e quais são esses nós para que os dados coletados cheguem ao observador. O problema de conectividade pode ser relaxado para casos em que o raio de comunicação é pelo menos duas vezes maior que o raio de sensoriamento e onde tem-se a garantia de cobertura total da área(Wang et al. [2003]).

A seguir são definidos alguns problemas de controle de densidade em RSSFs, cuja formalização é contribuição deste trabalho.

2.2.3 Problema de Controle de Densidade e Cobertura em Redes de Sensores sem Fio Planas

Dada uma área de monitoramento A , um conjunto de nós sensores S e um conjunto de pontos de demanda D , o Problema de Controle de Densidade e Cobertura em Redes de Sensores sem Fio (PCDC-RSSF) Planas consiste em garantir para cada ponto de demanda $j \in D$ na área A que pelo menos q nós sensores $l \in S$ o cubram.

Neste trabalho considera-se que se um nó sensor está ativo ele está executando operações de sensoriamento, comunicação e processamento.

2.2.4 Problema de Controle de Densidade, Cobertura e Conectividade em Redes de Sensores sem Fio Planas

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 Cobertura e Conectividade Redes de Sensores sem Fio (PCDCC-RSSF) Planas deve garantir para cada ponto de demanda $j \in D$ na área A que pelo menos q nós sensores $l \in S$ o cubram e que exista uma rota entre cada nó sensor ativo $l \in S$ e um nó sorvedouro $m \in M$.

Uma rota entre um nó sensor e um sorvedouro ativos é um conjunto arcos que conectem o nó ao sorvedouro e que possuam apenas nós ativos como vértices.

2.2.5 Problema de Controle de Densidade, Cobertura e Conectividade em Redes de Sensores sem Fio Hierárquicas

Dada uma área de monitoramento A , um conjunto de nós sensores S , um conjunto de sorvedouros M e um conjunto de pontos de demanda D , o Problema de Controle de Densidade,

Cobertura e Conectividade em Redes de Sensores sem Fio (PECC-RSSF) Hierárquicas deve garantir para cada ponto de demanda $j \in D$ na área A que pelo menos q nós sensores $l \in S$ o cubram, que cada nó ativo pertença a um grupo e que cada grupo tenha um líder. Deve ainda ser garantida ainda uma rota entre cada líder até um nó sorvedouro $m \in M$.

2.2.6 Conectividade em Redes de Sensores sem Fio

O problema de conectividade em redes de sensores sem fio (PR-RSSF) consiste em encontrar o melhor ou os melhores caminhos entre nós fontes e o(s) nó(s) sorvedouro(s). O melhor caminho é definido com base em métricas como taxa de entrega, latência e consumo de energia da rede.

O foco deste trabalho é o PCDC-RSSF Problema de Controle de Densidade, Cobertura e Conectividade em Redes de Sensores sem Fio Planas, que a partir deste ponto passa a ser identificado apenas como Problema de Controle de Densidade (PCD). Como citado anteriormente, o problema como definido acima é o problema estático, que será estendido para sua forma dinâmica e tratado com duas abordagens diferentes.

2.3 Trabalhos relacionados

Os problemas de Controle de Densidade em RSSFs podem lidar, individualmente ou em conjunto, com problemas de cobertura, conectividade e roteamento. O problema de cobertura está relacionado à determinação da qualidade do monitoramento na área, quanto maior o número de dados sobre um determinado fenômeno melhor a qualidade da informação sobre ele uma vez que, utilizando-se métodos de fusão de dados adequados, uma maior quantidade de dados permite a eliminação de dados discrepantes e uma maior precisão da informação gerada. Os problemas de conectividade e roteamento estão relacionados à garantia de pelo menos uma via de comunicação entre nós e o(s) sorvedouros e ao fluxo de dados na rede.

O problema de cobertura é definido por Huang & Tseng [2003] como uma determinação de quão bem monitorada está a área. Neste trabalho o problema foi formulado como um problema de decisão, cujo objetivo é determinar se cada ponto na área de monitoramento está coberto por pelo menos k nós sensores, porém a conectividade não é um ponto de estudo. Sua similaridade com o trabalho proposto esta na possibilidade de cada ponto de demanda da área de monitoramento pode estar coberto por mais de um nó sensor. O parâmetro k é similar ao parâmetro q proposto nos problemas definidos na seção anterior.

Meguerdichian et al. [2001] desenvolvem algoritmos baseados em análise geométrica e grafos para abordar o mesmo problema de cobertura. Vieira et al. [2003] propõem um mecanismo de controle de densidade da rede baseado em um critério que decide que nós

devem ser ligados e desligados. A solução é baseada no diagrama de Voronoi que decompõe o espaço em regiões em volta de cada nó, para determinar que nó deve ligar ou desligar. Esses trabalhos propõem soluções com foco na geometria, mas que foi descartada para este trabalho por não se adequar a proposta de se modelar os problemas com programação linear.

Megerian & Potkonjak [2003] propõem diversos modelos de Programação Linear Inteira (PLI) para resolver o problema de cobertura em RSSFs. Chakrabarty et al. [2002] apresentam um modelo de programação linear inteira que minimiza o custo de posicionar nós sensores heterogêneos na área de monitoramento de modo a garantir a sua cobertura. O problema apresentado possui duas abordagens: o posicionamento a custo mínimo e o posicionamento para localização e detecção de alvos na área. Em ambas abordagens o problema é definir a localização dos nós sensores em uma grade garantindo os requisitos de cobertura. Esta abordagem é bastante similar ao modelo matemático da abordagem periódica apresentado neste trabalho, porém não trabalha com a otimização da energia consumida da rede. Esses trabalhos têm diversas similaridades à aqui proposta, porém lida apenas com o problema de forma estática, ou seja, propõem uma solução para uma determinada configuração da rede em um determinado estado de tempo. Além disso não há uma definição formal de como utilizá-las em diversos períodos de tempo como proposto pela abordagem periódica aqui apresentada, uma vez que para isso têm que ser levados em consideração fatores como periodicidade para geração da nova solução, atualização de dados sobre nós disponíveis e energia residual, tratamento de falhas, entre outros fatores.

Um trabalho preliminar a esta tese é o desenvolvido por Quintao et al. [2004] e que trata a cobertura e aspectos de conectividade para as RSSFs utilizando algoritmos genéticos e algoritmos em grafos. O problema abordado é o problema estático definido na Seção 1.2.1 e cujas soluções e resultados serviram de base para o desenvolvimento da abordagem periódica. Siqueira et al. [2004] desenvolveram um serviço de gerenciamento, de abordagem centralizada, para controlar a densidade de uma RSSF, utilizando funções de gerenciamento que tem como referência três modelos de mapas: Mapa de Topologia, Mapa de Cobertura e Mapa de Energia. 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.

A definição da relação entre cobertura e conectividade é apresentada por Wang et al. [2003] e consiste de uma análise geométrica das áreas cobertas e do estudo da relação entre os raios de sensoriamento e comunicação. Eles garantem que a garantia de cobertura

permite a conectividade quando o raio de sensoriamento é menor que a metade do raio de comunicação. Este resultado permite que o problema de conectividade seja desconsiderado em alguns trabalhos, como o desenvolvido por Quintao et al. [2005] e que compara 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.

Heinzelman et al. [2002] tratam a cobertura e aspectos de conectividade para as RS-SFs. O primeiro utiliza algoritmos genéticos e teorias de grafos e o segundo utiliza *Simulated Annealing*. Todos os trabalhos citados abordam os problemas de forma estática, ou seja, dada uma configuração da rede qual a melhor solução naquele instante.

Xu et al. [2003] apresentam um protocolo de controle de topologia para redes de sensores planas e densas que visam prolongar o tempo de vida da rede, mantendo a conectividade entre os nós. A abordagem deste trabalho é reconhecer nós redundantes e desligar seus rádios. Este protocolo é denominado GAF (Geographic Adaptive Fidelity), e identifica os nós redundantes através da avaliação de dois dados: localização física do nó e estimativa do alcance de rádio. O protocolo assume que todos os nós conhecem sua localização e utiliza um modelo de rádio idealizado. Este é um mecanismo simples e eficiente que o transforma em uma boa opção para redes de sensores, porém sua utilização é restrita a redes planas e cujos nós têm o mesmo raio de sensoriamento.

Cerpa & Estrin [2002] propõe o protocolo distribuído ASCENT (*Adaptive Self-Configuring sEnsor Network Topologies*), que usa a redundância dos nós sensores para estender a vida da rede. Cada nó, baseado em informações a respeito da conectividade - obtida através da troca de mensagens com seus vizinhos -, decide se pertencerá a rede ou será desligado. Sua desvantagem é não trata o problema de cobertura. Uma possível extensão desse trabalho seria analisar a relação entre os raios de sensoriamento e comunicação e estabelecer em que condições ele garante a cobertura da rede. Uma de suas vantagens é o fato de ser distribuído.

Ye et al. [2003] apresentam o algoritmo PEAS (*Probing Environment and Adaptive Sleeping*). PEAS consiste de dois algoritmos, que determinam (1) quais nós sensores devem funcionar e como nós sensores que acabaram de acordar decidem se devem voltar a "dormir" ou não e (2) como o tempo médio de "sono" de cada nó sensor pode ser ajustado dinamicamente. Com estas duas características, o algoritmo garante um crescimento linear no tempo de vida da rede em função do número de nós sensores dispostos. Entretanto, o algoritmo não garante a cobertura da área de sensoriamento.

Zhang & Hou [2005] apresentam o algoritmo OGDC (*Optimal Geographical Density Control*). Segundo os autores, o algoritmo é totalmente descentralizado e localizado. 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 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.

Siqueira et al. [2006] desenvolveram um controle de densidade integrado que resolve os problemas de cobertura e roteamento ao mesmo tempo, visando garantir a operação das RSSFs de maneira correta e eficiente. São propostas duas soluções, RDC-Sync e RDC-Integrated, compostas do algoritmo OGDC e de um algoritmo em árvore denominado EF-TREE proposto por Seródio et al. [2004]. A diferença entre as duas abordagens se dá na maneira como as duas soluções são integradas.

2.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os fundamentos em Redes de Sensores sem Fio mais importantes ou que têm maior impacto no problema de controle de densidade. Nos capítulos seguintes são apresentadas as abordagens utilizadas para se tratar e resolver o problema. Os capítulos incluem a definição do problema sob a luz da abordagem proposta, a modelagem do problema, as soluções propostas e os resultados obtidos. Quando necessário novos conceitos são introduzidos e definidos.

Capítulo 3

Abordagem Multiperíodo

Este capítulo propõe um tratamento multiperíodo para o Problema de Controle de Densidade em Redes de Sensores sem Fio (PDC-RSSF), que 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 para o tempo total de vida da rede. 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. O uso do termo multiperíodo é devido ao fato dele resolver, ao mesmo tempo, o problema de controle de densidade para diversos períodos.

Espera-se que a abordagem multiperíodo forneça limites inferiores para soluções geradas por outras abordagens, uma vez que ela pode determinar qual a melhor solução de configuração da rede em cada período. Os limites inferiores são garantidos quando o número e a duração dos períodos do modelo multiperíodo são os mesmos, pois a abordagem multiperíodo resolve o problema com uma visão global da rede e dos períodos e ainda considera entre seus parâmetros a capacidade da bateria de todos os nós sensores. Além disso, eventos que ocorrem em simulações, como falhas de nós e características de fenômenos, pode ser incluídos como parâmetros de entrada do modelo. Por exemplo, se durante uma simulação um nó l sofre uma falha mecânica no instante t_1 , inclui-se no modelo que o nó l está indisponível em todos os períodos posteriores a t_1 . Inclusive os instantes em que ocorrem falhas mecânicas podem ser utilizados como marcos para a divisão dos períodos.

Em termos práticos a abordagem multiperíodo por ser considerada pouco abrangente, uma vez que grande parte das aplicações em redes de sensores requerem soluções que levem em conta a dinamicidade destas redes, o que não acontece com a sua solução porque ela é gerada para uma quantidade de períodos fixos e com duração determinada, ou seja, para que

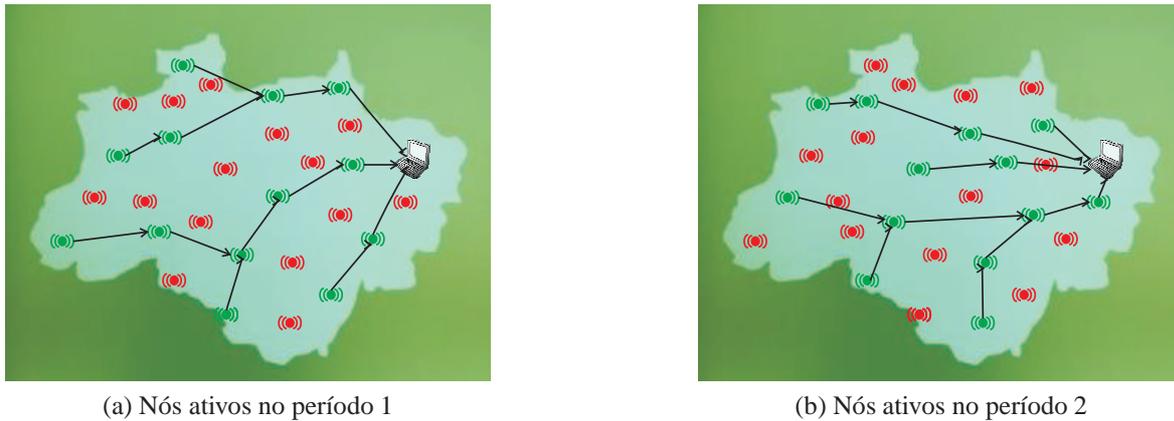


Figura 3.1: Problema de Controle de Densidade Multiperíodo em Redes de Sensores sem Fio.

ela seja utilizada como o previsto considera-se que não ocorrerá nenhum problema na rede que torna a solução inviável. Porém sua utilização não é descartada em redes de sensores instaladas em ambientes controlados e que apresentem comportamento estáveis, ou seja, redes em que os nós não estejam sujeitos à falhas ou possam ser substituídos em caso de falha.

Este tratamento multiperíodo para o PCD foi inicialmente proposto em [Nakamura et al., 2004], [Nakamura et al., 2005c]. Resultados preliminares e complementares deste capítulo são encontrados em [Menezes et al., 2004a], [Menezes et al., 2004b], [Menezes et al., 2005], [Quintão et al., 2005a], [Quintão et al., 2005b], [Andrade et al., 2008], [Andrade & Nakamura, 2009] e [Andrade et al., 2009]. Posteriormente novas abordagens multiperíodo para redes de sensores foram apresentadas por outros grupos e entre estes tem-se [Aquiari, 2007], [Türkogullari et al., 2010], [Türkogullari, 2007].

3.1 Definição do Problema

De maneira formal o problema a ser tratado é 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 e um conjunto de períodos de tempo T , o Problema de Controle de Densidade Multiperíodo em Redes de Sensores sem Fio (PCDM-RSSF) consiste em garantir, se possível, para cada ponto de demanda $j \in D$ na área A que pelo menos q nós sensores $l \in S$ o cubram e que exista uma rota entre cada nó sensor ativo $l \in S$ e um nó sorvedouro $m \in M$ em cada período $t \in T$ e durante toda a sua duração, respeitando-se os limites de energia dos nós sensores.* O PCDM-RSSF Multiperíodo é ilustrado na Figura 3.1.

3.2 Formulação matemática

O primeiro passo da abordagem foi modelar o PCDM-RSSF como um problema 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.

T conjunto de períodos de tempo.

B_{lj} matriz de Cobertura, 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.

EB_l capacidade da bateria do nó l , que representa a quantidade de energia armazenada na bateria.

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}^t variável que indica se o nó l está cobrindo o ponto de demanda j no período de tempo t

z_{lki}^t variável de decisão que possui valor 1 se o arco ki faz parte da rota entre o nó l e um nó sorvedouro no período de tempo t , e 0 caso contrário

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

y_l^t variável de decisão que possui valor 1 se o nó l está ativo no período de tempo t , e 0 caso contrário

O modelo é apresentado a seguir. A função objetivo minimiza a energia consumida pela rede durante seu tempo de vida esperado.

Função Objetivo

$$\begin{aligned}
Z = \min \sum_{l \in S} \sum_{t \in T} (EM_l^t \times y_l^t & \\
& + EA_l \times w_l^t \\
& + \sum_{k \in (S-l)} \sum_{il \in E^l(A^s)} ER_l^t \times z_{kil}^t & \\
& + \sum_{k \in S} \sum_{li \in S^l(A^s \cup A^m)} ET_{li}^t \times z_{kli}^t) & \quad (3.1)
\end{aligned}$$

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

As restrições (3.2), (3.3), e (3.4) lidam com o problema da cobertura. As restrições (3.2) garantem que cada ponto de demanda seja coberto por pelo menos q nós sensores. As restrições (3.3) definem que para um nó poder realizar o sensoriamento ele deve estar ativo. As restrições (3.4) limitam as variáveis x . A rigor as variáveis são binárias, mas em virtude da característica unimodular da sua matriz de coeficientes esta restrição pode ser relaxada e o problema pode ser resolvido com x real e variando entre 0 e 1 conforme definido nas restrições 3.4.

$$\sum_{l \in S} B_{lj} \times x_{lj}^t \geq q, \forall j \in D \text{ e } \forall t \in T \quad (3.2)$$

$$B_{lj} \times x_{lj}^t \leq y_l^t, \forall l \in S, \forall j \in D \text{ e } \forall t \in T \quad (3.3)$$

$$0 \leq B_{lj} \times x_{lj}^t \leq 1, \forall l \in S, \forall j \in D \text{ e } \forall t \in T \quad (3.4)$$

As restrições (3.5), (3.6), (3.7) e (3.8) referem-se ao problema de conectividade e garantem que para cada nó ativo para sensoriamento deve existir uma rota até um nó sorvedouro (restrições (3.5) e (3.6)). A conexão entre dois nós sensores só pode existir se ambos estão ativos conforme descrito nas restrições ((3.7), (3.8)).

$$\sum_{ip \in E^p(A^s)} z_{lip}^t - \sum_{pk \in S^p(A^s \cup A^m)} z_{lpk}^t = 0, \forall p \in (S - l), \forall l \in S \text{ e } \forall t \in T \quad (3.5)$$

$$- \sum_{pk \in S^p(A^s \cup A^m)} z_{lpk}^t = -y_l^t, p = l, \forall l \in S \text{ e } \forall t \in T \quad (3.6)$$

$$z_{lip}^t \leq y_i^t, \forall i \in S, \forall l \in (S - p), \forall ip \in (A^s \cup A^m) \text{ e } \forall t \in T \quad (3.7)$$

$$z_{lip}^t \leq y_p^t, \forall p \in S, \forall l \in (S - p), \forall ip \in A^s \text{ e } \forall t \in T \quad (3.8)$$

As restrições de energia (3.9) indicam que a energia consumida por um nó l com operações de ativação, cobertura, processamento e comunicação é limitada pela capacidade de sua bateria.

$$\begin{aligned} & \sum_{l \in S} \sum_{t \in T} (EM_l^t \times y_l^t \\ & + EA_l \times w_l^t \\ & + \sum_{k \in (S-l)} \sum_{il \in E^l(A^s)} ER_l^t \times z_{kil}^t \\ & + \sum_{k \in S} \sum_{li \in S^l(A^s \cup A^m)} ET_{li}^t \times z_{kli}^t) \leq EB_l, \forall l \in S \end{aligned} \quad (3.9)$$

As restrições de ativação (3.10) e (3.11) indicam a relação entre as variáveis w , as variáveis y , o período no qual o nó foi ativado, e se o nó está ou não ativo no período t . A variável w foi incluída no modelo para contabilizar o custo de ativação EA de um de nó sensor. Estas restrições descrevem a seguinte situação, se um nó l está ativo no período de tempo t e não estava ativo no período $t - 1$ tem-se $w_l^t = 1$ e o custo EA_l é contabilizado na função objetivo e na restrição (3.9). O modelo permite que um nó seja ativado, desativado e

novamente ativado.

$$w_l^1 - y_l^1 \geq 0, \forall l \in S \quad (3.10)$$

$$w_l^t - y_l^t + y_l^{t-1} \geq 0, \forall l \in S, \forall t \in T \text{ e } t \geq 2 \quad (3.11)$$

As restrições (3.12) indicam o número mínimo de nós que devem estar ativos em cada período t . Esta restrição foi incluída por dois motivos: melhorar a cobertura e os limites gerados pela Relaxação Lagrangeana. O número mínimo de nós é calculado em função das dimensões da área de monitoramento e do alcance do raio de sensoriamento, como será mostrado na subseção 3.2.1.

$$\sum_{l \in S} y_l^t \geq n, \forall t \in T \quad (3.12)$$

A restrição (3.13) define as variáveis de decisão y, z, w como binárias e a restrição (3.14) x como real.

$$y, z, w \in \{0, 1\} \quad (3.13)$$

$$x \in \mathbb{R} \quad (3.14)$$

A solução do modelo descrito por (3.1) a (3.14) indica, para cada período, quais nós devem estar ativos para cobrir os pontos de demanda, representada nas variáveis y, x e w e caracterizando o problema de cobertura. Além disso ela indica para cada nó ativo uma rota até o sorvedouro, representada nas variáveis z , o que permite que os dados gerados por estes nós cheguem ao observador e caracterizando o problema de conectividade.

Esta modelagem matemática, por ser bastante abrangente pois aborda ao mesmo tempo os problemas de cobertura, conectividade, restrição de energia em diversos períodos, pode não apresentar solução viável, ou seja, para determinados conjunto de nós sensores, parâmetros de energia e tempo de vida esperado da rede, pode não haver um subconjunto de nós que garanta a cobertura total da rede e a conectividade entre os nós em todos os períodos de tempo.

Uma formulação alternativa para o PCDM-RSSF e que o torna mais flexível é obtida possibilitando-se falhas na cobertura. Na nova formulação é incluído o item EH_j ou custo de energia pela não cobertura de um ponto de demanda j , que representa uma penalidade imposta aos pontos não cobertos. A variável h_j^t é adicionada ao modelo e indica a não cobertura de ponto de demanda j no período de tempo t . As modificações são feitas na função

objetivo e nas restrições (3.2). Ao se penalizar a não cobertura dos pontos de demanda, ou seja, as falhas de cobertura está se priorizando a qualidade da cobertura em detrimento do consumo de energia. Porém, como a função objetivo minimiza a energia consumida total a solução terá a melhor cobertura possível em cada período com o menor consumo de energia total da rede.

A função objetivo da nova modelagem minimiza a energia consumida pelos nós e o número de pontos de demanda não cobertos, com a penalidade de não cobertura representada no último termo da função (3.15).

$$\begin{aligned}
Z = & \min \sum_{l \in S} \sum_{t \in T} (EM_l^t \times y_l^t \\
& + EA_l \times w_l^t \\
& + \sum_{k \in (S-l)} \sum_{il \in E^l(A^s)} ER_l^t \times z_{kil}^t \\
& + \sum_{k \in S} \sum_{li \in S^l(A^s \cup A^m)} ET_{li}^t \times z_{kli}^t) \\
& + \sum_{j \in D} \sum_{t \in T} EH_j \times h_j^t
\end{aligned} \tag{3.15}$$

Nesta nova proposta as restrições (3.2) sofrem uma modificação e com a inclusão da variável h_j^t , possibilitando a não cobertura do ponto de demanda. A variável h_j^t referente ao ponto j no período t terá, no pior caso, valor igual a q , o que significa que nenhum nó cobre o ponto. No caso em que pelo menos um nó sensor cobre o ponto j no período t tem-se $h_j^t = q - \sum_{l \in S} B_{lj} \times x_{lj}^t$. As restrições (3.17) garantem a não-negatividade das variáveis h .

$$\sum_{l \in S} B_{lj} \times x_{lj}^t + h_j^t \geq q, \forall j \in D \text{ e } \forall t \in T \tag{3.16}$$

$$h_j^t \geq 0, \forall j \in D \text{ e } \forall t \in T \tag{3.17}$$

3.2.1 Número Mínimo de Nós Ativos

O cálculo do número mínimo de nós ativos por período é incluído no modelo como uma tentativa de melhorar a área de cobertura obtida pelos nós ativos e os limites gerados pela Relaxação Lagrangeana. Com o foco era cobertura não foi utilizada nenhuma estimativa com o raio de comunicação dos nós, por isso, dependendo da relação entre os dois raios, outros nós tenham que ser ativados para garantir a conectividade. Neste trabalho o número n mínimo de nós ativos é calculado pela Equação 3.18.

$$n = \frac{A}{\pi R_s^2} \quad (3.18)$$

onde A é a dimensão da área de monitoramento e R_s é o raio de sensoriamento.

Um detalhe sobre esta restrição é que dependendo do número de nós disponíveis na área e da capacidade de bateria destes nós pode ser que o problema não tenha solução viável, uma vez que estes fatores podem impedir a ativação de n em cada período. Se isso ocorrer uma solução é usar um valor menor para n do que o calculado.

3.2.2 Solução do Modelo Matemático

Por se tratar de um problema complexo de otimização combinatória a obtenção da solução ótima do PCDM-RSSF para ambas as formulações torna-se computacionalmente inviável quando as instâncias crescem em dimensão. O PCD-RSSF proposto nesta tese, seja multiperíodo seja periódico, é composto de um problema de Cobertura de Conjuntos, que corresponde a parcela de cobertura, Caminho Mínimo, que corresponde a parcela de conectividade acrescidos das restrições de ativação e energia. Em termos de complexidade o problema é NP-Difícil porque o problema de Cobertura de Conjuntos é NP-Difícil e o de Caminho Mínimo tem complexidade $O(n)$ para um grafo com n nós. A demonstração deste fato pode ser encontrada em Karp [1972].

Neste caso o desenvolvimento de algoritmos que gerem boas soluções e que sejam computacionalmente eficientes são a alternativa para se tratar o problema. Para se obter uma solução viável ou limite superior para o problema alvo pode-se utilizar heurísticas específicas ou meta-heurísticas como algoritmos genéticos, *simulated annealing* e GRASP, que podem ainda ser combinadas em algoritmos híbridos.

Uma maneira de se avaliar a qualidade da solução gerada pelas heurísticas é, para instâncias pequenas, compará-la com a solução ótima, obtida com algoritmos exatos. Porém, como a obtenção da solução ótima para instâncias grandes torna-se inviável, o uso de técnicas para obtenção de limites inferiores pode ser bastante útil porque, ainda que estes limites possam não representar o valor ótimo, eles permitem que se avalie a qualidade das soluções viáveis obtidas.

A Relaxação Linear e a Relaxação Lagrangeana são técnicas frequentemente utilizadas na obtenção de limites inferiores para problemas de PLI. No primeiro caso, relaxa-se as restrições de integralidade das variáveis tornando o problema de Programação Linear Inteira (PLI) ou Programação Linear Inteira Mista (PLIM) em um problema linear puro, problema que só possui variáveis contínuas, que pode ser resolvido por métodos como o Simplex ou Pontos Interiores. A solução deste problema linear é um limite inferior para o problema

original. Na técnica de Relaxação Lagrangeana, relaxam-se as restrições consideradas "difíceis" do problema incluindo-as na função objetivo com o uso de multiplicadores, o que torna o problema menos complexo de ser resolvido[Fisher, 1981]. Como na Relaxação Linear, a Relaxação Lagrangeana fornece um limite inferior para o problema original. Mais detalhes sobre esta técnica são encontrados na seção seguinte.

De posse de limites inferiores e superiores, pode-se utilizar uma métrica para avaliar a qualidade da solução viável. A métrica de avaliação ou GAP mede a distância relativa entre o limite superior e o limite inferior e é calculada pela Equação 3.19.

$$GAP = 100 \times \frac{LS - LI}{LS} \quad (3.19)$$

onde LS é o valor do limite superior ou solução viável para o problema e LI é o valor do limite inferior do problema gerado por exemplo pela Relaxação Lagrangeana para problemas de minimização. No caso de problemas de maximização o limite superior é o gerado pela relaxação e o limite inferior é uma solução viável do problema.

Quando $LS = LI$ chegou-se a solução ótima do problema e $GAP = 0$. Os valores positivos do GAP indicam que o limite superior está no máximo a $GAP\%$ da solução ótima. Técnicas para obtenção de limites inferiores e superiores são bastante interessantes porque além de fornecerem uma solução viável para o problema (limite superior) permitem que a qualidade destes limites seja avaliada.

Kawatra & Bricker [2000] apresentam um modelo dinâmico de programação inteira para o problema multiperíodo de árvore geradora mínima capacitada. Este problema consiste no escalonamento das conexões entre nós terminais e um nó central minimizando os custos de instalação e garantindo que a capacidade das conexões não será excedida. O problema é resolvido através de uma heurística e também é apresentado seu limite inferior utilizando Relaxação Lagrangeana, o que permite a avaliação da heurística proposta.

O problema dinâmico de localização de facilidades com multiprodutos é formulado por Hinojosa et al. [2000] como um modelo de PLIM. Esse trabalho busca minimizar os custos totais para atendimento da demanda dos produtos especificados no horizonte de tempo planejado e ainda satisfazer as capacidades dos produtores e dos depósitos intermediários. O limite inferior do problema é determinado através de Relaxação Lagrangeana e uma heurística que determina soluções viáveis a partir das soluções do problema relaxado também é apresentada. .

3.3 Modelo Multiperíodo Relaxado

3.3.1 Relaxação Lagrangeana

Como citado anteriormente a Relaxação Lagrangeana é umas das técnicas mais utilizadas na obtenção de limites inferiores para problemas combinatórios. Na Relaxação Lagrangeana avalia-se o conjunto de restrições do problema e, deste conjunto, uma ou mais restrições são relaxadas, o que significa que elas são retiradas do conjunto de restrições do problema e incluídas na função objetivo do problema multiplicadas por fatores denominados de Multiplicadores de Lagrange. A função dos multiplicadores é penalizar as soluções que forem violadas pela relaxação. Nesta forma o problema passa a ser chamado de Problema Lagrangeano.

As restrições relaxadas devem ser aquelas que quando retiradas tornam o problema original "fácil" de ser resolvido. Tipicamente, as restrições retiradas permitem que o problema original seja dividido em subproblemas para os quais é possível obter a solução ótima. É importante ressaltar que a Relaxação Lagrangeana fornece um limite inferior para o problema original desde que a solução do problema relaxado seja a solução ótima para um determinado conjunto de Multiplicadores de Lagrange. Valores de Multiplicadores de Lagrange diferentes levam a limites inferiores diferentes e por isso a Relaxação Lagrangeana é combinada com técnicas para geração de multiplicadores que levem a valores de limites inferiores melhores, ou seja, maiores.

O problema de encontrar os Multiplicadores de Lagrange que maximizem o limite inferior é chamado de Lagrangeano Dual e neste trabalho é resolvido pelo método do subgradiente definido sucintamente na Seção 3.3.4.

3.3.2 Problema Lagrangeano

O modelo multiperíodo escolhido para ser relaxado é o modelo que permite a falha na cobertura por ser mais flexível. Entre as relaxações testadas, optou-se por relaxar as restrições (3.3), (3.7), (3.8) e (3.9). Associando-se Multiplicadores de Lagrange $\alpha_{ljt} \geq 0, \forall l \in S, \forall j \in D, \forall t \in T, \gamma_{likt} \geq 0, \forall l \in (S - k), \forall ik \in (A^s \cup A^m)$ e $\forall t \in T, \delta_{likt} \geq 0, \forall l \in (S - k), \forall ik \in A^s$ e $\forall t \in T, \beta_l \geq 0, \forall l \in S$, às restrições relaxadas, tem-se o seguinte Problema Lagrangeano:

$$Z_{RL}(\alpha, \beta) = \sum_{l \in S} \sum_{t \in T} (EM_l^t y_l^t + EA_l w_l^t + \sum_{k \in (S-l)} \sum_{il \in E^l(A^s)} ER_l^t z_{kil}^t +$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{k \in S} \sum_{li \in S^l(A^s \cup A^m)} ET_{li}^t z_{kli}^t + \\
& \sum_{j \in D} \sum_{t \in T} EH_j^t h_j^t + \\
& \sum_{l \in S} \sum_{j \in D} \sum_{t \in T} \alpha_{ljt} (B_{lj} x_{lj}^t - y_l^t) + \\
& \sum_{l \in S} \sum_{ik \in (A^s \cup A^m)} \sum_{t \in T} \gamma_{likt} (z_{lik}^t - y_l^t) + \\
& \sum_{l \in S} \sum_{ik \in A^s} \sum_{t \in T} \delta_{likt} (z_{lik}^t - y_k^t) + \\
& \sum_{l \in S} \beta_l \left[\sum_{t \in T} (EM_l^t y_l^t + EA_l w_l^t + \sum_{k \in (S-l)} \sum_{il \in E^l(A^s)} ER_l^t z_{kil}^t + \right. \\
& \left. \sum_{k \in S} \sum_{li \in S^l(A^s \cup A^m)} ET_{li}^t z_{kli}^t) - EB_l \right] \tag{3.20}
\end{aligned}$$

sujeito a (3.4) a (3.6), (3.10) a (3.13), (3.16) e (3.17) .

Rearranjando o Lagrangeano incluindo os índices das variáveis e multiplicadores tem-se,

$$\begin{aligned}
Z_{RL}(\alpha, \beta) &= \sum_{l \in S} \sum_{t \in T} [(1 + \beta_l) EM_l^t y_l^t + (1 + \beta_l) EA_l w_l^t \\
&+ (1 + \beta_l) \sum_{k \in S} \sum_{li \in S^l(A^s \cup A^m)} ET_{li}^t z_{kli}^t \\
&+ (1 + \beta_l) \sum_{k \in (S-l)} \sum_{il \in E^l(A^s)} ER_l^t z_{kil}^t \\
&+ \sum_{i \in S} \sum_{k \in (SUM)} \gamma_{iklt} z_{kli}^t \\
&+ \sum_{i \in S} \sum_{k \in S} \delta_{iklt} z_{kil}^t \\
&- \sum_{j \in D} \alpha_{ljt} y_l^t \\
&- \sum_{i \in S} \sum_{k \in (SUM)} \gamma_{iklt} y_l^t \\
&- \sum_{i \in S} \sum_{k \in S} \delta_{iklt} y_l^t] \\
&+ \sum_{j \in D} \sum_{t \in T} (EH_j^t h_j^t + \sum_{l \in S} \alpha_{ljt} B_{lj} x_{lj}^t) \\
&- \sum_{l \in S} \beta_l EB_l \tag{3.21}
\end{aligned}$$

$Z_{RL}(\alpha, \beta)$ é o custo de manutenção de cada nó sensor l no período t , mais o custo de ativação, mais o custo de receber e transmitir, menos o custo de ativação associado aos multiplicadores de Lagrange, mais a penalidade de não cobertura e os custos de cobertura e menos as constantes.

Seja

$cm_l = (1 + \beta_l)EM_l^t$ o custo de manutenção do nó sensor $l \in S$.

$ca_l = (1 + \beta_l)EA_l$ o custo de ativação do nó sensor $l \in S$.

cr_l^t o custo transmissão do nó $l \in S$ ao seu pai mais os custos de recepção e transmissão de todos os nós que pertencem à rota do nó sensor $l \in S$ ao sorvedouro $i \in M$ mais próximo, no período $t \in T$.

cr_l^t é o custo do caminho mínimo de l a um nó sorvedouro considerando a transmissão para um nó vizinho, a recepção e transmissão em cada nó intermediário. Cada nó l da rede é desdobrado em dois nós l e l' e custo do arco (l, l') é o custo de recepção do nó l . O caminho do nó l inicia-se no nó l' . Os custos de transmissão e recepção são multiplicados por $(1 + \beta_l)$, onde l é o nó que é desdobrado, conforme indicado na função (3.21). O arco conectando dois nós, além da energia de transmissão, possui os custos dos multiplicadores γ e δ conforme definido na função (3.21). Para cada nó l é montado o grafo de caminho mínimo considerando os multiplicadores γ_{lkit} e δ_{lkit} . A Figura 3.2 mostra os grafos para cálculo de caminho mínimo para os nós 1 (3.2(a)) e 2 (3.2(b)).

O Lagrangeano pode então ser reescrito como:

$$\begin{aligned}
Z_{RL}(\alpha, \beta) &= \sum_{l \in S} \sum_{t \in T} (cm_l y_l^t + ca_l w_l^t + cr_l^t y_l^t - \sum_{j \in D} \alpha_{ljt} y_l^t - \sum_{i \in S} \sum_{k \in (SUM)} \gamma_{ikl} y_l^t - \sum_{i \in S} \sum_{k \in S} \delta_{ikl} y_l^t) \\
&+ \sum_{j \in D} \sum_{t \in T} (EH_j^t h_j^t + \sum_{l \in S} \alpha_{ljt} B_{lj} x_{lj}^t) \\
&- \sum_{l \in S} \beta_l EB_l
\end{aligned} \tag{3.22}$$

sujeito a

$$\sum_{l \in S} B_{lj} x_{lj}^t + h_j^t \geq q, \forall j \in D \text{ e } \forall t \in T \tag{3.23}$$

$$0 \leq B_{lj} x_{lj}^t \leq 1, \forall l \in S, \forall j \in D, \text{ e } \forall t \in T \tag{3.24}$$

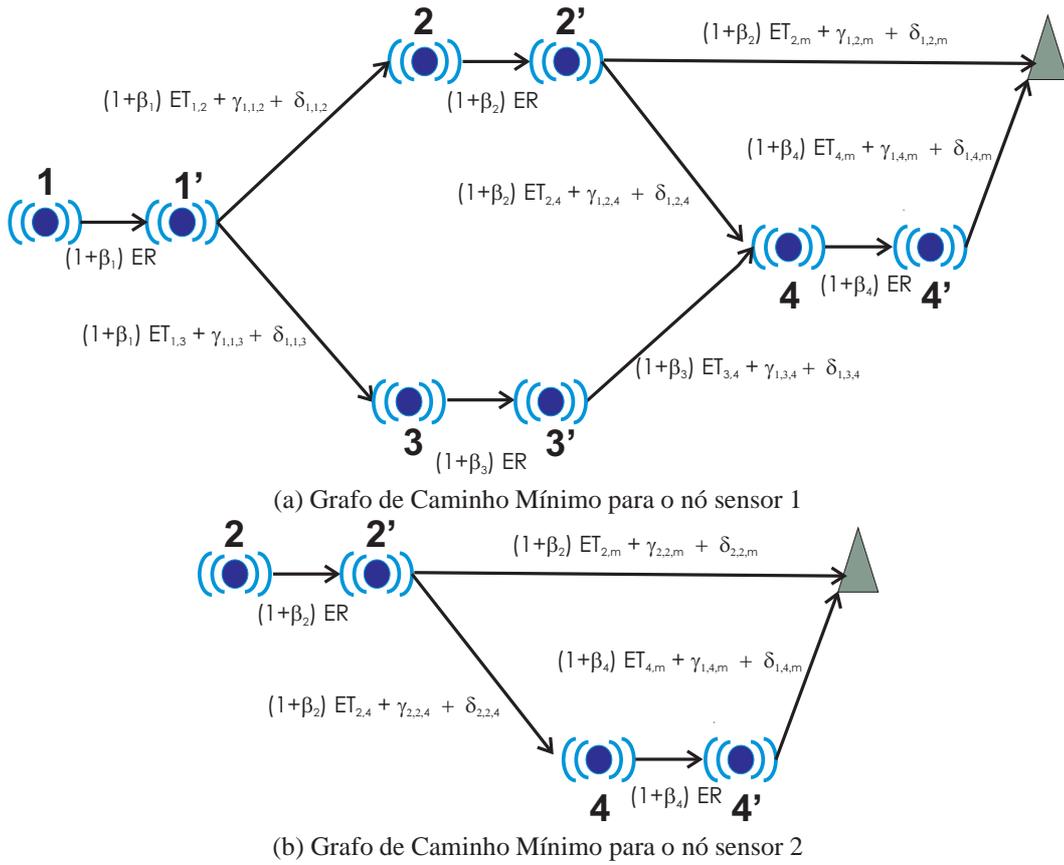


Figura 3.2: Rede de sensores desdobrada para cálculo do custo do caminho de um nó sensor l a um nó sorvedouro m procedimento de obtenção do Limite Inferior.

$$h_j^t \geq 0, \forall j \in D, \forall t \in T \quad (3.25)$$

$$w_1^1 - y_l^1 \geq 0, \forall l \in S \quad (3.26)$$

$$w_l^t - y_l^t + y_l^{t-1} \geq 0, \forall l \in S, \forall t \in T \text{ e } t \geq 2 \quad (3.27)$$

$$\sum_{l \in S} y_l^t \geq n, \forall t \in T \quad (3.28)$$

$$y_l^t, w_l^t \in \{0, 1\}, \forall l \in S, \forall t \in T \quad (3.29)$$

Finalmente:

$$\begin{aligned}
Z_{RL}(\alpha, \beta) = & \left\{ \sum_{l \in S} \sum_{t \in T} [(cm_l + cr_l^t - \sum_{j \in D} \alpha_{ljt} - \sum_{i \in S} \sum_{k \in (SUM)} \gamma_{iklt} - \sum_{i \in S} \sum_{k \in S} \delta_{iklt})y_l^t + ca_l w_l^t] \right\} \\
& + \left\{ \sum_{j \in D} \sum_{t \in T} (EH_j^t h_j^t + \sum_{l \in S} \alpha_{ljt} B_{lj} x_{lj}^t) \right\} \\
& - \sum_{l \in S} \beta_l EB_l
\end{aligned} \tag{3.30}$$

3.3.3 Limite Inferior

O modelo relaxado pode ser dividido em duas parcelas, uma com variáveis y , w e z e outra com as variáveis x e h .

A primeira parcela possui como função objetivo a seguinte equação:

$$Z_{RL_1}(\alpha, \beta) = \min \left\{ \sum_{l \in S} \sum_{t \in T} [(cm_l + cr_l^t - \sum_{j \in D} \alpha_{ljt} - \sum_{i \in S} \sum_{k \in (SUM)} \gamma_{iklt} - \sum_{i \in S} \sum_{k \in S} \delta_{iklt})y_l^t + ca_l w_l^t] \right\}$$

Sujeito às restrições (3.26) a (3.29).

A primeira parcela é separável para cada $t \in T$ e o procedimento para definir os nós ativos é o mostrado no Algoritmo 3.1.

O subproblema de ativação de nós (Z_{RL_1}) deve escolher, em cada período, os nós sensores mais "baratos" para minimizar a função objetivo. O algoritmo ativa os nós sensores enquanto o custo c_l for negativo, o que leva a valores de Z_{RL_1} cada vez menores. Se o número mínimo de nós sensores (n) não foi atingido são ativados novos nós em ordem crescente do custo c_l até que a restrição 3.28 seja atendida. O caminho dos nós ativos ao sorvedouro é ativado, viabilizando as restrições de conectividade. O último passo do algoritmo é ajustar os valores das variáveis w , para atender as restrições de ativação. Um detalhe do algoritmo é que se um nó foi ativado em um período t , seu custo c_l exclui no período $t + 1$ o valor ca_l .

A complexidade do Algoritmo 3.1 é descrita pela seguinte função:

$f(|T|, |S|, n) = |T| \times (|S| - 1 + |S| \log |S| + n \times |S|) + |S| + |S| \times |T| - 1$, onde $|T|$ corresponde ao laço na linha 3, $|S| - 1$ as linhas 6 a 8 porque uma execução do Algoritmo de Caminho Mínimo encontra o caminho mínimo para todos os vértices do grafo, $|S| \log |S|$ é o custo do algoritmo de ordenação de $|S|$ elementos, n corresponde ao laço da linha 11, $|S|$ é o custo da linha 14 considerando que no pior caso um nó precisa de $|S|$ passos para alcançar o sorvedouro, $|S|$ corresponde ao laço da linha 18 e $|S| \times |T| - 1$ aos laços das linhas 21 e 22. Ao final tem-se $O(|T| \times n \times |S|)$, uma vez que $n > \log |S|$.

A segunda parcela tem como função objetivo a seguinte equação:

Algoritmo 3.1: Algoritmo para resolver o Subproblema de Ativação de Nós Sensores da Relaxação Lagrangeana

```

1 .
   Entrada: S, D, Sorvedouro, RS (raio de sensoriamento), EH, B (Matriz de
      Cobertura),  $cr$ ,  $cm$ ,  $ca$ 
2 início
3   para todo  $t \in T$  faça
4     /*  $S'$  é o conjunto de nós ativos no período  $t$  */
5      $S' = \emptyset$ 
6      $NumeroNosAtivos = 0$ 
7     para todo  $l \in S$  faça
8       Calcular Caminho Mínimo para o nó  $l$ 
9        $c_l =$ 
10       $cm_l + cr_l^t - \sum_{j \in D} \alpha_{ljt} - \sum_{i \in S} \sum_{k \in (SUM)} \gamma_{ilk} - \sum_{i \in S} \sum_{k \in S} \delta_{ikl} + ca_l$ 
11      Ordenar crescentemente ( $c_l$ ) para todo  $l \in S$  e armazenar o resultado da
12      ordenação em  $L(i)$ , onde  $L(1) = l$  representada o nó com menor valor  $c_l$ .
13       $l = L(1)$ 
14      enquanto  $c_l < 0$  OU  $NumeroNosAtivos < n$  faça
15         $y_l^t = 1$ 
16         $NumeroNosAtivos = NumeroNosAtivos + 1$ 
17        Ativar Caminho para cada nó sensor  $l$  (Procedimento que ativa as
18        variáveis  $z$ )
19        Incluir o nó  $l$  no conjunto  $S'$ 
20         $i = i + 1$ 
21         $l = L(i)$ 
22      /* Ativar variáveis  $w$  */
23      para  $l = 1$  até Número de Nós Sensores faça
24        se  $y_l^1 == 1$  então
25           $w_l^1 = 1$ 
26      para  $l=1$  até Número de Nós Sensores faça
27        para  $t=2$  até Número de Períodos faça
28          se  $y_l^t == 1$  E  $y_l^{t-1} == 0$  então
29             $w_l^t = 1$ 
30      fim

```

$$Z_{RL_2}(\alpha, \beta) = \min\left\{\sum_{j \in D} \sum_{t \in T} (EH_j^t h_j^t + \sum_{l \in S} \alpha_{ljt} B_{lj} x_{lj}^t)\right\}$$

Sujeito às restrições (3.23) a (3.25).

A segunda parcela é separável para cada $j \in D$ e $t \in T$ e é resolvida pelo Algoritmo 3.2.

Algoritmo 3.2: Algoritmo para resolver o Subproblema de Cobertura da Relaxação Lagrangeana

Entrada: :

1 S, D, Sorvedouro, RS (raio de sensoriamento), EH, B (Matriz de Cobertura), α (Multiplicadores de Lagrange)

2 **início**

3 $x_{lj}^t = 0 \forall t, j, l$

4 **para todo** $t \in T$ **faça**

5 **para todo** $j \in D$ **faça**

6 cobertura = 0

7 Ordenar crescentemente $\alpha_{ljt}, \forall l$ e armazenar o resultado da ordenação em $L(i)$, onde $L(1) = l$ representada o nó com menor valor α_{ljt} .

8 $l = L(1)$

9 $i = 1$

10 $\bar{\alpha} = \alpha_{ljt}$

11 **enquanto** $\bar{\alpha} < EH_j$ **e** $i < \text{Numero de Nos Sensores}$ **faça**

12 **se** $B_{lj} == 1$ **então**

13 $x_{lj}^t = 1$

14 cobertura = cobertura + 1

15 **se** cobertura == q **então**

16 └─ Sair do Laço

17 $i = i + 1$

18 $l = L(i)$

19 $\bar{\alpha} = \alpha_{ljt}$

20 **se** cobertura < q **então**

21 └─ $h_j^t = q - \text{cobertura}$

22 **fim**

Este algoritmo escolhe, em cada período t , e para cada ponto de demanda j , os q nós sensores mais "baratos" que o alcancem (neste caso $B_{lj} = 1$), ou seja, aqueles com os menores valores α_{ljt} . Se o valor de α_{ljt} for maior que a penalidade EH significa que não vale apenas ativar o nó sensor e sim deixar o ponto descoberto e quando isto acontece a variável h

é ajustada como mostrado na linha 14.

A complexidade do Algoritmo 3.2 é descrita pela seguinte função:

$f(|T|, |D|, |S|) = |T| \times |D| \times (|S| \log |S| + |S|)$, onde $|T|$ corresponde ao laço na linha 4, $|D|$ corresponde ao laço da linha 5, $|S| \log |S|$ é o custo do algoritmo de ordenação de $|S|$ elementos, e $|S|$ é o custo da linha 11 considerando que no pior o caso um ponto de demanda precisa estar coberto por $|S|$ nós sensores. Ao final tem-se $O(|T| \times |D| \times |S| \log |S|)$.

3.3.4 Lagrangeano Dual

Como citado anteriormente para cada conjunto de Multiplicadores de Lagrange a solução do Lagrangeano tem valor menor ou igual à solução do problema original. Por isso quanto maior a solução do Lagrangeano, melhor o limite inferior do problema. Por isso é importante que se encontrem valores de Multiplicadores de Lagrange que forneçam o maior valor possível para o problema Lagrangeano Z_{RL} . Para encontrar estes multiplicadores utiliza-se o Lagrangeano Dual (LD), que corresponde ao problema dual do problema relaxado.

O Lagrangeano Dual (LD) é definido como:

$$Z_{LD} = \max Z_{RL}(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$$

$$\alpha, \beta, \gamma, \delta \geq 0 \quad (3.31)$$

Como o problema dual é não diferenciável são aplicados métodos como o subgradiente([Shor, 1985]), centros analíticos([Goffin & Vial, 1998]) e feixe (ou bundle)([Hiriart & Lemaréchal, 1991]) para resolvê-lo. Uma descrição destes métodos é dada por Lemaréchal [1989].

Neste trabalho a resolução do Lagrangeano Dual é feita pelo método subgradiente por ser um método simples de ser implementado e por apresentar bom desempenho em problemas diversos([Fisher, 1981]).

O subgradiente é um método iterativo que ajusta os valores dos Multiplicadores de Lagrange e que na n-iteração são calculados por:

$$\alpha_{l_{jt}}^{n+1} = \max(0, \alpha_{l_{jt}}^n + p^n d_{\alpha_{l_{jt}}}^n(x^n, y^n)), \forall l, j, t \quad (3.32)$$

$$\beta_l^{n+1} = \max(0, \beta_l^n + p^n d_{\beta_l}^n(w^n, y^n, z^n)), \forall l \quad (3.33)$$

$$\gamma_{likt}^{n+1} = \text{Max}(0, \gamma_{likt}^n + p^n d_{\gamma_{likt}}^n(z^n, y^n)), \forall l, t, ik \in (A^s \cup A^m). \quad (3.34)$$

$$\delta_{likt}^{n+1} = \text{Max}(0, \delta_{likt}^n + p^n d_{\delta_{likt}}^n(z^n, y^n)), \forall l, t, ik \in A^s. \quad (3.35)$$

onde $d_{\alpha_{ljt}}^n$, $d_{\beta_l}^n$, $d_{\gamma_{likt}}^n$ e $d_{\delta_{likt}}^n$ indicam a direção de subida na iteração n geradas a partir do vetor do subgradiente $\varepsilon = (g_\alpha, g_\beta, g_\gamma, g_\delta)$ e referente ao Problema Z_{RL} relaxado e p^n é o tamanho do passo a ser dado nas direções $d_{\alpha_{ljt}}^n$, $d_{\beta_l}^n$, $d_{\gamma_{likt}}^n$ e $d_{\delta_{likt}}^n$. A função Max é utilizada porque os multiplicadores são não negativos.

As componentes $g_{\alpha_{ljt}}^n$, $g_{\beta_l}^n$, $g_{\gamma_{likt}}^n$ e $g_{\delta_{likt}}^n$ do vetor subgradiente na iteração n são calculadas como mostrado a seguir:

$$g_{\alpha_{ljt}}^n(x^n, y^n) = B_{lj} \times x_{lj}^t - y_l^t, \forall l \in S, \forall j \in D \text{ e } \forall t \in T \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} g_{\beta_l}^n(w^n, y^n, z^n) &= \sum_{l \in S} \sum_{t \in T} (EM_l^t \times y_l^t \\ &\quad + EA_l \times w_l^t \\ &\quad + \sum_{k \in (S-l)} \sum_{il \in E^l(A^s)} ER_l^t \times z_{kil}^t \\ &\quad + \sum_{k \in S} \sum_{li \in S^l(A^s \cup A^m)} ET_{li}^t \times z_{kli}^t) - EB_l, \forall l \in S \end{aligned} \quad (3.37)$$

$$g_{\gamma_{likt}}^n(z^n, y^n) = z_{lik}^t - y_i^t, \forall l \in S, \forall ik \in (A^s \cup A^m) \text{ e } \forall t \in T \quad (3.38)$$

$$g_{\delta_{likt}}^n(z^n, y^n) = z_{lik}^t - y_k^t, \forall l, \forall ik \in A^s \text{ e } \forall t \in T \quad (3.39)$$

Como no cálculo das direções de subida utiliza-se apenas as informações correntes do subgradiente tem-se:

$$d_{\alpha_{ljt}}^n(x^n, y^n) = g_{\alpha_{ljt}}^n(x^n, y^n) \quad (3.40)$$

$$d_{\beta_l}^n(w^n, y^n, z^n) = g_{\beta_l}^n(w^n, y^n, z^n) \quad (3.41)$$

$$d_{\gamma_{likt}}^n(z^n, y^n) = g_{\gamma_{likt}}^n(z^n, y^n) \quad (3.42)$$

$$d_{\delta_{ikt}}^n(z^n, y^n) = g_{\delta_{ikt}}^n(z^n, y^n) \quad (3.43)$$

O passo p na iteração n é calculado pela Equação 3.44.

$$p^n = \lambda \frac{1.05 * LS - Z_{RL}(\alpha^n, \beta^n, \gamma^n, \delta^n)}{\|\varepsilon^n\|^2} \quad (3.44)$$

onde λ é um escalar com valor definido no intervalo $0 < \lambda \leq 2$, que serve para regular o tamanho do passo p e auxilia na velocidade de convergência do método, LS é valor do melhor Limite Superior do problema original até o momento, ou seja, a solução viável com o menor valor e que é multiplicado pelo fator 1.05 para acelerar a convergência do método quando LS se aproxima do Limite Inferior LI . $Z_{RL}(\alpha^n, \beta^n, \gamma^n, \delta^n)$ é o valor da solução ótima do problema relaxado Z_{RL} para os multiplicadores $\alpha^n, \beta^n, \gamma^n$ e δ^n e por fim $\|\varepsilon^n\|^2$ é a Norma Euclidiana vetor subgradiente ε na iteração n , porém qualquer outra norma poderia ter sido usada.

O procedimento do Método Subgradiente é mostrado no Algoritmo 3.3.

3.3.5 Limite Superior

Como mencionado anteriormente o limite superior ou solução viável para um problema combinatório pode ser obtido por heurísticas específicas ou meta-heurísticas. Quando se utilizam técnicas de relaxação para obtenção de limites inferiores a tendência é que o limite superior seja obtido a partir da solução do limite inferior. Neste trabalho o Limite Superior é obtido por uma heurística denominada Heurística Lagrangeana que a partir da solução do limite inferior viabiliza as restrições relaxadas, mantendo a viabilidade das demais restrições.

A Heurística Lagrangeana proposta viabiliza a cada período as restrições de cobertura (3.3), as restrições de conectividade (3.7) e (3.8) e realiza a cada período um procedimento de verificação de energia residual para manter as restrições de energia (3.9) satisfeitas. Um pseudo-código geral para esta viabilização é mostrado no Algoritmo 3.4. Os procedimentos são detalhados posteriormente bem como a análise de sua complexidade.

O procedimento *AtivarNosCobertura* consiste em, a partir da solução do limite inferior da Relaxação Lagrangeana, ativar todos os nós l para os quais $x_{lk}^t = 1$ e $B_{lj} = 1$. Com isto tem-se a restrição (3.3) atendida e uma solução parcial para o limite superior. O pseudo-código deste procedimento é descrito no Algoritmo 3.5.

O procedimento anterior ativa os nós responsáveis pela garantia de cobertura da rede. Para garantir a viabilidade da solução, estes nós junto com os nós ativados pelo Algoritmo 3.1 devem possuir uma rota até o sorvedouro. Para gerar esta rota é calculado o Caminho Mínimo de cada um destes nós ao sorvedouro mais próximo. O procedimento de Caminho

Algoritmo 3.3: Algoritmo do Método Subgradiente

Entrada: n_{max} (Numero Máximo de Iterações do Método), N_{max} (Numero Máximo de Iterações Sem Melhora do Limite Inferior)

```

1 início
2   /* Inicializar parâmetros e variáveis */
3    $LS = +\infty$ 
4    $LI = -\infty$ 
5   para todo  $l \in S, j \in D, t \in T$  faça
6      $\alpha_{ljt} = 0$ 
7   para todo  $l \in S$  faça
8      $\beta_l = 0$ 
9   para todo  $l \in S, ik \in (A^s \cup A^m), t \in T$  faça
10     $\gamma_{likt} = 0$ 
11  para todo  $l \in S, ik \in A^s, t \in T$  faça
12     $\delta_{likt} = 0$ 
13  enquanto  $n < n_{max}$  faça
14    Resolver o Problema  $Z_{RL}(\alpha_{ljt}, \beta_l, \gamma_{likt}, \delta_{likt})$  para os valores atuais de
15     $(\alpha_{ljt}, \beta_l, \gamma_{likt}, \delta_{likt})$ 
16    se  $Z_{RL} > LI$  então
17       $LI = Z_{RL}$ 
18      Atualizar Variáveis do Limite Inferior
19      Executar Heurística Lagrangeana (Solução do Limite Inferior)
20      se  $Z_h < LS$  então
21         $LS = Z_h$ 
22        Atualizar Variáveis do Limite Superior
23        Calcular GAP de Dualidade
24        se  $GAP = 0$  então
25          Solução Ótima Encontrada
26          Concluir procedimento
27         $N = 0$ 
28      senão
29         $N = N + 1$ 
30        se  $N = N_{max}$  então
31           $N = 0$ 
32           $\lambda = \lambda/2$ 
33          se  $\lambda \leq 1 \times 10^{-3}$  então
34            Concluir procedimento
35           $n = n + 1$ 
36          Calcular os Vetores Subgradiente  $(g_\alpha^n, g_\beta^n), g_\gamma^n$  e  $g_\delta^n$ 
37          Calcular passo  $p^n$ 
38          Atualizar os Multiplicadores de Lagrange  $(\alpha_{ljt}^n, \beta_l^n, \gamma_{likt}^n, \delta_{likt}^n)$ 
39          Calcular GAP de Dualidade
40          se  $GAP = 0$  então
41            Solução Ótima Encontrada
42  fim

```

Algoritmo 3.4: Algoritmo da Heurística Lagrangeana para Viabilizar o Limite Inferior do PMCD-RSSF

Entrada: Solução Limite Inferior sol_{li} , S, D, Sorvedouro, q (Precisão de Cobertura), RS (raio de sensoriamento), RC (raio de comunicação), EA (Energia de Ativação), EM (Energia de Manutenção), ET (Energia de Transmissão), ER(Energia de Recepção),EB(Energia da Bateria), EH (Penalidade de Não Cobertura)

Saída: (

1 Solução Limite Superior sol_{ls})

2 **início**

3 **para todo** $t \in T$ **faça**

4 $sol_{ls} = sol_{li}$

5 AtivarNosCobertura(sol_{ls} , t, S, D, q , RS, EH)

6 AtivarCaminhos(sol_{ls} , t, S, D, Sorvedouro, RC, EA, EM, ET, ER, EB)

7 AjustarCobertura(sol_{ls} , t, S, D, q , RS, EH)

8 VerificarEnergiaResidual(sol_{li} , t, S, D, Sorvedouro, q , RS, RC, EA, EM, ET, ER, EB)

9 **fim**

Algoritmo 3.5: Algoritmo da Heurística Lagrangeana para Ativar Nós do Problema de Cobertura no Período t

Entrada: Solução Limite Superior para período t, S, D, Sorvedouro, RS (raio de sensoriamento)

1 **início**

2 /* Ajustar Variáveis y */

3 **para todo** $l \in S$ **faça**

4 **para todo** $j \in D$ **faça**

5 **se** $x_{lj}^t == 1 \ \& \ B_{lj} == 1$ **então**

6 $y_l^t = 1$

7 Sair do Laço

8 **fim**

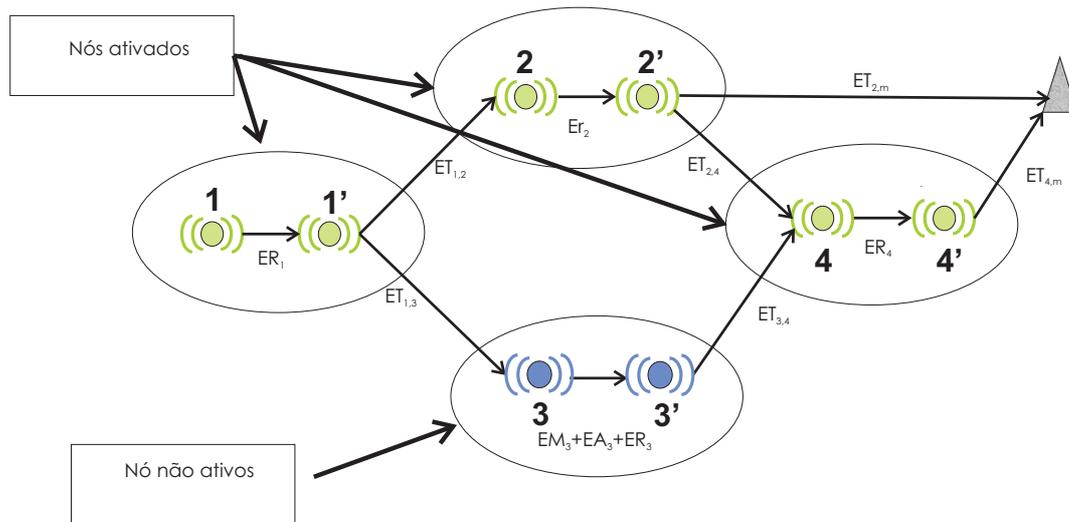


Figura 3.3: Rede de sensores desdobrada para cálculo do custo do caminho de um nó sensor a um nó sorvedouro no procedimento de obtenção do Limite Superior.

Mínimo monta um grafo com as seguintes regras. Cada nó l da rede é desdobrado em dois nós l e l' e peso do arco (l, l') é definido a seguir: se o nó está ativo na solução parcial do limite superior o peso do arco (l, l') é o custo de recepção do nó l senão o peso é o custo de ativação, manutenção e recepção do nó l . Entre dois nós sensores (l, i) conexos são incluídos arcos com custo igual ao custo de transmissão do nó l para o nó i . O caminho do nó l inicia-se no nó l' . A Figura 3.3 mostra o grafos para cálculo de caminho mínimo para os nós da rede no procedimento de obtenção do Limite Superior. O procedimento *AtivarCaminhos* que utiliza este caminhos é mostrado no Algoritmo 3.6.

A complexidade do Algoritmo 3.5 é descrita pela seguinte função:

$f(|S|, |D|) = |S| \times |D|$, onde $|S|$ corresponde ao laço na linha 2, $|D|$ corresponde ao laço da linha 3, e com isso tem-se $O(|S| \times |D|)$.

Algoritmo 3.6: Algoritmo da Heurística Lagrangeana para Ativar Nós do Problema de Conectividade no Período t

Entrada: Solução Limite Superior para período t , S , Sorvedouro, RC (raio de comunicação), EA (Energia de Ativação), EM (Energia de Manutenção), ET (Energia de Transmissão), ER (Energia de Recepção)

1 início

2 | Calcular Caminho Mínimo /* Ajustar Variáveis y */

3 | **para todo** $l \in S$ **E** $y_l == 1$ **faça**

4 | | Ativar Variáveis Caminho Mínimo (variáveis z , y e w)

5 fim

A complexidade do Algoritmo 3.6 é descrita pela seguinte função:

$f(|S|) = |S - 1| + (|S| \times |S|)$, onde $|S - 1|$ corresponde ao Algoritmo de Caminho Mínimo da Linha 2, $|S|$ corresponde ao laço da linha 3 e $|S|$ é o custo da linha 4 considerando que no pior o caso um nó precisa de $|S|$ passos para alcançar o sorvedouro e com isso tem-se $O(|S|^2)$.

Neste ponto tem-se todos os nós e seus respectivos caminhos ativados e o próximo passo é ajustar a cobertura do problema, o que significa ajustar as variáveis x e h ao conjunto de nós ativos. O procedimento *AjustarCobertura* é descrito no Algoritmo 3.7. Visando uma melhora no valor do limite superior este procedimento elimina redundâncias na cobertura, desativando todos os nós que não são roteadores e que não causem falhas de cobertura. Como um subconjunto de nós foi ativado para garantir cobertura (3.2) e outro subconjunto foi ativado para garantir um número mínimo de nós ativos (3.1) é possível que hajam mais nós ativos do que o necessário por isso é feito este ajuste.

Algoritmo 3.7: Algoritmo da Heurística Lagrangeana para Ajustar a Cobertura no Período t

Entrada: Solução Limite superior para período t , S , D , Sorvedouro, q (Precisão de Cobertura), RS (raio de sensoriamento)

```

1 início
2   /* Ajustar Variáveis  $x$  */
3   para todo  $j \in D$  faça
4     cobertura = 0
5     para todo  $l \in S$  faça
6       se  $y_l^t == 1$  E  $B_{lj} == 1$  então
7          $x_{lj}^t = 1$ 
8         cobertura = cobertura + 1
9       senão
10         $x_{lj}^t = 0$ 
11    /* Ajustar Variáveis  $h$ . */
12     $h_j^t = \text{Maior}(0, q - \text{Cobertura})$ 
13  Desativar Nós Redundantes
14 fim

```

A complexidade do Algoritmo 3.7 é descrita pela seguinte função:

$f(|D|, |S|) = (|D| \times |S|) + |S - q|$, onde $|D|$ corresponde ao laço da Linha 2, $|S|$ corresponde ao laço da linha 4 e $|S|$ é o custo da linha 11 considerando que no máximo serão desativados $|S - q|$, ficando q nós ativos para garantir a precisão da cobertura, Ao final tem-se $O(|D| \times |S|)$.

O procedimento para *VerificarEnergiaResidual* a energia consumida EC de cada nó até o período t' como definido pela Equação 3.45.

$$\begin{aligned}
EC_l^{t'} &= \sum_{t=1}^{t'} (EM_l^t \times y_l^t + EA_l \times w_l^t \\
&+ \sum_{k \in (S-l)} \sum_{il \in E^l(A^s)} ER_l^t \times z_{kil}^t \\
&+ \sum_{k \in S} \sum_{li \in S^l(A^s \cup A^m)} ET_{li}^t \times z_{kli}^t) \tag{3.45}
\end{aligned}$$

Após o cálculo compara-se o valor da energia residual do nó dado por $ERes = EB_l - EC_l$ com um limiar pré-estabelecido. Se $ERes_l < limiar$, o nó l fica indisponível para todos os períodos posteriores ao período t' , o que significa que mesmo que ele esteja ativo na solução do limite inferior ele não poderá ser utilizado. Com isto garante-se que as restrições de energia sejam satisfeitas na solução do limite superior.

Ao final dos procedimentos para todos os períodos tem-se uma solução viável para o problema e com ela um limite superior. A complexidade do O Algoritmo 3.4 é definida pela função abaixo: $f(|T|, |S|, |D|) = |T| \times (O(|S| \times |D|) + O(|S|^2) + O(|D| \times |S|) + O(|S| \text{ times } |T|))$, onde $O(|S| \times |D|)$ é a complexidade do procedimento da linha 5 descrito no Algoritmo 3.5, $O(|S|^2)$ é a complexidade do procedimento da linha 6 descrito no Algoritmo 3.6, $O(|D| \times |S|)$ é a complexidade do procedimento da linha 7 descrito no Algoritmo 3.7 e $O(|S| \text{ times } |T|)$ é a complexidade do procedimento da linha 8 que verificar a energia residual dos nós sensores. Sendo assim tem-se para este algoritmo $O(|T| \times |S| \times |D|)$, uma vez que $|D| \gg |S| \gg |T|$.

3.4 Resultados Computacionais

Os testes computacionais realizados visam avaliar os algoritmos propostos pelas Relaxação Lagrangeana e Heurística Lagrangeana em relação a qualidade dos resultados e tempo de execução. Estes testes foram divididos em duas baterias. Na Bateria 1 os valores do Limite Inferior obtidos pela Relaxação Lagrangeana são comparados ao valor do Limite Inferior da Relaxação Linear e ao valor da Solução Ótima, ambos obtidos pela solução do seu respectivo modelo matemático. A segunda bateria inclui os testes com a Relaxação Lagrangeana e Heurística Lagrangeana propostas. Os testes foram realizados em máquinas com sistema operacional Linux Ubuntu Hardy Heron (8.04), processador Core 2 Quad 2.5GHz e 4GB de memória RAM. Os algoritmos da Relaxação Lagrangeana foram implementados em linguagem C e os modelos matemáticos foram resolvidos pelo *software* de otimização CPLEX 10.0.

3.4.1 Parâmetros de Entrada

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 $u.e*t$ a unidade para quantificar a energia armazenada na bateria ou a energia consumida pelo nó, os parâmetros de entrada comuns a todos os testes realizados são os seguintes. Os valores de corrente consumida utilizados são baseados nos dados do nó sensor MICAz¹ da *Crossbow*. Os números máximos das iterações do Método Subgradiente foram definidos empiricamente.

Área de Monitoramento $10u.d. \times 10u.d.$

Localização do Sorvedouro Coordenada(5,5).

Número de Pontos de Demanda 100, que correspondem a 1 ponto de demanda por $(u.d.)^2$.

Precisão de cobertura q 1, que corresponde a 1 nó cobrindo cada ponto de demanda.

Energia da Bateria 400 $u.e*t$.

Energia de Ativação 10 $u.e*t$.

Energia de Manutenção/t 30 $u.e.$

Energia de Recepção/t 10 $u.e.$

Tempo de Transmissão/t 0.5 $u.t.$ o que significa durante um ciclo de operação o nó passa 50% do tempo em modo de transmissão.

Duração do Período 1 $u.t.$

Penalidade de Não Cobertura - EH 1000

Numero Máximo de Iterações do Método Subgradiente 10000

Numero Máximo de Iterações do Método Subgradiente Sem Melhora do Limite Inferior
200

Os valores de corrente consumida com transmissão em função da distância máxima que deseja-se alcançar são mostrados na Tabela 3.1.

O posicionamento dos nós sensores na área de monitoramento foi gerado aleatoriamente com distribuição uniforme. As instâncias de testes são apresentadas na Tabela 3.2. O

¹Maiores detalhes em : <http://www.xbow.com/Products/productdetails.aspx?sid=164>

Raio de Comunicação (u.d.)	Corrente (u.e.)
0,5142	8,6
0,5769	8,8
0,6473	9,0
0,7263	9,0
0,8150	9,1
0,9144	9,3
1,0260	9,3
1,1512	9,5
1,2916	9,7
1,4492	9,9
1,6261	10,1
1,8245	10,4
2,0471	10,6
2,2969	10,8
2,5771	11,1
2,8916	13,8
3,2444	14,5
3,6403	14,5
4,0845	15,1
4,5829	15,8
5,1420	16,8

Tabela 3.1: Corrente consumida com transmissão em função da distância.

conjunto de nós de cada instância é composto pelos nós da instância imediatamente inferior acrescido de 5 nós, assim as instâncias com 45 nós possuem os 40 nós da instância menor mais 5 outros gerados aleatoriamente, a de 50 os 45 da instância menor mais 5 e assim sucessivamente. A tendência é que a solução das instâncias maiores sejam menores ou iguais a da imediatamente inferior, em termos de valor da função objetivo, uma vez que os nós da instância menor pertencem as instâncias maiores. No pior caso a solução da instância maior é igual a da instância imediatamente menor.

3.4.2 Métricas de Avaliação

Os testes realizados fornecem os valores dos limites inferiores das Relaxações Linear e Lagrangeana, o valor da função da solução ótima e o valor do limite superior (solução viável) obtido pela Heurística Lagrangeana.

As métricas de avaliação utilizadas são: a comparação dos valores das Relaxações Linear e Lagrangeana, os GAPs de dualidade calculados pela Equação 3.19 entre o LI da

Instância	Número de Nós Sensores	Raio de Comunicação (u.d.)	Raio de Sensoriamento (u.d.)	Capacidade da Bateria (u.e*t)	Número de Períodos
t4010	40	3	2	400	4
t4010-5	40	3	2	400	5
t4010-6	40	3	2	400	6
t4010-7	40	3	2	400	7
t4010-8	40	3	2	400	8
t4010-10	40	3	2	400	10
t4510	45	3	2	400	4
t4510-5	45	3	2	400	5
t4510-6	45	3	2	400	6
t4510-7	45	3	2	400	7
t5010	50	3	2	400	4
t5010-5	50	3	2	400	5
t5010-6	50	3	2	400	6
t5010-7	50	3	2	400	7
t5510	55	3	2	400	4
t5510-5	55	3	2	400	5
t5510-6	55	3	2	400	6
t5510-7	55	3	2	400	7
t6010	60	3	2	400	4
t6010-5	60	3	2	400	5
t6010-6	60	3	2	400	6
t6010-7	60	3	2	400	7

Tabela 3.2: Instâncias de teste

Relaxação Lagrangeana e o valor da função da solução ótima, entre LI da Relaxação Linear e o valor da função da solução ótima e entre o LI da Relaxação Lagrangeana e o LS da Heurística Lagrangeana. Os tempos de obtenção da solução também são métricas utilizadas para avaliação dos algoritmos propostos.

3.4.3 Resultados da Bateria 1

A bateria de testes 1 compara os GAPs de Dualidade das Relaxações Lagrangeana e Linear utilizando o valor da solução ótima como o valor do Limite Superior. Os tempos de execução de cada umas das soluções, Relaxação Linear, Relaxação Lagrangeana e Solução Ótima, também são avaliados. Como citado anteriormente tanto o Limite Inferior da Relaxação Linear quanto a Solução Ótima são obtidos pelo resolução de seus respectivos modelos matemáticos no *software* de otimização CPLEX 10.0. Esta bateria consiste apenas das instâncias da Tabela 3.2 para as quais foi possível obter a solução ótima em um tempo inferior

Instância	LI da Relaxação Linear	LI da Relaxação Lagrangeana	Solução Ótima	GAP da Relaxação Linear(%)	GAP da Relaxação Lagrangeana (%)
t4010	3047,10	3038,84	3081,40	1,11	1,38
t4510	3012,10	3011,58	3081,40	2,25	2,27
t5010	2996,50	2995,27	3080,15	2,72	2,76
t5510	2850,47	2840,24	2950,10	3,38	3,72
t6010	2663,54	2651,61	2737,80	2,71	3,15
t4010-5	3776,94	3754,52	3836,20	1,54	2,13
t4510-5	3730,13	3720,13	3836,20	2,77	3,03
t5010-5	3710,63	3707,22	3833,50	3,21	3,29
t5510-5	3530,17	3521,41	3687,55	4,27	4,51
t6010-5	3297,63	3281,34	3391,80	2,78	3,26
t4010-6	4507,40	4430,36	4616,05	2,35	4,022
t4510-6	4455,02	4373,82	4616,05	3,49	5,26
t5010-6	4434,99	4404,32	4616,05	3,92	4,59
t4010-7	5243,84	5174,73	5379,60	2,52	3,81
t4010-8	6012,64	5874,21	6365,90	5,55	7,72

Tabela 3.3: Resultados da Bateria 1 comparando os limites das Relaxações Linear, Lagrangeana e Solução Ótima

a 50 horas (180000 segundos). Os resultados são mostrados nas Tabela 3.3.

Como pode ser observado o aumento do número de nós, mantendo-se o número de períodos, melhora o valor da função objetivo, seja para a Relaxação Linear, Relaxação Lagrangeana ou Solução Ótima. Isto ocorre porque cada instância gerada mantém os nós da instância imediatamente inferior e adiciona cinco novos nós, o que garante que o resultado seja pelo menos o obtido pela instância menor. Quando há melhora no valor da função objetivo isso significa que os novos nós encontram-se em posições que permitem um menor consumo de energia. Para os testes realizados os ganhos foram principalmente no consumo de energia com transmissão, ou seja, os novos nós levaram a árvores de conectividade mais baratas em relação ao consumo de energia.

Os GAPS de dualidade variaram entre 1,11313% e 5,549278% para a Relaxação Linear e entre 1,381149% e 7,723763% para a Relaxação Lagrangeana. Novamente é observado que quanto maior o número de nós na instância ou o número de períodos maior o valor do GAP.

Em relação aos valores dos limites inferiores, a Relaxação Linear obteve melhores resultados que a Relaxação Lagrangeana, ou seja, o limite inferior foi maior. Considerando que as soluções da Relaxação Lineares são soluções não inteiras, para uma parte das variáveis x, y, z , a Relaxação Lagrangeana pelo menos em alguns casos deveria ter melhores limites.

Instância	Tempo da Relaxação Linear(s)	Tempo da Relaxação Lagrangeana(s)	Tempo da Solução Ótima (s)
t4010	910,92	1416,13	1069,78
t4510	1329,33	1488,22	1670,53
t5010	7474,10	2069,49	2151,77
t5510	52617,72	4193,74	60032,15
t6010	30634,57	5954,77	110324,45
t4010-5	192,78	1679,72	1653,2
t4510-5	9535,73	2426,96	2619,19
t5010-5	2204,3	2646,73	4627,86
t5510-5	20462,24	3013,46	85328,56
t6010-5	57418,86	5785,15	145649,90
t4010-6	689,62	554,69	3287,88
t4510-6	1973,53	1939,01	6379,31
t5010-6	9828,54	2122,76	176433,97
t4010-7	669,51	939,96	14878,54
t4010-8	1820,66	752,87	179846,30

Tabela 3.4: Tempo de Execução dos Testes da Bateria 1

Porém, como o número de restrições relaxadas foi grande este limite fica prejudicado e para as instâncias testadas ficaram abaixo dos limites da Relaxação Linear. As diferenças entre estes valores variaram entre 0,017% e 2,302%. Porém esta diferença foi pequena e a Relaxação Lagrangeana tem a grande vantagem de gerar soluções inteiras e o que facilita a geração de uma solução viável.

A Tabela 3.4 compara os tempos de execução entre as três estratégias. Pode-se observar o rápido crescimento do tempo de execução da Relaxação Linear e da Solução Ótima quando aumenta-se o número de nós e/ou o número de períodos. Este comportamento já era esperado uma vez que ambos são obtidos pela resolução do modelo matemático pelo Algoritmo SIMPLEX, que apesar de ser muito eficiente na prática, tem complexidade exponencial. Os tempos de execução dos algoritmos da Relaxação Lagrangeana por outro lado tem um crescimento mais contido e aproximando-se de uma função polinomial, o que a torna ainda mais adequada para tratar o problema multiperíodo.

3.4.4 Resultados da Bateria 2

A bateria 2 consiste dos testes com a Relaxação Lagrangeana e Heurística Lagrangeana e por isso foi possível realizar testes com um número maior de períodos mesmo para as instâncias com um maior número de nós. O limite inferior é calculado pela Relaxação Lagrangeana

Instância	LI da Relaxação Lagrangeana	LS da Heurística Lagrangeana	GAP(%)	Tempo de Execução (s)
t4010	3040,29	3092,40	1,69	1346,52
t4510	3011,56	3098,60	2,81	1385,75
t5010	2996,39	3098,60	3,30	1785,85
t5510	2845,80	3087,60	7,83	2916,37
t6010	2653,27	3023,2	12,24	5513,50
Média	2909,46	3080,08	5,57	–
Desvio Padrão	161,85	32,13	4,40	–

Tabela 3.5: Resultados da Bateria 2 para as Instâncias com 4 Períodos

Instância	LI da Relaxação Lagrangeana	LS da Heurística Lagrangeana	GAP(%)	Tempo de Execução (s)
t4010-5	3751,44	3848,25	2,52	1736,84
t4510-5	3720,21	3928,45	5,30	2373,08
t5010-5	3704,52	3936,35	5,89	2652,02
t5510-5	3519,61	3922,60	10,27	3424,02
t6010-5	3282,19	4184,75	21,57	5495,53
Média	3595,60	3964,08	9,11	–
Desvio Padrão	197,28	128,33	7,50	–

Tabela 3.6: Resultados da Bateria 2 para as Instâncias com 5 Períodos

Instância	LI da Relaxação Lagrangeana	LS da Heurística Lagrangeana	GAP(%)	Tempo de Execução (s)
t4010-6	4441,88	5018,25	11,49	821,11
t4510-6	4410,05	5186,30	14,97	1929,25
t5010-6	4400,11	5382,90	18,26	2091,56
t5510-6	4143,84	4964,30	16,53	3185,58
t6010-6	3911,42	4789,00	18,32	4594,51
Média	4261,46	5068,96	15,91	–
Desvio Padrão	229,25	225,96	2,83	–

Tabela 3.7: Resultados da Bateria 2 para as Instâncias com 6 Períodos

e o limite superior é inicializado com o valor $+\infty$. A cada atualização do limite inferior a Heurística Lagrangeana é chamada para viabilizar a solução gerada visando obter um limite superior melhor, ou seja, menor. Os resultados obtidos são mostrados nas Tabelas 3.5, 3.6, 3.7, e 3.8.

Instância	LI da Relaxação Lagrangeana	LS da Heurística Lagrangeana	GAP(%)	Tempo de Execução (s)
t4010-7	5159,20	6215,30	16,99	694,69
t4510-7	5099,23	6545,80	22,10	1248,7
t5010-7	5037,23	6401,25	21,31	1844,75
t5510-7	4737,02	6275,35	24,14	3126,60
t6010-7	4525,97	5931,20	23,69	4382,79
Média	4911,73	6273,78	21,65	–
Desvio Padrão	269,95	229,69	2,85	–

Tabela 3.8: Resultados da Bateria 2 para as Instâncias com 7 Períodos

Como ocorreu na bateria anterior quando se aumentou o número de nós e/ou de períodos houve um aumento no valor do GAP principalmente em função do valor do limite superior obtido via Heurística Lagrangeana porque as prioridades para o desenvolvimento da heurística foram o tempo de execução e a simplicidade, o que por sua vez pode influenciar na qualidade da solução.

A Tabela 3.9 compara os valores dos limites obtidos com os valores de solução ótima nas bateria 1 e 2 com as instâncias para as quais foi possível calculá-la. O limite Superior da Bateria 1 é o valor da solução ótima da instância e encontra-se na última coluna da tabela. Na Bateria 2 o Limite Superior é calculado pela Heurística Lagrangeana. Percebe-se nitidamente o peso do valor do limite superior no aumento dos GAPS, uma vez que estes têm valores bem mais altos que a solução ótima e que variaram entre 0, 31% e 18%.

Como já citado, a prioridade no desenvolvimento da Heurística Lagrangeana foi a simplicidade e o tempo de execução porém a qualidade do limite superior pode ser melhorada com uma heurística mais sofisticada e com o uso de técnicas amplamente utilizadas como Busca Local. Uma heurística baseada no algoritmo GRASP com Busca Local para o problema aqui tratado é encontrada nos seguintes trabalhos [Andrade & Nakamura, 2009] e [Andrade et al., 2009].

3.5 Considerações Finais

Este capítulo apresenta uma abordagem multiperíodo para o Problema de Controle de Densidade em Redes de Sensores sem Fio (PDC-RSSF). Essa abordagem inclui uma modelagem matemática de PLIM, uma proposta de Relaxação Lagrangeana para geração de limites inferiores e uma Heurística Lagrangeana para obtenção de limites superiores para o problema. O modelo matemático é resolvido com um *software* de otimização comercial e obtém a so-

Instância	LI da Relaxação Lagrangeana Bateria 1	LI da Relaxação Lagrangeana Bateria 2	LS da Heurística Lagrangeana	Solução Ótima
t4010	3038,84	3040,29	3092,40	3081,40
t4510	3011,58	3011,56	3098,60	3081,40
t5010	2995,27	2996,39	3098,60	3080,15
t5510	2840,24	2845,80	3087,60	2950,10
t6010	2651,61	2653,27	3023,20	2737,80
t4010-5	3754,52	3751,44	3848,25	3836,20
t4510-5	3720,13	3720,21	3928,45	3836,20
t5010-5	3707,22	3704,52	3936,350	3833,50
t5510-5	3521,41	3519,61	3922,60	3687,55
t6010-5	3281,34	3282,19	4184,75	3391,80
t4010-6	4430,36	4441,88	5018,25	4616,05
t4510-6	4373,82	4410,05	5186,30	4616,05
t5010-6	4404,32	4400,11	5382,90	4616,05
t4010-7	5174,73	5159,20	6215,30	5379,60

Tabela 3.9: Comparação entre os limites das Relaxações Lagrangeana das baterias 1 e 2 e entre o limite da Heurística Lagrangeana e a Solução Ótima

lução ótima para algumas instâncias do problema porém tem problemas de escalabilidade que impedem que se tratem instâncias grandes em tempos viáveis, além de depender de pacotes de *software* para ser resolvido. A Relaxação Lagrangeana e Heurística Lagrangeana foram desenvolvidas como estratégias de solução do modelo proposto e como mostrado na Seção 3.4 obtiveram bons resultados tanto em relação a qualidade das solução quanto no tempo de execução. Além disso elas minimizam o problema de escalabilidade, podendo tratar instâncias grandes tanto em relação ao número de nós sensores e dimensão da área de monitoramento, quanto ao número de períodos e elimina a dependência de um pacote de *software* para obtenção da solução.

Uma abordagem multiperíodo para o problema de controle de densidade em redes de sensores é uma estratégia nova e com diversas possibilidades de utilização, apesar das características dinâmicas que estas redes possuem. Neste trabalho destacamos seu uso em duas frentes: aplicação e avaliação.

O primeiro caso diz respeito a utilização da abordagem multiperíodo em redes de sensores instaladas em ambientes tolerante a falhas, que neste trabalho são considerados ambientes onde as falhas mais comuns de nós sensores são por falta de energia e onde qualquer problema operacional com os nós é contornado com a substituição deste nó por outro nó. Em aplicações com esta característica pode-se gerar uma solução multiperíodo e esta deve

funcionar até que uma falha operacional ocorra e neste caso o nó sensor que falhou é substituído. Feita a substituição pode-se continuar o processamento a partir do ponto em que ele foi interrompido ou gerar uma nova solução. O primeiro caso é o mais adequado quando o nó substituído tem as mesmas características que o anterior e o custo de geração de uma nova solução é alto, sendo este custo medido em tempo de execução, consumo de energia, entre outros. A segunda estratégia é obrigatória quando os nós têm características diferentes porque neste caso a solução gerada anteriormente não se aplicaria. Além disso, quando o custo de geração de uma nova solução é baixo refazê-la é mais indicado.

O segundo caso consiste em utilizar o modelo multiperíodo para avaliar outras soluções de controle de densidade. Considerando que a solução multiperíodo tem visão global dos nós da rede e do tempo de vida esperado, as configurações por ela geradas para cada período de tempo, em termos de consumo de energia e cobertura, são as melhores possíveis e neste caso servem como um limite inferior para soluções de controle de densidade.

A abordagem multiperíodo proposta neste trabalho abrange diversos tipos de redes planas e aplicações. Apesar dos testes apresentados tratarem redes homogêneas e períodos de tempo com a mesma duração ela aplica-se também a redes heterogêneas e períodos de tempo com diferentes durações, uma vez que estas características são todas traduzidas nos parâmetros de entrada do modelo. Os valores absolutos dos raios de sensoriamento e comunicação são transparentes para o modelo pois eles são utilizados apenas para geração do conjunto de arcos que conectam nós sensores e pontos de demanda e nós sensores entre si, respectivamente. Se os nós sensores têm consumo e capacidade de energia diferentes, os valores de energia de ativação, manutenção e transmissão terão valores diferentes para cada nó. Quanto a períodos de duração diferentes, como a duração do período é utilizada no cálculo das energias consumidas, um mesmo nó sensor terá valores de energia diferentes em cada período. Estas características tornam a abordagem flexível e abrangente.

O capítulo seguinte apresenta o PCD-RSSF Periódico, que é uma abordagem alternativa quando se pretende tratar o PCD-RSSF período-a-período.

Capítulo 4

Abordagem Periódica

Uma outra abordagem para se tratar o PCD-RSSF é encontrar a melhor solução para a rede em um determinado instante de tempo e repetir este procedimento periodicamente. Neste trabalho esta abordagem é denominada Abordagem Periódica. Este capítulo propõe o tratamento periódico como uma alternativa à abordagem multiperíodo apresentada no capítulo anterior. Em termos práticos essa abordagem tem maior abrangência por poder trabalhar com instâncias maiores, em número de nós e tamanho da área de monitoramento, do que a abordagem multiperíodo. Além disso, o controle de densidade periódico é capaz de tratar as falhas nos nós sensores no momento em que elas acontecem. O termo periódico foi utilizado por se tratar da geração de soluções estáticas mas que são geradas periodicamente e utilizando dados de soluções anteriores como nós ativos, energia consumida e energia residual.

Neste capítulo são propostas duas modelagem matemáticas de PLI para o PDC-RSSF Periódico. Apesar de ser mais simples do que o problema multiperíodo continua-se lidando com um problema complexo de otimização combinatória. Por isso é proposto um Algoritmo Híbrido como alternativa de solução do problema. O algoritmo trabalha de duas formas: global e localmente. Quando requerido, o algoritmo que tem uma visão global da rede escolhe um conjunto de nós sensores com baixo custo de energia para manter a área de cobertura e assegurar a conectividade dos nós construindo uma árvore de roteamento. O algoritmo local é acionado cada vez que uma falha acontece, tentando restaurar a cobertura e a conectividade da rede. A Abordagem Híbrida é comparada com uma abordagem Periódica Global, que reconstrói a rede globalmente em períodos predefinidos e com uma abordagem Local *Online*, que restabelece a cobertura e a conectividade da redes na vizinhança da falha. Todos os algoritmos são centralizados, uma vez que todo o processamento é feito fora da rede e com a visão global deste. Porém devido a característica de revolver o problema apenas na vizinhança da falha a Abordagem Local *Online* pode ser adaptada para trabalhar de forma distribuída.

Resultados preliminares e complementares deste capítulo são encontrados em [Quintão et al., 2004b], [Menezes et al., 2004a], [Quintão et al., 2004a], [Quintão et al., 2004], [Quintão et al., 2004c], [Quintão et al., 2007], [Martins et al., 2007], [Nakamura et al., 2007b] e [Nakamura et al., 2007c].

4.1 Definição do Problema

De maneira formal o problema a ser tratado 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 (PDC-RSSF) Periódico consiste em garantir para cada ponto de demanda $j \in D$ na área A que pelo menos q nós sensores $l \in S$ o cubram e que existe uma rota entre cada nó sensor ativo $l \in S$ e um nó sorvedouro $m \in M$ periodicamente, estando os nós sensores sujeitos a falhas e restrições de energia.*

A diferença entre a Abordagem Multiperíodo e a Periódica é que a primeira resolve o problema para todos os períodos ao mesmo tempo e a segunda resolve para cada período separadamente. Na seção seguinte são propostas duas formulações matemáticas de programação linear inteira para modelá-lo.

4.2 Formulação matemática

O PDC-RSSF Periódico foi formulado por um modelo de Programação Linear Inteira (PLI). Este modelo corresponde ao modelo matemático apresentado no Capítulo anterior sem o aspecto multiperíodo, ou seja, não existe o índice t nas variáveis e nas restrições. Em virtude disto algumas variáveis e restrições podem ser excluídas. Os parâmetros de entrada são os mesmos definidos anteriormente.

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

$$\begin{aligned}
Z_p &= \min \sum_{l \in S} ((EM_l + EA_l) \times y_l \\
&+ \sum_{k \in (S-l)} \sum_{i \in E^l(A^s)} ER_l \times z_{kil} \\
&+ \sum_{k \in S} \sum_{li \in S^l(A^s \cup A^m)} ET_{li} \times z_{kli})
\end{aligned} \tag{4.1}$$

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

As restrições (4.2) e (4.3) 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.

$$\sum_{l \in S} B_{lj} \times x_{lj} \geq m, \forall j \in D \tag{4.2}$$

$$0 \leq B_{lj} \times x_{lj} \leq y_l, \forall l \in S \text{ e } \forall j \in D \tag{4.3}$$

As restrições (4.4), (4.5), (4.6) e (4.7) referem-se ao problema de conectividade e garantem que para cada nó ativo para sensoriamento deve existir uma rota até um nó sorvedouro.

$$\sum_{ip \in E^p(A^s)} z_{lip} - \sum_{pk \in S^p(A^s \cup A^m)} z_{lpk} = 0, \forall p \in (S \cup M - l), \forall l \in S \tag{4.4}$$

$$- \sum_{pk \in S^p(A^s \cup A^m)} z_{lpk} = -y_l, p = l, \forall l \in S \tag{4.5}$$

$$z_{lip} \leq y_i, \forall i \in S, \forall l \in (S - p), \forall ip \in (A^s \cup A^m) \tag{4.6}$$

$$z_{lip} \leq y_p, \forall p \in S, \forall l \in (S - p), \forall ip \in (A^s \cup A^m) \tag{4.7}$$

A restrição (4.8) define as variáveis de decisão como binárias.

$$y, z \in \{0, 1\} \tag{4.8}$$

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.

Um possível problema desta modelagem é que o estado de energia dos nós não é considerado no cálculo da solução, possibilitando que a solução escolha um nó com baixa energia residual. A consequência é que a energia deste nó vai se esgotar rapidamente, gerando falhas na rede. Para tentar minimizar esta situação é proposta uma função objetivo alternativa que considera a energia residual do nó como um dos parâmetros de geração da solução. Seja $ERel$ a energia residual do nó l , a nova função objetivo é mostrada na Função 4.9

Função Objetivo

$$\begin{aligned}
 Z_{p2} = \min \sum_{l \in S} & ((EM_l + EA_l) \times y_l^t \\
 & + \sum_{k \in (S-l)} \sum_{i \in E^l(A^s)} ER_l \times z_{kil} \\
 & + \sum_{k \in S} \sum_{li \in S^l(A^s \cup A^m)} ET_{li} \times z_{kli})) / ER_{el} \quad (4.9)
 \end{aligned}$$

sujeito as restrições (4.2) a (4.8)

O modelo com essa função objetivo passa a privilegiar nós com consumo baixo e energia residual alta. Quando todos os nós possuem o mesmo valor de energia residual não é necessário considerá-la na função, pois a solução não se alterará. A modificação surte efeito quanto os nós têm energia residual diferentes.

Uma comparação entre o modelo com as duas variações de função objetivo é mostrada na seção resultados.

O modelo matemático apresentado neste capítulo com duas variações é um modelo complexo de otimização combinatória, o que faz com que o desenvolvimento de heurísticas seja uma alternativa ao tratamento do problema. Neste cenário foi desenvolvido um Algoritmo Híbrido que combina um Algoritmo Global Periódico com um Algoritmo Local *Online* para resolver o problema.

4.3 Algoritmo Híbrido

O Algoritmo Híbrido proposto combina uma estratégia de solução global, que reconstrói toda a rede, com uma estratégia local, que a cada falha de nós tenta restabelecer a cobertura e conectividade na vizinhança da falha. Este algoritmo tenta combinar as vantagens de cada uma dessas estratégias em uma única solução, que se adapte melhor às RSSFs. A visão global da rede pode levar a melhores resultados por poder escolher os melhores nós para compor a solução. Entretanto, ela não é escalável, tanto em termos computacionais quanto para disseminação da solução na rede. A estratégia local se adapta melhor às redes de sensores por ser computacionalmente mais barata e escalável, porém a visão local pode levar a soluções piores em termos de consumo de energia, com a ativação de um número de nós maior que o necessário.

Este algoritmo é composto por um Algoritmo Global (Algoritmo 4.1), que utiliza algoritmos genéticos, Árvore Geradora Mínima (AGM) e Caminho Mínimo, para reconstruir a rede quando solicitado pela aplicação. O Algoritmo Genético resolve o problema de cobertura, e a Árvore Geradora Mínima e o Caminho mínimo a conectividade.

Algoritmos Genéticos são uma meta-heurística que se baseia na Teoria de Seleção Natural das Espécies de Charles Darwin Haupt & Haupt [1998]. A solução do problema é representada por meio com um cromossomo que é implementado com estrutura de dados. A estes cromossomos são aplicadas operações de elitismo, mutação e casamento (crossover) que são implementadas como funções computacionais. O Algoritmo parte de uma população inicial obtida em geral de maneira aleatória e a cada nova iteração uma nova população é gerada. Espera-se que a cada nova população tenham-se pelo menos um cromossomo (solução) melhor que o melhor da população anterior. A operação de elitismo garante que o melhor cromossomo de uma população sempre pertença a próxima população. O melhor cromossomo é definido por uma função de aptidão. O critério de parada geralmente é o número de iterações, comumente definidos como gerações e pode ser complementado por funções que avaliam a melhora entre as populações e se esta melhora estiver abaixo de um limiar o algoritmo pode ser encerrado.

A solução do problema no Algoritmo Genético é representada por um cromossomo com codificação binária de tamanho $|S|$ e que terá o valor 1 na posição l se o nó sensor l está ativo naquela solução e 0 caso contrário. A função de aptidão do algoritmo genético inclui o custo para ativar o nó, mais o custo do caminho mínimo entre o nó e o sorvedouro mais próximo, o qual contabiliza o custo de transmissão do nós, mais os custos de ativação, recepção e transmissão dos nós do caminho e, visando obter uma cobertura melhor, uma parcela que penaliza os pontos de demanda descobertos. Neste momento começa-se a abrir mão da otimalidade em função de soluções mais rápidas e não dependentes de *software* dedi-

cados. O critério de parada foi o número de iterações. Este algoritmo foi proposto primeiramente em [Quintão et al., 2004c] e serviu de base para esta tese e para os seguintes trabalhos [Quintão et al., 2004], [Quintão et al., 2004c], [Quintão et al., 2007], [Martins et al., 2007], e [Nakamura et al., 2007c] onde se encontram mais detalhes sobre as decisões e implementações.

A função de aptidão é mostrada na Equação (4.10).

$$aptido(H) = \sum_{l \in S} (EA_l + Custos_{Caminho_{No}l}) \times y_l + \sum_{j \in D} EH_j \times h_j \quad (4.10)$$

Algoritmo 4.1: Algoritmo Global para o PDC-Periódico

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

```

1 início
2   Iniciar população aleatoriamente
3   para todo ( $l \in S$ ) faça
4      $Custos_{Caminho_{No}l} = CaminhoMinimo(l, sorvedouro)$ 
     /* Algoritmo Genético */
5   enquanto ! condição de parada faça
6     Calcular função de aptidão de cada cromossomo
7     Ordenar crescentemente a população de acordo com a função de aptidão
8     Remover os cromossomos que são piores do que metade da população
9     Escolher cromossomos para casamento, e realize casamento, gerando
     novos indivíduos para a população
10    Realizar mutação sobre a população, com probabilidade  $\pi$ 
     /* Fim do Algoritmo Genético */
11   Construir Árvore Geradora Mínima(nós ativos)
12   enquanto houver um nó l não conectado ao sorvedouro faça
13      $CaminhoMinimo(i, sorvedouro)$ 
14   Calcular a função objetivo
15 fim

```

O procedimento *Construa Árvore Geradora Mínima(nós ativos)* na linha 11 do Algoritmo constrói a AGM apenas entre os nós ativos para verificar a conectividade entre os nós ativos. Se após a construção algum nó ativo não estiver conectado a esta árvore, para cada nó ativo não conectado, é chamado o procedimento *CaminhoMinimo(i, sorvedouro)* que constrói um grafo como o proposto no capítulo anterior e ilustrado na Figura 3.3, calcula e ativa o caminho mínimo para cada um destes nós. A cada novo nó e a cada nova rota incluída na solução o algoritmo reconstrói o grafo.

Considere *TamPop* o tamanho da população gerada pelo Algoritmo na Linha 1 e *NumMaxIte* o número máximo de iterações do laço da linha 5, neste caso o Algoritmo 4.1

tem sua complexidade descrita pela seguinte função:

$f(|S|, |D|, TamPop, NumMaxIte) = |S| \text{ times } TamPop + |S| + NumMaxIte \times (TamPop \times (|S| + |D|) + TamPop \times \log(TamPop) + \frac{TamPop}{2} + \frac{TamPop}{2} + \frac{TamPop}{2})$, onde $|S| \text{ times } TamPop$ corresponde ao custo de geração da população inicial da linha 2, $|S|$ é o custo do Algoritmo de Caminho Mínimo das linhas 3 e 4, $NumMaxIte$ é o custo do laço da linha 5, $TamPop \times (|S| + |D|)$ é o custo para calcular a aptidão de todos os cromossomos, $TamPop \times \log(TamPop)$ é o custo de ordenar as soluções, $\frac{TamPop}{2}$ é o custo das operações das linhas 8, 9 e 10. Tem-se então para este Algoritmo $O(NumMaxIte \times TamPop \times |D|)$, pois $|D| \gg |S|$.

A estratégia Híbrida é composta também por um Algoritmo Local *Online* que é acionado a cada perda de cobertura e conectividade devido à falhas de nós. Seja $d(i, l)$ a distância Euclidiana entre os nós i e l , onde i é o nó que falhou, e C o conjunto de filhos do nó i , o algoritmo seleciona um novo nó baseado no valor da Equação (4.11). A distância quadrada é utilizada para que a escolha dos nós priorize um candidato que esteja, ao mesmo tempo, perto do pai e dos filhos do nó que falhou. O Algoritmo Local *Online* é mostrado em alto nível no Algoritmo 4.2. O procedimento de Caminho Mínimo é o mesmo utilizado no Algoritmo 4.1.

$$Valor(l) = (d(l, pai))^2 + \sum_{j \in C} (d(l, j))^2 \quad (4.11)$$

onde pai é o pai do nó que falhou na árvore de roteamento.

O Algoritmo 4.2 tem sua complexidade descrita pela seguinte função:

$f(|S|, |D|, |C|) = |S| \times |D| \times |C| + |S| + |C| \times |S|$, onde $|S|$ corresponde ao laço da linha 5, $|D|$ é o custo da linha 6, $|C|$ corresponde ao custo de cálculo da função 4.11, $|S|$ é o custo do Algoritmo de Caminho Mínimo e $|C| \times |S|$ o custo do Cálculo do Caminho Mínimo para conectar a rede os nós filhos do nó que falhou. Neste último caso como o grafo tem que ser reconstruído cada vez que um nó é incluído na solução então a complexidade do algoritmo de Caminho Mínimo é multiplicado pelo número de nós do conjunto C . Tem-se então para este Algoritmo $O(|S| \times |D| \times |C|)$.

A estrutura básica do Algoritmo Híbrido é mostrada no Algoritmo 4.3.

As estratégias para a chamada do Algoritmo Global Periódico dentro do Algoritmo Híbrido são as seguintes:

No período t , são feitas as seguintes verificações:

- Seja t_{ag} o período onde houve a última chamada ao Algoritmo Global;
- Seja $S_a(t)$ o número de nós ativos no período t ;

Algoritmo 4.2: Algoritmo Local *Online* para o PCD-Periódico

Entrada: S , i (sensor falho), C (Conjunto de Filhos de i), m , D , RS (raio de sensoriamento), RC (raio de comunicação)

```

1 início
2 se (Perda de Cobertura = TRUE) então
3   MelhorValor  $\leftarrow \infty$ 
4   MelhorNo  $\leftarrow -1$ 
5   para todo ( $l \in S$  and estado( $l$ ) = INATIVO) faça
6     se (nó  $l$  cobre pontos de demanda descobertos) então
7       /* Cálculo do Valor da Função descrita na
8         Equação 4.11 para cada um dos nós
9         candidatos */
10      Calcular Valor( $l$ )
11      se (Valor( $l$ ) < MelhorValor) então
12        MelhorValor  $\leftarrow$  Valor( $l$ )
13        MelhorNo  $\leftarrow$   $l$ 
14      /* Busca por uma melhor rota do MelhorNó ao
15        sorvedouro( $m$ ) */
16      /* Conectar MelhorNó na rede */
17      Calcular CaminhoMinimo(MelhorNo, sorvedouro)
18   para todo ( $l \in C$ ) faça
19     /* Busca melhor rota para conectar filhos do nó
20       falho à rede */
21     Calcular CaminhoMinimo( $l$ , sorvedouro)
22 fim

```

- Caso o somatório

$$\sum_{t'=t_{ag}}^t |S_a(t'+1) - S_a(t')|$$

seja igual a 5% de $|S|$, então o Algoritmo Global é chamado;

- OU
- Seja $EC(t)$ a energia consumida pela rede no período t ;
- Caso $ECt/EC(t-1) > 0,05$, ou seja, se a energia consumida no período t for 5% maior que a do período anterior então o Algoritmo Global é chamado,
- Para qualquer uma das opções marque t como o último período onde o Algoritmo Global foi chamado.

Algoritmo 4.3: Algoritmo Híbrido para o PCD-Periódico**Entrada:** S, m, D , RS (raio de sensoriamento), RC (raio de comunicação)

```

1 início
2   /* Gerar solução inicial */
3   Executar Algoritmo Global Periódico
4   enquanto (S ≠ ∅) faça
5     Falha = Verificar Falha de Nós
6     se Falha = VERDADEIRO então
7       /* Chamada do algoritmo local para restaurar
8         cobertura e conectividade */
9       Chamar Algoritmo Local Online
10      /* Exclui nó f do conjunto S */
11      S = S - f
12      se Condição para Executar Algoritmo Global Periódico = Verdadeiro
13      então
14        Executar Algoritmo Global Periódico
15 fim

```

4.3.1 Algoritmos para Comparação

A proposta Híbrida é comparada com uma proposta Global Periódica, que reconstrói a rede toda em tempos predefinidos, e com uma proposta Local *Online*, em que cada falha é tratada localmente. No primeiro caso, o algoritmo só restaura a cobertura e conectividade a cada nova execução e no segundo caso isso acontece assim que as falhas são detectadas.

O Algoritmo Global Periódico trabalha como mostrado no Algoritmo 4.1. Antes de cada nova execução, o conjunto S é atualizado e todos os nós que falharam entre o período atual e a última execução do algoritmo são excluídos. Nos testes realizados, o algoritmo é executado a cada 10 unidades de tempo porque como ele é executado globalmente, ou seja, com toda a rede, seu custo é alto. Por isso, neste procedimento, quando um nó falha, todos os dados gerados por seus filhos na árvore de roteamento não chegam ao nó sorvedouro, caracterizando perdas na cobertura. Além disso, estes nós continuam trabalhando e consumindo energia desnecessariamente.

Para comparar a solução Híbrida com a estratégia local *online*, o Algoritmo Global 4.1 é executado no tempo de simulação 0 para criar uma solução inicial. Então, a cada ocorrência de falha o Algoritmo Local *Online* 4.2 é chamado.

4.3.2 Método de Geração de falhas

Nesta seção é discutida a forma de geração de falhas. É importante verificar o comportamento dos algoritmos sob a possibilidade de falhas, dado que no ambiente das RSSFs as falhas não são exceção, dados os seguintes fatores:

- Baixa robustez dos elementos de rede
- Instabilidade do ambiente, dado que uma RSSF poderá ser estabelecida em uma floresta, cratera vulcânica, campo de guerra, etc.

Para a geração das falhas, foi considerado o seguinte fato: à medida que o tempo passa, aumentam-se as chances de um nó sensor falhar. São várias as razões para isto acontecer, de acordo com variados cenários, como, por exemplo intempéries, problemas de *hardware*, desgaste de bateria, entre outros.

Com base nesta observação, no método de geração de falhas foi considerada uma geração exponencial. A exponencial utilizada começa com 2% de chance de cada nó falhar no início do tempo de vida da rede e alcança 70% no tempo 100. Deve-se observar que em todos os métodos existe a possibilidade de um nó escolhido para falhar já estar fora da rede devido a algum problema anterior (uma falha em algum período $1, 2, \dots, t - 1$ antes do período t atual). Caso isso ocorra, o nó continua em modo de falha, ou seja, nada precisa ser realizado.

O método proposto para geração de falhas, simula falhas elétrica e/ou eletromagnéticas, onde não existe correlação entre os nós em falha. Neste método, existe uma probabilidade fixa de 30% de acontecer falhas a cada unidade de tempo discreta. Caso seja verificado que falhas devem ocorrer, então, para cada nó sensor, é verificado na exponencial a probabilidade de falhar. O Algoritmo 4.4 apresenta, em alto nível, este gerador de falhas.

Algoritmo 4.4: Algoritmo de Geração de Falhas

Entrada: unidade de tempo t

```

1 início
2   se (gerarNumeroUniforme < 0.3) então
3     para todo ( $s \in S_a$ ) faça
4       probabilidade = lerExponencial( $t$ )
5       se (gerarNumeroUniforme < probabilidade) então
6         Sensor  $s$  deve falhar
7   senão
8     Não haverá falha na unidade de tempo  $t$ 
9 fim
```

Onde:

- `gerarNumeroUniforme()`: função que retorna um número entre 0 e 1, através de uma distribuição uniforme.
- `lerExponencial(t)`: esta função retorna o valor da probabilidade de falha no período t , de acordo com a exponencial.

Extensões da abordagem periódica com tratamento multiobjetivo são encontradas em [Martins et al., 2008], [Martins et al., 2009b] e [Martins et al., 2009a].

4.4 Resultados Computacionais

Os testes para a abordagem periódica foram divididos em cinco 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 o Algoritmo Híbrido como alternativa de solução para ambos os modelos.
- Avaliar os algoritmos propostos em ambientes onde, além das falhas por esgotamento de energia, também ocorrem falhas mecânicas.
- 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.

Estes testes pertencem as baterias 1, 2, 3, 4 e 5 respectivamente e são apresentados a seguir.

4.4.1 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 na Seção 4.2 com as duas funções objetivo (Funções 4.1 e 4.9) para identificar as vantagens e desvantagens de cada um deles e para observar qual a influência da energia residual na geração das soluções.

4.4.1.1 Parâmetros de Entrada

Seja o Modelo 1 o modelo matemático cuja função objetivo é calculada pela Função 4.1 e o Modelo 2 pela Função 4.9. 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 $u.e.*t$ 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 $50u.d. \times 50u.d.$

Número de Nós Sensores 36

Raio de Sensoriamento $15u.d.$

Raio de Comunicação $25u.d.$

Precisão de Cobertura $q = 1$

Localização do Sorvedouro Coordenada(0,0).

Número de Pontos de Demanda 2500, que corresponde a 1 ponto de demanda por $(u.d.)^2$.

Número de Períodos 75

Energia da Bateria ou Energia Residual Inicial 1000 $u.e.*t$.

Energia de Ativação 5 $u.e.*t$.

Energia de Manutenção/t 13 $u.e.$

Energia de Recepção/t 2 $u.e.$

Tempo de Transmissão/t 0.25 $u.t.$ o que significa durante um ciclo de operação o nó passa 25% do tempo em modo de transmissão.

Os valores de corrente consumida com transmissão em função da distância utilizados são os mostrados na Tabela 4.1.

O posicionamento dos nós sensores na área de monitoramento foi gerado aleatoriamente com distribuição uniforme.

Raio de Comunicação (u.d.)	Corrente (u.e.)
5,142	8,6
5,769	8,8
6,473	9,0
7,263	9,0
8,150	9,1
9,144	9,3
10,260	9,3
11,512	9,5
12,916	9,7
14,492	9,9
16,261	10,1
18,245	10,4
20,471	10,6
22,969	10,8
25,771	11,1

Tabela 4.1: Corrente consumida com transmissão em função da distância.

4.4.1.2 Métricas de Avaliação

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 energia consumida por um nó sensor em um período t é calculada pela Função 4.1 para as duas variações do modelo.

A energia residual na unidade de tempo t , $ER(t)$, é calculada pela Função 4.12.

$$ER(t) = ER(t - 1) - EC(t) \quad (4.12)$$

Onde $EC(t)$ é a energia consumida no período de tempo t .

A cobertura é dada em função da porcentagem de pontos de demanda cobertos e é calculada pela Função 4.13.

$$Cob(t) = 100 * \frac{|D'_t|}{|D|} \quad (4.13)$$

Onde $|D'(t)|$ é o número de pontos de demanda cobertos no período t e $|D|$ é o número

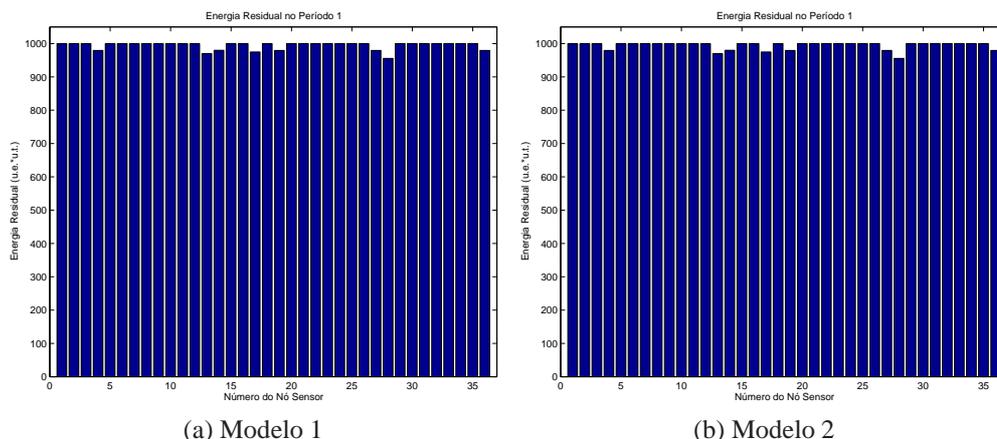


Figura 4.1: Distribuição de Energia Residual no Instante $t = 1$ para uma rede de 36 nós sensores.

total de pontos de demanda na área.

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.

4.4.1.3 Resultados da Bateria 1

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 4.1, 4.2 e 4.3.

Na Figura 4.1 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 4.2 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

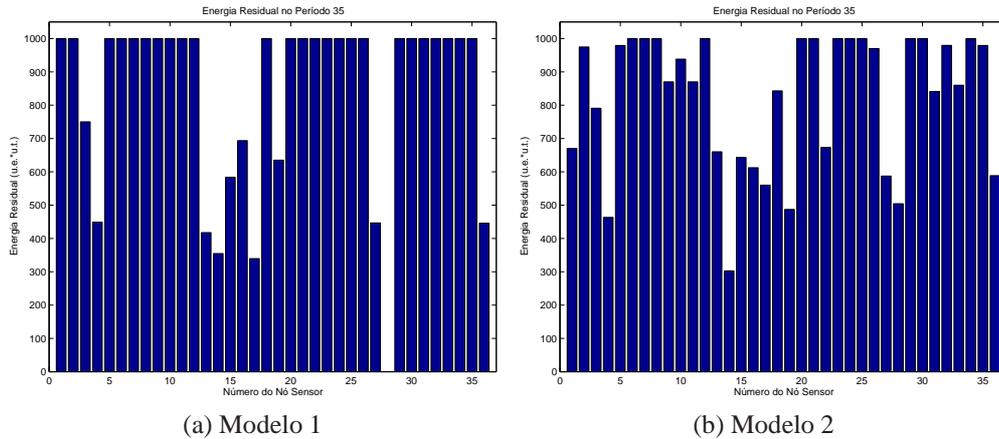


Figura 4.2: Distribuição de Energia Residual no Instante $t = 35$.

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 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 4.3 tem-se que o número de nós com energia esgotada é maior para o Modelo 1 porque como já citado 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 4.4 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 4.5. 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 rede e a um tempo de vida menor.

Em resumo, o Modelo 1 escolhe uma solução e a mantém até que um nó falhe por esgotamento de energia. Não havendo outro tipo de falha na rede, este modelo só precisa ser

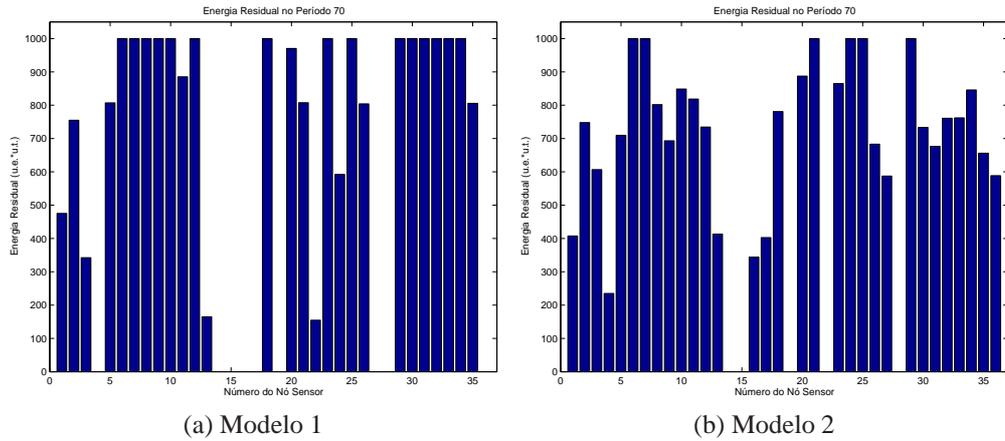


Figura 4.3: Distribuição de Energia das Soluções no Instante $t = 70$.

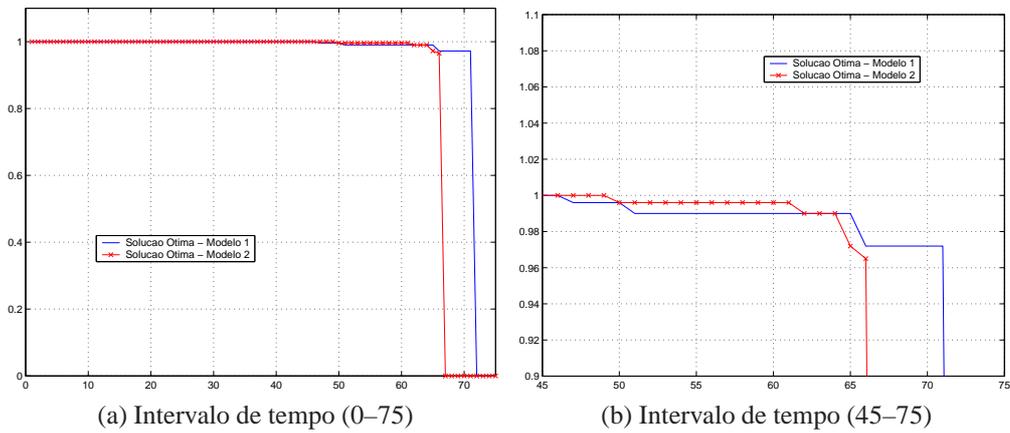


Figura 4.4: Comportamento da Cobertura no tempo para os Modelos 1 e 2 para uma rede de 36 nós sensores

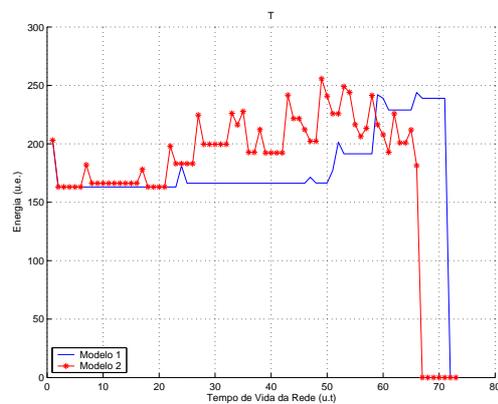


Figura 4.5: Consumo de Energia para os Modelos 1 e 2 para uma rede de 36 nós sensores

Instância	Modelo 1	Modelo 2
t3650	71	66
t4950	116	109
t6450	149	140
t8150	187	182
t10050	240	223

Tabela 4.2: Tempo de Vida da Rede para os Modelos 1 e 2

executado novamente quando um nó tiver que ser excluído do conjunto de nós disponíveis por não possuir energia residual. Este procedimento não é adequado para o Modelo 2 porque o interessante para este modelo é manter a rotatividade entre os nós. Quando o Modelo 2 é executado só quando ocorrem falhas por falta de energia, o tempo de vida esperado para a rede foi muito menor do que para o Modelo 1 porque o custo de ativação contribuiu para esgotar ainda mais rápido a energia de nós essenciais para a conectividade da rede. Neste caso, dependendo da aplicação, o custo do Modelo 2 pode ser maior em termos de mensagens de controle na rede porque ele deve ser executado mais vezes. Por sua vez o Modelo 1 pode escolher nós com energia residual muito baixa e levar a falhas não muito depois da geração da solução.

O tempo de vida da rede, que corresponde ao último período em que há alguma cobertura e conectividade na rede, para 5 configurações de redes é mostrado na Tabela 4.2. 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.

4.4.2 Bateria de Testes 2 : Avaliação do Algoritmo Híbrido

O objetivo da Bateria de Testes 2 é avaliar o Algoritmo Híbrido proposto. Para isso ele é comparado a solução ótima obtida pela resolução dos Modelos 1 e 2 pelo *software* CPLEX, ao Algoritmo Global resolvido periodicamente e ao Algoritmo Local *Online* Puro.

4.4.2.1 Parâmetros de Entrada

Os parâmetros de entrada desta bateria são os mesmos apresentados na Bateria 1.

As instâncias de testes são apresentadas na Tabela 4.3. O conjunto de nós de cada instância é composto pelos nós da instância imediatamente inferior acrescido de n nós, onde

Instância	Número de Nós
t3650	36
t4950	49
t6450	64
t8150	81
t10050	100

Tabela 4.3: Instâncias de teste para a Bateria 2

n é a diferença de nós entre as instâncias.

4.4.2.2 Métricas de Avaliação

As métricas para avaliação e comparação dos algoritmos são cobertura, energia residual e energia consumida.

A cobertura é calculada pela Função 4.13. A energia residual foi calculada como mostrado na seção 4.4.1 e a energia consumida corresponde a estimativa do consumo de todos os nós ativos na solução, independente dele estar conectado a rede ou não.

4.4.2.3 Resultados da Bateria de Testes 2

Os gráficos das Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam os resultados obtidos para os algoritmos e solução ótima do modelo 1, ou seja, sem considerar-se a energia residual.

Com relação à energia consumida, o Algoritmo Local *Online* apresenta um desempenho muito ruim, pois sua visão local da rede leva à ativação de mais nós do que o necessário, aumentando o consumo de energia, principalmente quando comparado aos outros algoritmos. Uma consequência do alto consumo é o aumento no número de falhas por falta de energia. O Algoritmo Global Periódico é o melhor neste quesito (em detrimento do quesito cobertura, como será comentado em seguida) porque sua visão global da rede leva a soluções melhores mas também porque ela não ativa nós para suprir a cobertura no instante em que ocorrem falhas (falhas de cobertura não são critérios para sua execução). O Algoritmo Híbrido apresenta um comportamento intermediário. Este comportamento se repete para o quesito energia residual.

Com relação à cobertura o Algoritmo Global Periódico atinge níveis elevados de cobertura assim que executado, mas, nos períodos entre os acionamentos, a cobertura cai para patamares muito baixos em virtude das falhas. De fato, o algoritmo economiza energia da rede, como mostrado pelas Figuras 4.6, 4.7 e 4.8, mas faz isto em detrimento da cobertura. O Algoritmo Híbrido apresenta um desempenho muito bom. Sua cobertura se mantém muito próxima à do Algoritmo Global Periódico no momento de seu acionamento, porém

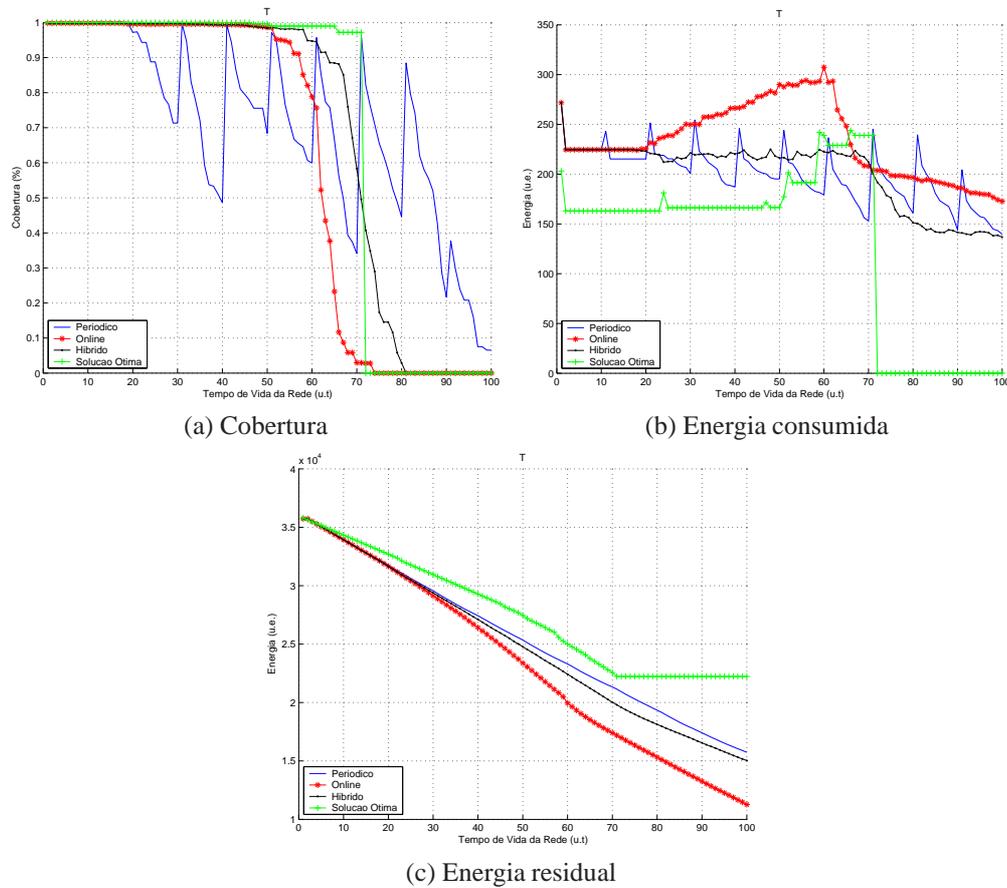


Figura 4.6: Comparação entre os Algoritmos Híbrido, Global Periódico, *Online* Puro e a Solução Ótima para o modelo 1 e para a instância t3650.

ele mantém este desempenho de forma mais regular. O Algoritmo Local *Online* apresenta um desempenho muito ruim, pois, à medida que vai ativando nós para resolver os problemas locais, ele aumenta o consumo de energia da rede, o que é agravado pelo fato deste algoritmo não desligar nós sensores. Isto faz com que os nós comecem a falhar por falta de energia, e finalmente isto resulta numa perda de cobertura.

A solução ótima apresenta os melhores resultados em termos de consumo de energia e cobertura por um período de tempo, porém por manter a melhor cobertura possível em todos os períodos passa a consumir mais energia quando os algoritmos passam a não garantir cobertura total e em consequência disso tem seu tempo de vida reduzido. Apesar disto sua solução é um excelente parâmetro de comparação quando a cobertura é prioridade.

O gráfico da Figura 4.9 mostra uma grande vantagem do Algoritmo Híbrido. Além de não depender de um *software* dedicado tem um tempo de execução bem inferior ao CPLEX para obter a solução ótima.

Os gráficos das Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam os resultados obtidos para os

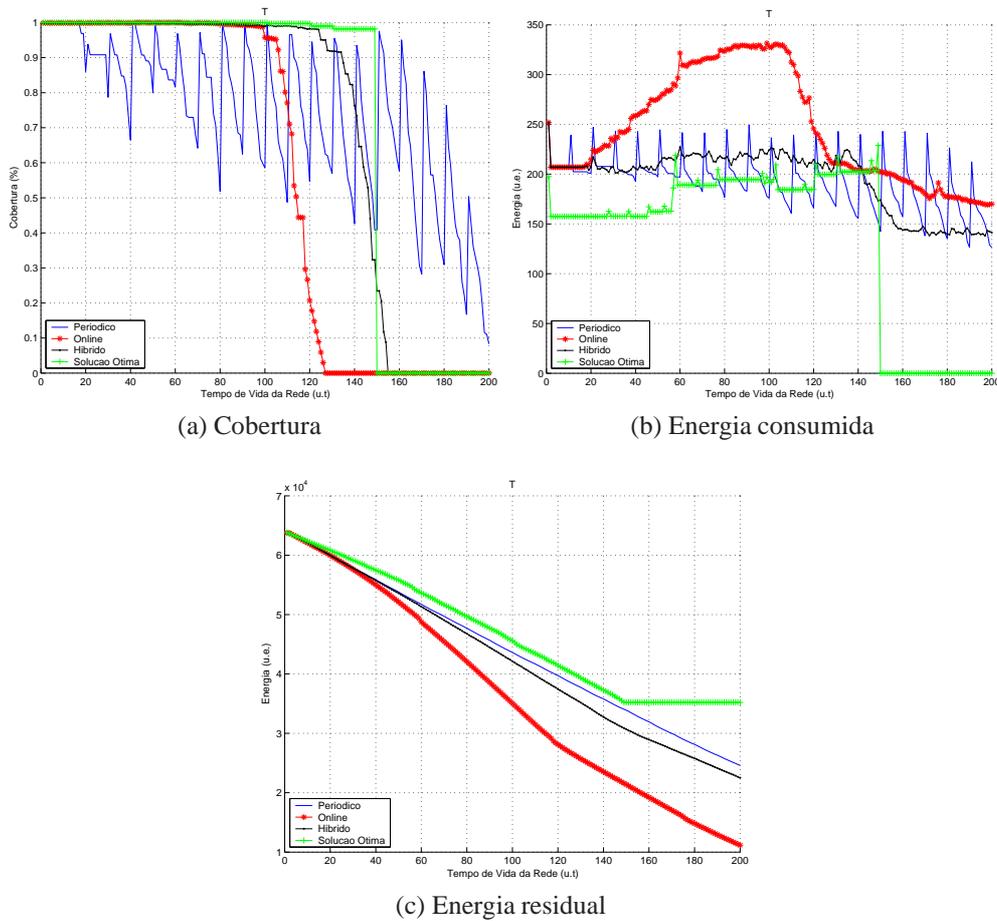


Figura 4.7: Comparação entre os Algoritmos Híbrido, Global Periódico, *Online* Puro e a Solução Ótima para o modelo 1 e para a instância t6450.

algoritmos e modelo considerando-se a energia residual.

A solução ótima serve como parâmetro de comparação para os algoritmos principalmente em relação a melhor cobertura possível em um dado instante e ao menor consumo de energia possível para manter esta cobertura. Em relação ao tempo de vida seu desempenho só é superior ao algoritmo *Online* porque ao manter a cobertura máxima possível em todos os períodos seu consumo de energia é aumentado e seu tempo de vida abreviado. Isto acontece porque o modelo matemático foi concebido para priorizar a cobertura. Porém se a prioridade for modificada para por exemplo o tempo de vida com uma cobertura acima de uma determinado limiar, o modelo por ser modificado para atender estes novos critérios.

O gráfico da Figura 4.13 compara a energia consumida pela solução ótima para redes com 36, 49, 64, 81 e 100 nós sensores onde cada rede é formada pelos nós da rede imediatamente inferior mais n nós, onde n é a diferença entre o número de nós destas redes. Conforme esperado quanto maior o número de nós menor o consumo de energia uma

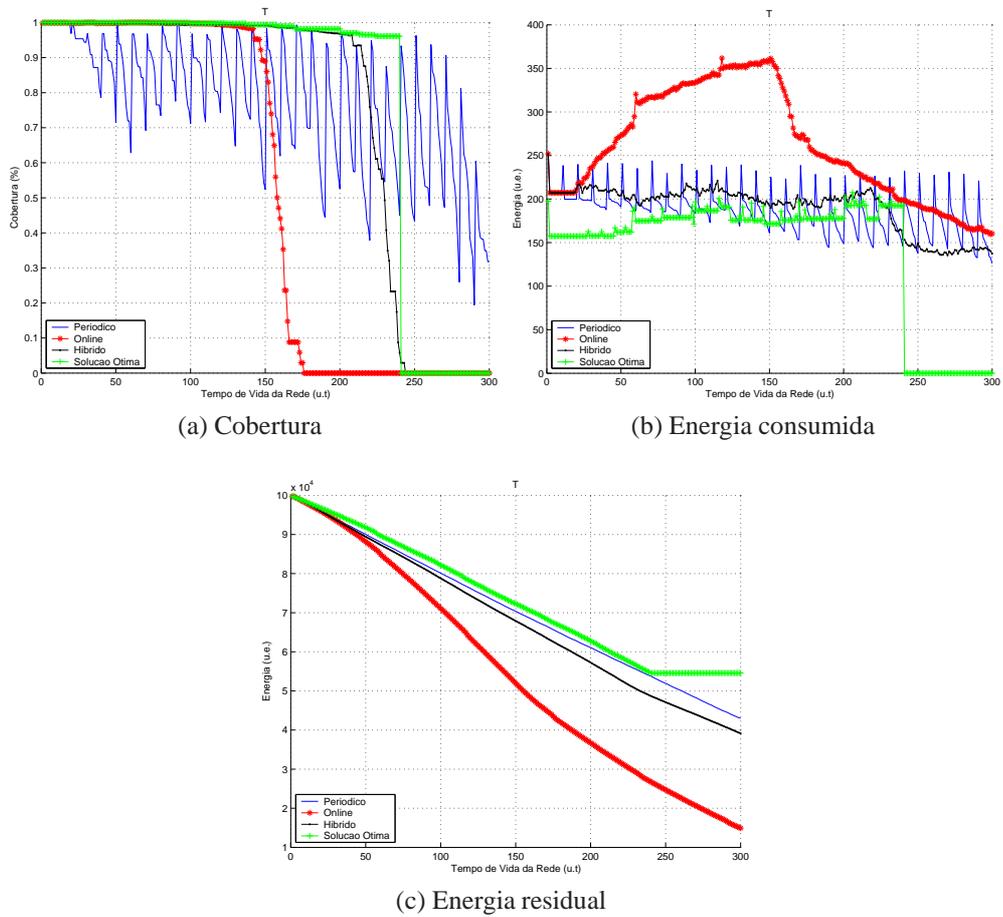


Figura 4.8: Comparação entre os Algoritmos Híbrido, Global Periódica, *Online* Puro e a Solução Ótima para o modelo 1 e para a instância t10050.

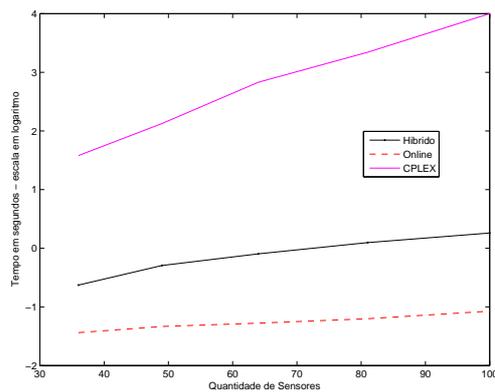


Figura 4.9: Comparação entre os tempos de execução dos Algoritmos Híbrido, *Online* Puro e a Solução Ótima para o modelo 1.

vez que a solução de uma rede será pelo menos igual a da instância imediatamente menor porque todos os seus nós pertencem as instâncias maiores. A melhora pode ocorrer não só

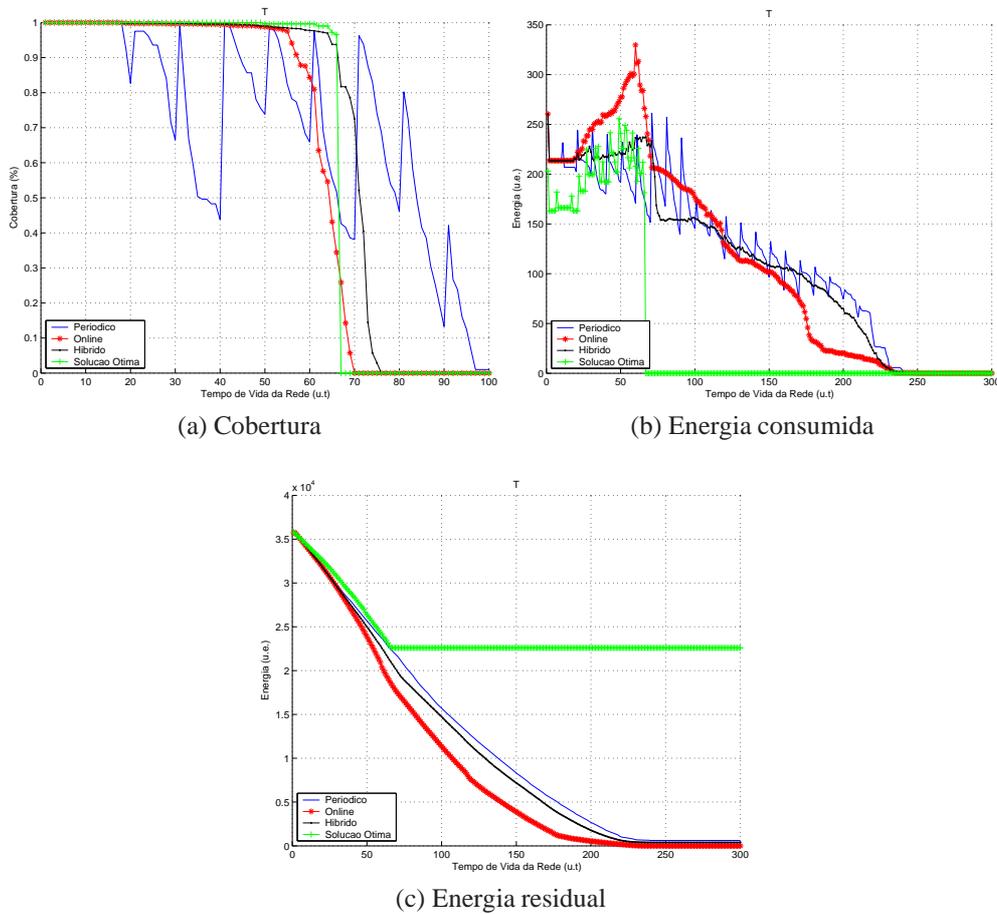


Figura 4.10: Comparação entre os Algoritmos Híbrido, Global Periódico, *Online* Puro e a Solução Ótima para o modelo 2 e para a instância t3650.

porque existem mais nós candidatos para compor a solução mas principalmente porque os novos nós podem estar em posições que melhorem a cobertura e o consumo de energia com transmissão.

4.4.3 Bateria de Testes 3 : Avaliação dos Algoritmos Propostos em um ambiente com falhas

O objetivo desta Bateria é avaliar os Algoritmos Híbrido, Global Periódico e *Online* Puro em ambientes onde ocorrem falhas elétricas e/ou eletromagnéticas além das falhas por falta de energia. A função objetivo avaliada é a do modelo 1 que é descrita na Função 4.1. As falhas elétricas e/ou eletromagnéticas são geradas por um Simulador de Falhas conforme descrito na Seção 4.3.

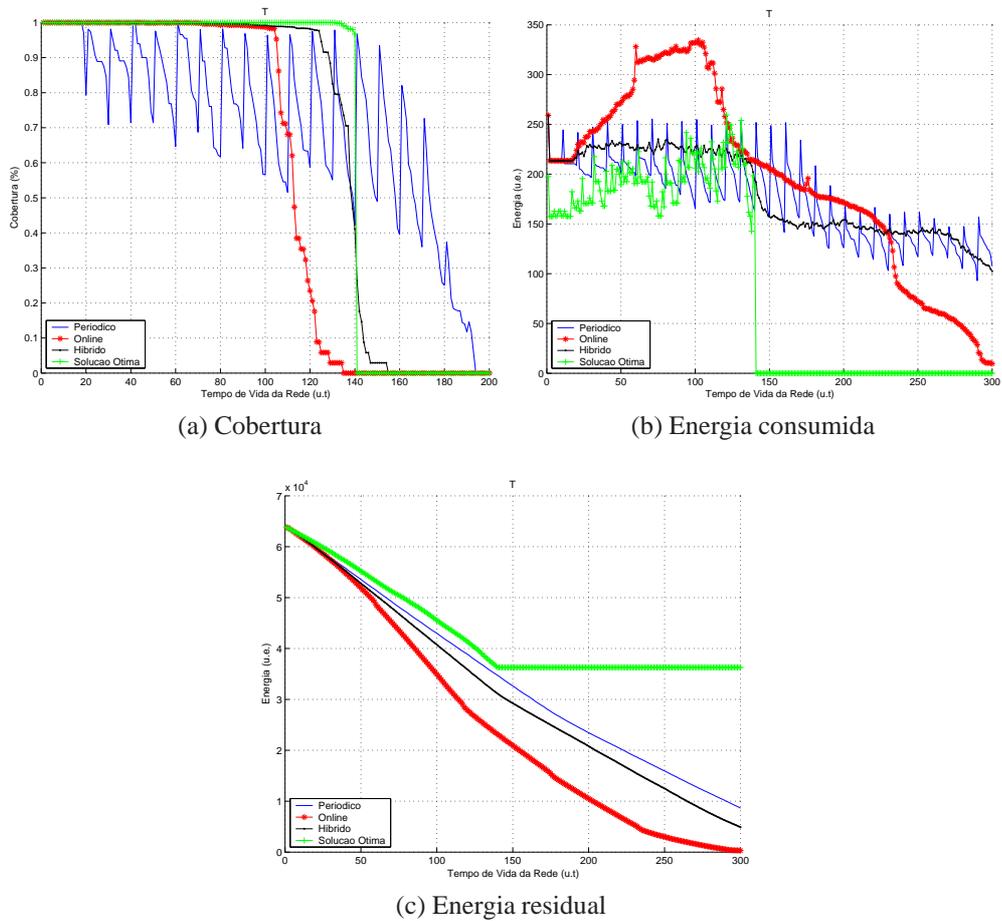


Figura 4.11: Comparação entre os Algoritmos Híbrido, Global Periódico, *Online* Puro e a Solução Ótima para o modelo 1 e para a instância t6450.

4.4.3.1 Parâmetros de Entrada

Os parâmetros de entrada para a Bateria 3 são os mesmos utilizados na Bateria 2. A geração de falhas segue o Algoritmo 4.4.

4.4.3.2 Métricas de Avaliação

As métricas de avaliação são cobertura, energia consumida e energia residual.

4.4.3.3 Resultados da Bateria de Testes 3

Os gráficos das Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 apresentam os resultados obtidos para os algoritmos Híbrido, Global Periódico e *Online* Puro e para a Solução Ótima do modelo 1. Para este último o procedimento consiste em se gerar uma nova solução toda vez que uma falha acontece, seja ela por falta de energia ou mecânica.

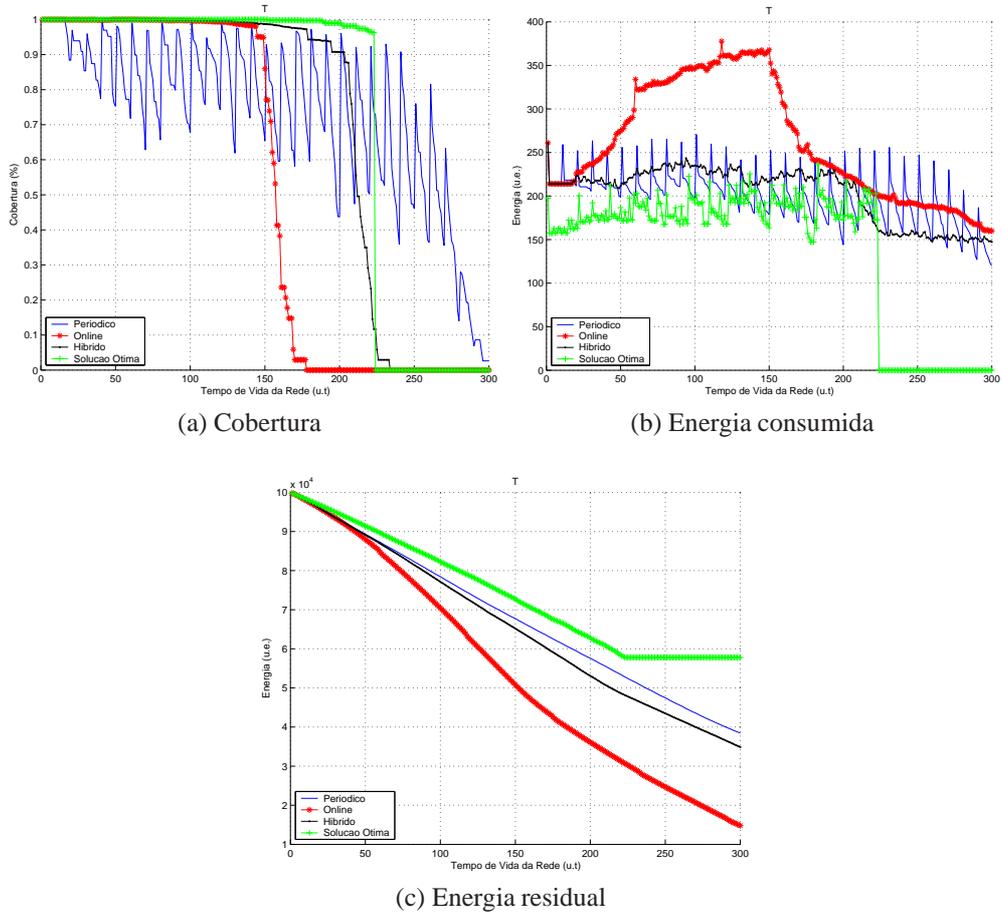


Figura 4.12: Comparação entre os Algoritmos Híbrido, Global Periódico, *Online* Puro e a Solução Ótima para o modelo 1 e para a instância t10050.

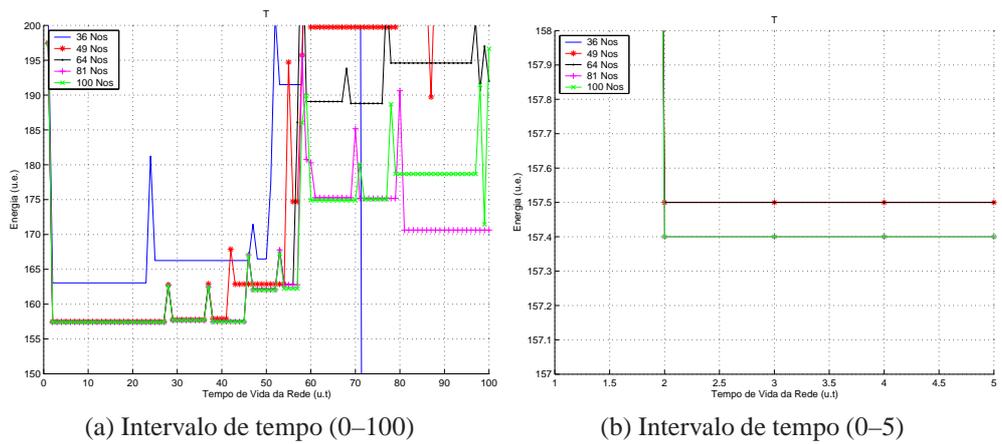


Figura 4.13: Comparação entre as Energias Consumidas da Solução Ótima para o Modelo 1 e instâncias t3650, t4950, t6450, t8150 e t10050.

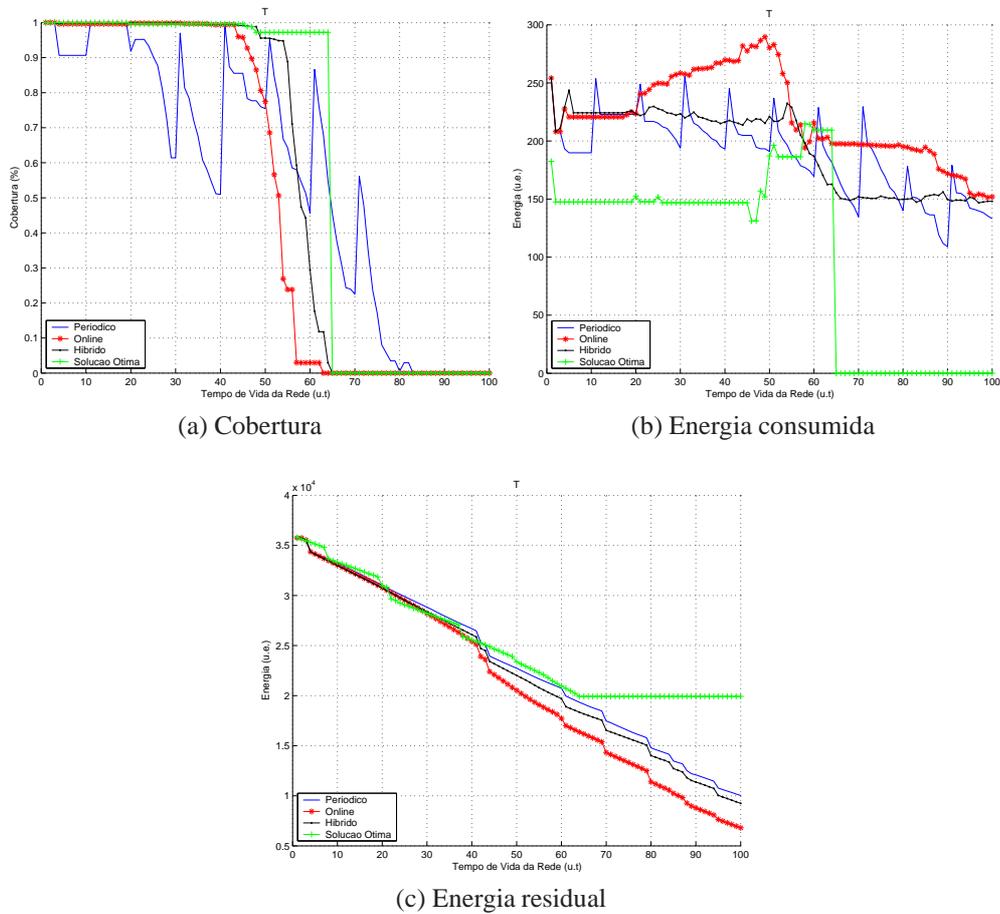


Figura 4.14: Comparação entre os Algoritmos Híbrido, Global Periódico e *Online* Puro para o modelo 1 e para a instância t3650 em um ambiente com falhas.

Um comportamento similar ao obtido na Bateria 2 é observado. O melhor consumo entre os algoritmos é do Algoritmo Global seguido pelo Algoritmo Híbrido e Algoritmo *Online*. Por outro lado o Algoritmo Global tem os piores resultados em relação a cobertura e este fato é agravado pelas falhas elétricas e/ou eletromagnéticas exatamente porque ele não as trata assim que elas acontecem. Para o Algoritmo *Online* um número maior de falhas leva a mais ativações do algoritmo para tratá-las e por sua vez sua visão local leva a um aumento no número de nós ativos e no consumo de energia da rede, abreviando seu tempo de vida. O Algoritmo Híbrido tem o melhor desempenho quando considera-se o aspecto Energia Consumida x Cobertura.

O comportamento da solução ótima é similar ao obtido em um ambiente sem falhas elétricas e/ou eletromagnéticas mostrado na Bateria de Testes 2. Ela mantém a melhor cobertura possível com o menor consumo para mantê-la porém tem o tempo de vida comprometido, quando comparada aos Algoritmos Híbrido e Global Periódico. Ainda sim funciona como

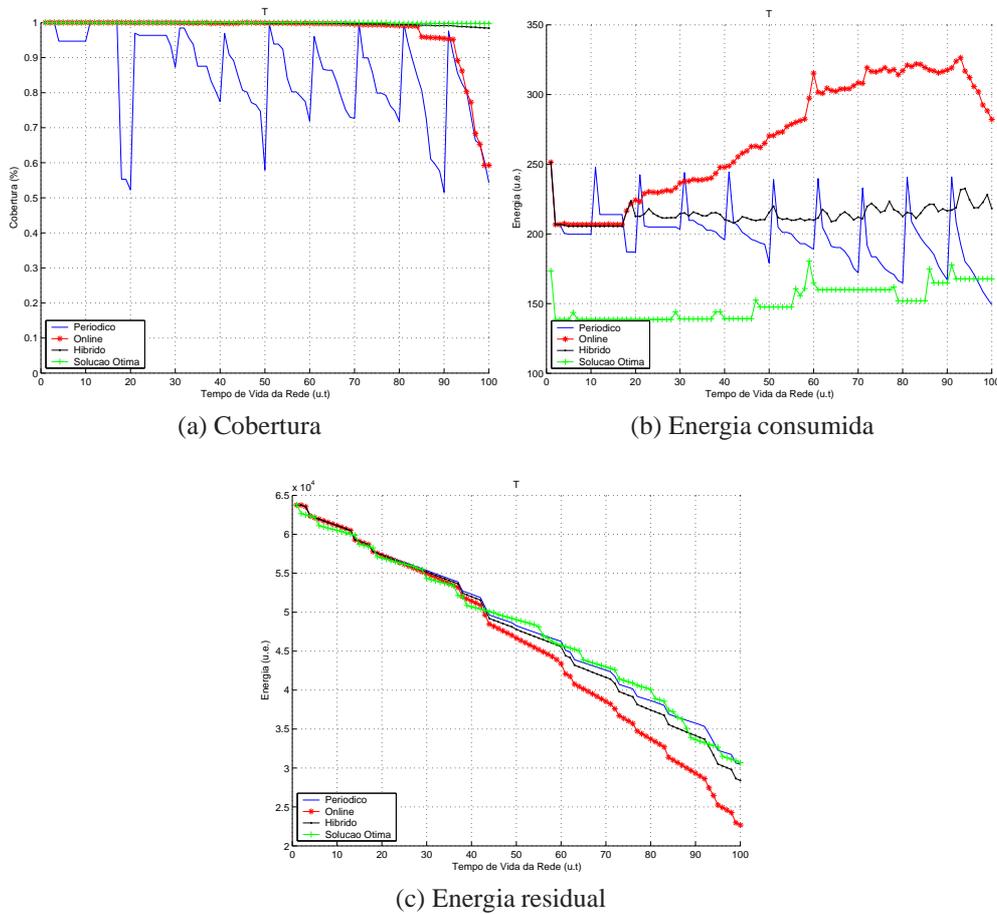


Figura 4.15: Comparação entre os Algoritmos Híbrido, Global Periódico e *Online* Puro para o modelo 1 e para a instância t6450 em um ambiente com falhas.

um limite inferior para o consumo principalmente para os primeiros períodos.

Nos testes apresentados considera-se que toda falha de nó sensor é detectada e que não existem problemas com falsos positivos, ou seja, não existem problemas de interpretação do que é, e do que não é, uma falha. Em ambientes reais, a instabilidade na comunicação pode levar a problemas de falsos positivos e falsos negativos na detecção de falhas comprometendo o desempenho das abordagens. O primeiro problema leva a acionamentos desnecessários tanto do Algoritmo Híbrido quanto do *Online* e o segundo leva estes algoritmos a se comportarem como o Algoritmo Global Periódico, ou seja, não tratar falhas quando elas ocorrem. Uma maneira de minimizar este problema é apresentada por Nakamura et al. [2005a], Nakamura et al. [2005b] e Nakamura et al. [2007a] com a proposta de se utilizar ferramentas de inferência para aprimorar a detecção das falhas.

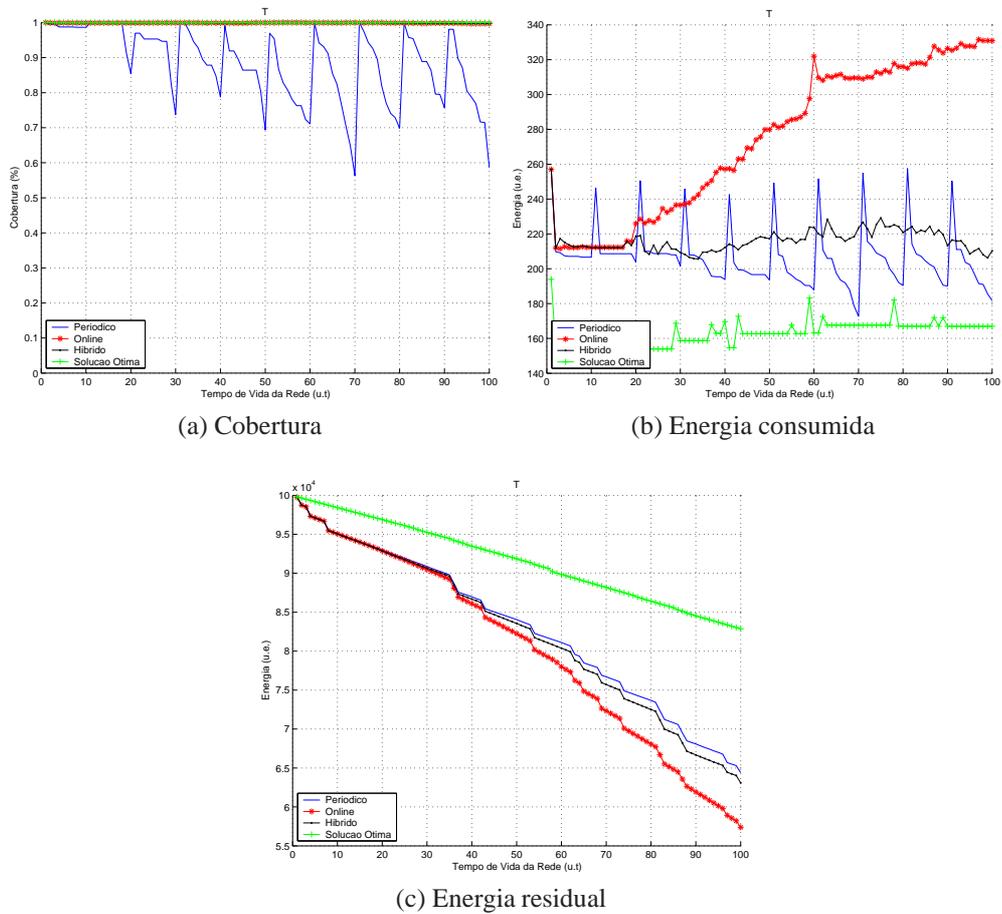


Figura 4.16: Comparação entre os Algoritmos Híbrido, Global Periódico e *Online* Puro para o modelo 1 e para a instância t10050 em um ambiente com falhas.

4.4.4 Bateria de Testes 4 : Avaliação da Influência do Sorvedouro no tempo de vida da rede

Esta bateria de testes verifica qual o impacto da localização do sorvedouro no tempo de vida da rede. Como o objetivo na rede de sensores é coletar dados da aplicação e disseminar estes dados até um ponto de acesso da rede, a conectividade entre os nós sensores e o nó sorvedouro é essencial para o bom funcionamento da rede.

4.4.4.1 Parâmetros de Entrada

Os testes desta bateria utilizam os mesmos parâmetros de entrada da Bateria 2.

4.4.4.2 Métricas de Avaliação

As métricas de avaliação são cobertura, energia consumida e tempo de vida da rede.

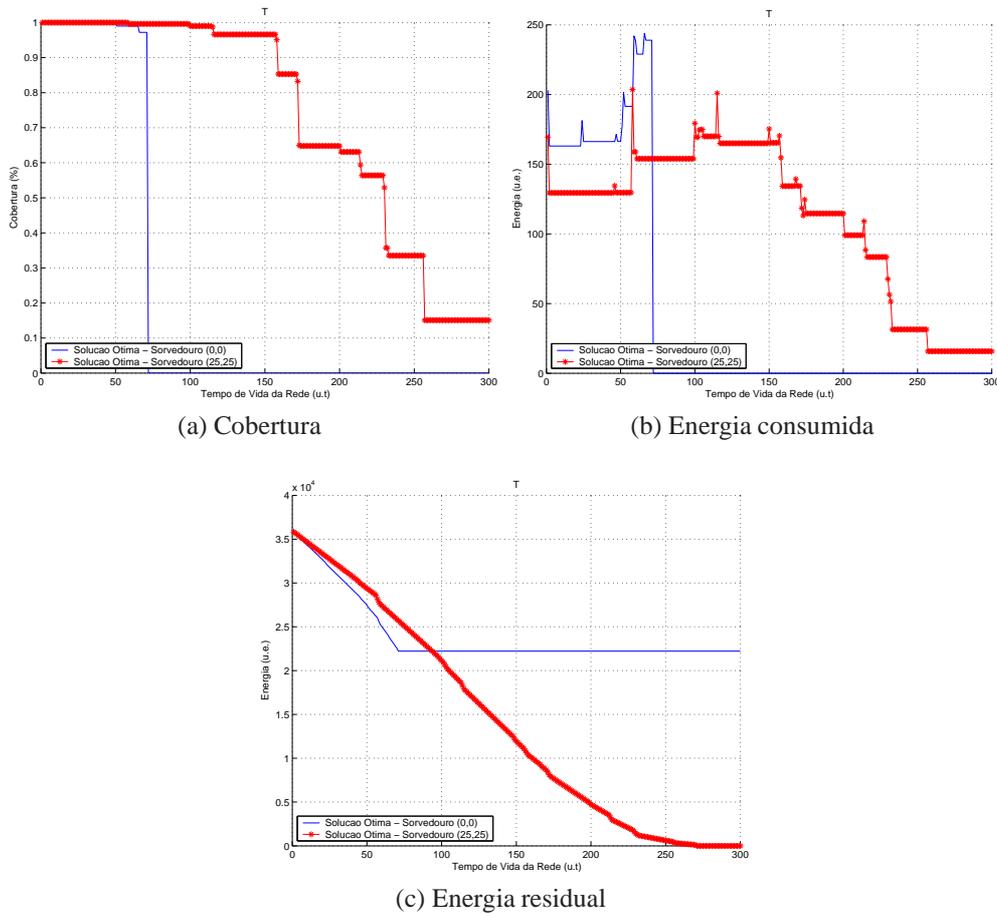


Figura 4.17: Comparação entre a Solução Ótima para o modelo 1 e para a instância t3650 com os Sorvedouro nas Posições (0,0) e (25,25).

4.4.4.3 Resultados da Bateria de Testes 4

Os gráficos das Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 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 ao 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

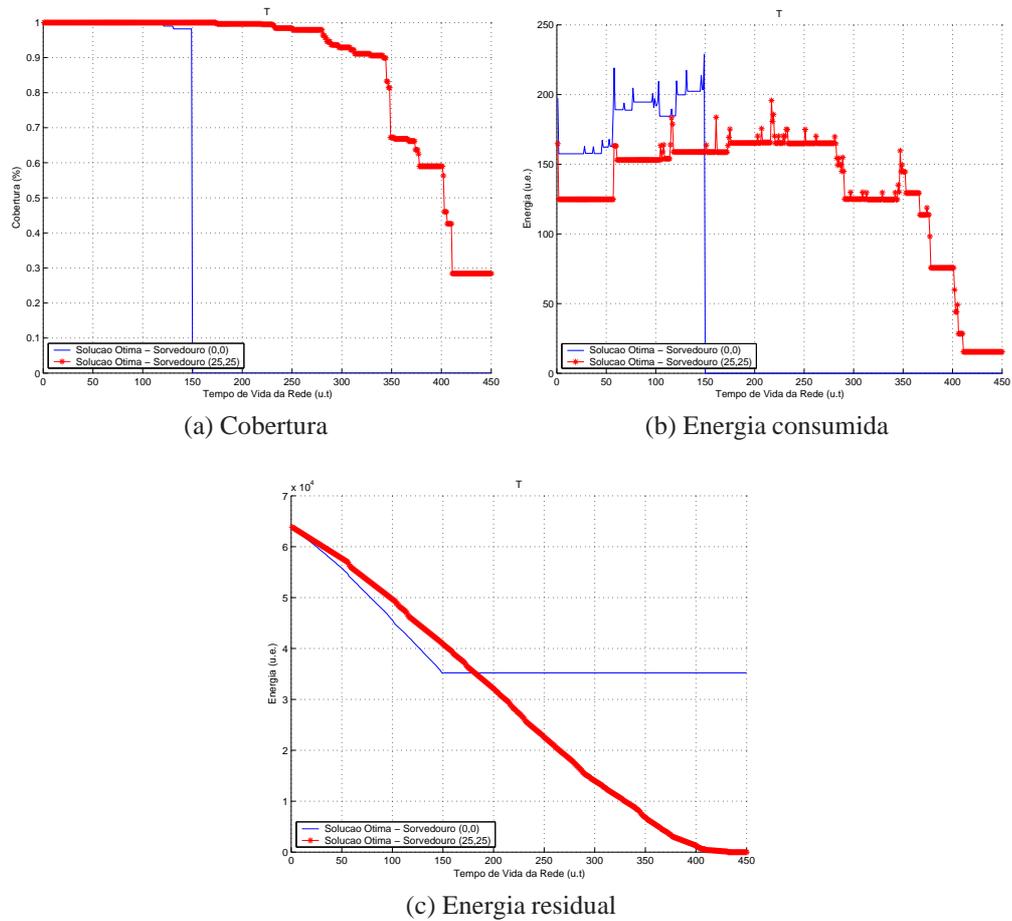


Figura 4.18: Comparação entre a Solução Ótima para o modelo 1 e para a instância t6450 com os Sorvedouro nas Posições (0,0) e (25,25).

os problemas de perda de conectividade por esgotamento de energia dos nós roteadores e gera rotas menores e mais baratas em termos de consumo de energia. A conectividade dos nós com o sorvedouro para as duas situações é mostrada na Figura 4.20. Nesta figura são apresentados apenas os nós que se conectam diretamente ao nó sorvedouro.

O tempo de vida da rede em cada uma das soluções é mostrado na Tabela 4.4. Porém como para o sorvedouro na posição (25,25) a cobertura no final é muito baixa, menos de 35%, também é mostrado o período em que ela fica abaixo de 80%. Para o sorvedouro na posição (0,0) este problema de baixa cobertura não acontece, pois a rede perde a cobertura bruscamente.

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.

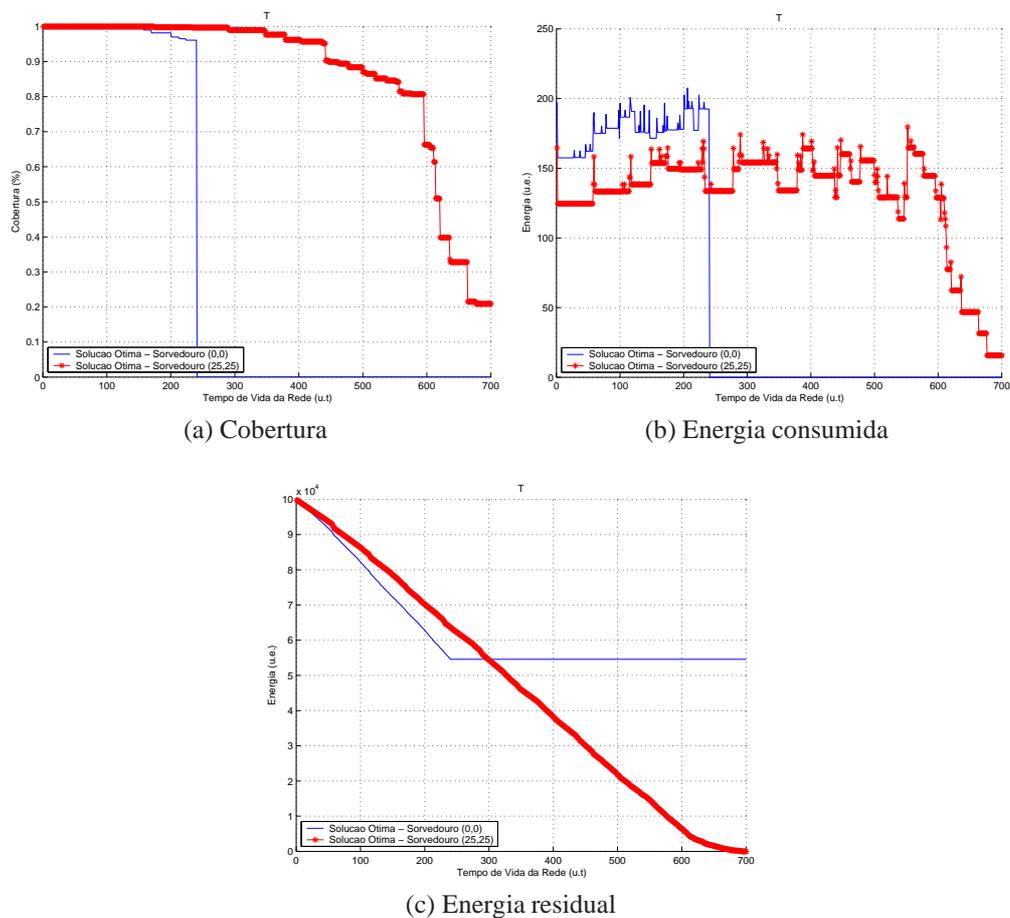


Figura 4.19: Comparação entre a Solução Ótima para o modelo 1 e para a instância $t10050$ com os Sorvedouro nas Posições (0,0) e (25,25).

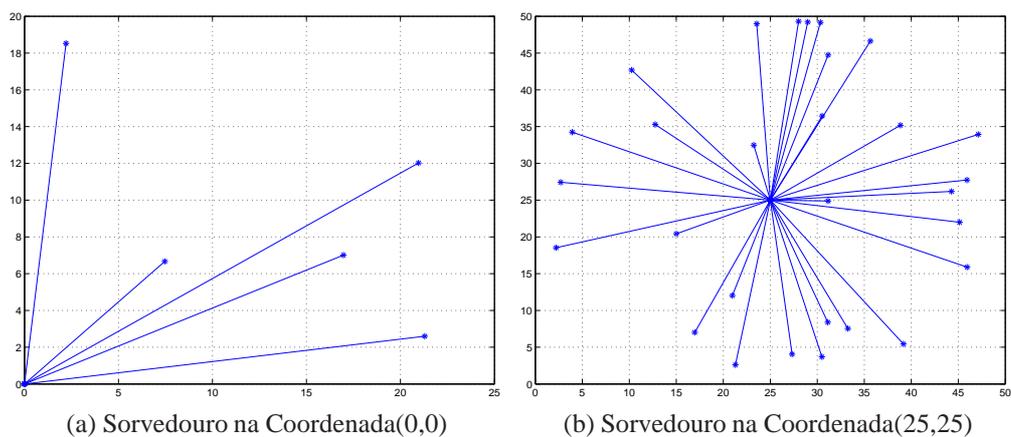


Figura 4.20: Conectividade entre nós sensores e o nó sorvedouro.

Instância	Tempo de Vida Sorvedouro(0,0) (u.t)	Tempo de Vida Sorvedouro(25,25) (u.t.)	Tempo de Vida Sorvedouro (25,25) u.t. Cobertura > 80%
t3650	71	271	172
t4950	116	371	257
t6450	149	432	348
t8150	187	578	486
t10050	240	693	595

Tabela 4.4: Tempo de Vida em Relação a Posição do Sorvedouro

4.4.5 Bateria de Testes 5: Comparação entre as Abordagens Multiperíodo e Periódica

A Bateria de Testes 5 foi idealizada para verificar em que condições o Modelo Multiperíodo apresentado no Capítulo 3 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. Como já citado, 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 da abordagem periódica e com o consumo de energia.

4.4.5.1 Parâmetros de Entrada

Área de Monitoramento $10u.d. \times 10u.d.$

Localização do Sorvedouro Coordenada(5,5).

Número de Pontos de Demanda 100, que correspondem a 1 ponto de demanda por $(u.d.)^2$.

Raio de Sensoriamento $2u.d.$

Raio de Comunicação $3u.d.$

Precisão de Cobertura $q = 1$

Número de Períodos do Modelo Periódico 150.

Número de Períodos do Modelo Multiperíodo 2, 3 e 6.

Energia da Bateria 400 u.e*t.

Energia de Ativação 10 u.e*t.

Energia de Manutenção/t 1.2 u.e./u.t.

Energia de Recepção/t 0.4 u.e./u.t.

Tempo de Transmissão/t 0.02 u.t. o que significa durante um ciclo de operação nó passa 2% do tempo em modo de transmissão.

Duração do Período do Modelo Periódico 1 u.t.

Duração dos Períodos do Modelo Multiperíodo 75, 50 e 25 u.t. para 2, 3 e 6 períodos respectivamente, totalizando 150 u.t. para cada caso.

Penalidade de Não Cobertura - EH 1000

Os valores de corrente consumida com transmissão em função da distância máxima que deseja-se alcançar são mostrados na Tabela 3.1.

4.4.5.2 Métricas de Avaliação

As métricas de avaliação são cobertura, energia consumida e a energia residual da rede.

4.4.5.3 Resultados da Bateria de Testes 5

Os gráficos da Figura 4.21 apresentam o resultado dos testes realizados para a instância com 40 nós. O teste incluiu o modelo periódico resolvido em 150 períodos cada um com duração de 1 u.t., com e sem controle de densidade (CD), e o modelo multiperíodo com 2, 3 e 6 períodos com duração de 75 u.t., 50 u.t. e 25 u.t. respectivamente, mantendo-se o tempo de vida total em 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

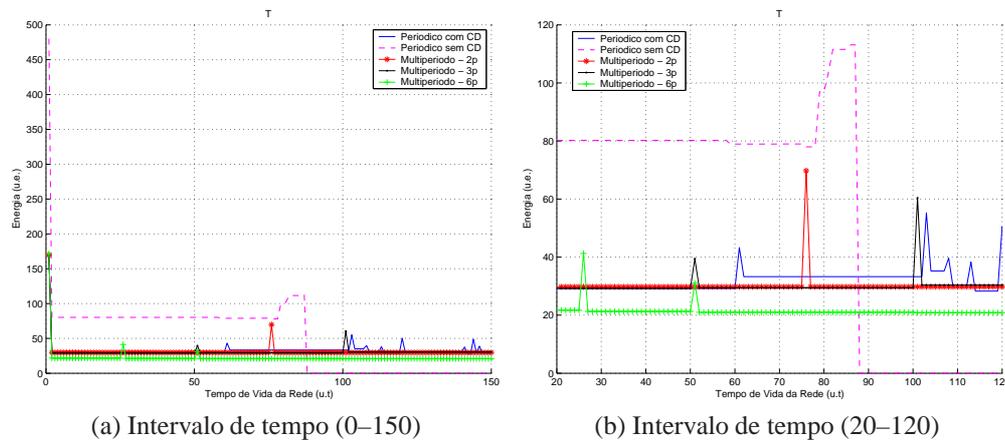


Figura 4.21: Comparação entre as Energias Consumidas pelos Modelos Periódico e Multiperíodo para a instância t4010

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. Os gráficos de cobertura não foram apresentados porque para todas as soluções a cobertura foi total durante todos os 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 4.5. 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 ao seu propósito de apresentar um limite inferior, em termos de energia consumida e falha de cobertura, para a abordagem periódica e conforme mencionado quanto maior o número de períodos usados na abordagem multiperíodo 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 4.22 mostram um exemplo onde isto não acontece. O gráfico 4.22(a) mostra que a cobertura do modelo multiperíodo neste caso não é a melhor. O gráfico 4.22(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 ati-

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 4.5: Consumo Total e Falha de Cobertura Média para a instância t4050 para as Abordagens Multiperíodo e Periódica

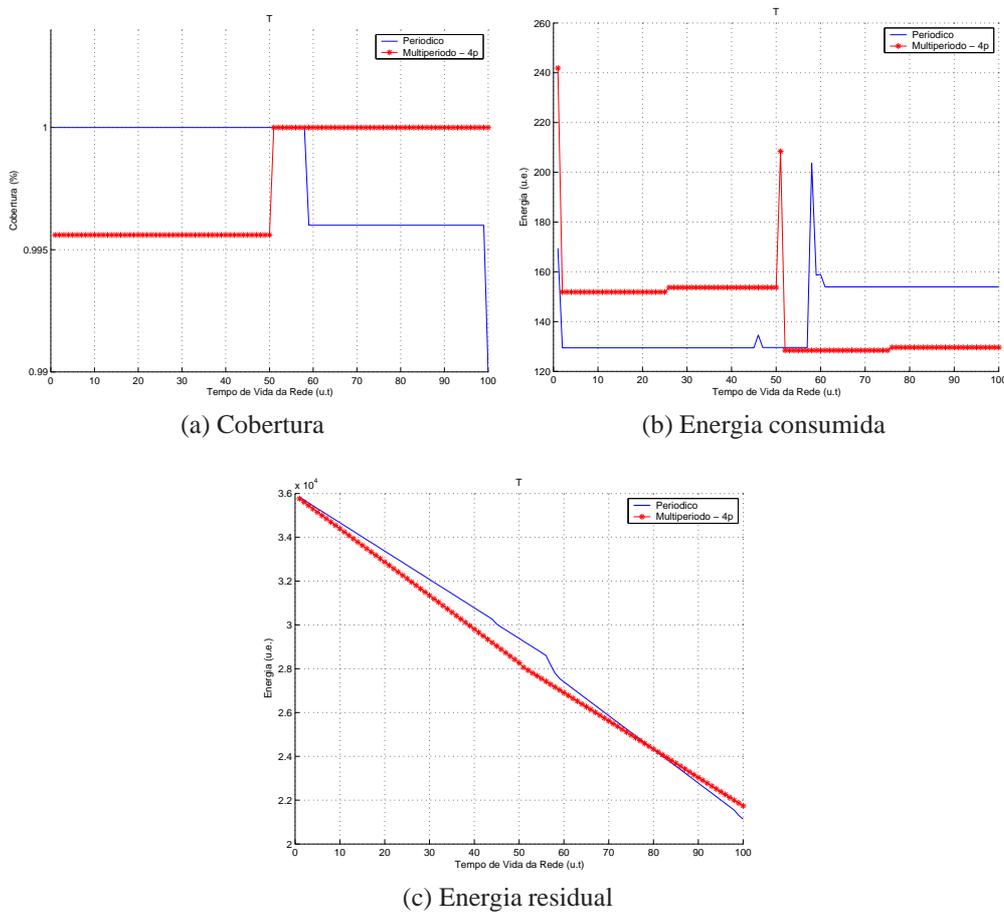


Figura 4.22: Comparação entre os Modelos Periódico e Multiperíodo para a instância t3650

vados levando a falhas na cobertura maiores que o modelo periódico, ou 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 4.6. Neste caso a abordagem multiperíodo não pode ser utilizada com limite inferior para a periódica porque obteve resultados piores tanto em termos de

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

Tabela 4.6: Consumo Total e Falha de Cobertura Média para a instância t3650 para as Abordagens Multiperíodo e Periódica

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.

4.5 Considerações Finais

Este capítulo apresenta um modelo matemático de Programação Linear Inteira para resolver o Problema de Controle de Densidade em Redes de Sensores sem Fio (PDC-RSSF) Periódico, com duas variações para a função objetivo. A abordagem periódica consiste em gerar uma solução para o PCD-RSSF em um determinado instante de tempo e depois repetir este procedimento periodicamente.

A diferença entre as funções objetivo é que a primeira minimiza a energia consumida pelos nós ativos da rede e a segunda minimiza a relação entre a energia consumida pelos nós ativos da rede e a energia residual destes nós. Cada modelo possui vantagens e desvantagens que devem ser avaliadas em função das necessidades da aplicação. Porém, como se trata de um problema combinatório é proposto um Algoritmo Híbrido para resolver o PDC-RSSF Periódico. O Algoritmo Híbrido utiliza um procedimento Global Periódico, que reconstrói toda a rede quando requerido pela aplicação, e um Local *Online*, que tenta restaurar localmente a cobertura e conectividade da rede, a cada ocorrência de falhas.

Os testes foram divididos em 5 baterias para que se fossem testados diversos aspectos referentes à abordagem. A bateria de testes 1 compara a influência da energia residual na composição da solução 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. Isto acontece porque enquanto um mesmo conjunto de nós estiver disponível a solução ótima será sempre a mesma. 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. Por outro lado a cobertura é melhor e esta estratégia diminui o número de falhas por falta de energia logo após que uma solução é gerada por incluir na solução nós com baixa energia residual apenas quando estritamente necessário. Como em geral é desejável um tempo de vida maior com menor consumo de energia, deve-se escolher o modelo 1. Porém, se a prioridade é a cobertura, o modelo 2 é mais adequado.

A bateria 2 avalia o Algoritmo Híbrido proposto. Este algoritmo é comparado com uma estratégia Global Periódica, que reconstrói a rede em instantes de tempo predefinidos, e com uma estratégia que utiliza o Algoritmo Local *Online* para se recuperar de falhas de nós à medida em que elas ocorrem. Os resultados mostram que a combinação das estratégias global e local leva a soluções melhores do que quando elas são utilizadas separadamente, uma vez que a proposta híbrida se beneficia das vantagens dos dois algoritmos.

A bateria 3 testa os algoritmos propostos em um ambiente com falhas elétricas e/ou eletromagnéticas, além das falhas por esgotamento de energia. O comportamento básico dos três algoritmos é o mesmo obtido na Bateria 2 porém há uma piora nos Algoritmos Global e Local *Online*, porque no primeiro caso o aumento do número de falhas de nós piora significativamente a cobertura porque este algoritmo não trata falha assim que acontece e no segundo caso porque o aumento do número de falhas aumenta o número de chamadas do algoritmo levando a um aumento desnecessário no número de nós ativos em virtude de sua característica local.

A bateria de testes 4 verifica a influência da localização dos sorvedouros no tempo de vida da rede e conclui que, se for possível, 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 a bateria 5 compara a abordagem periódica à abordagem multiperíodo apresentado no capítulo anterior e verifica 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. Nesta bateria ainda é comparado às duas abordagens o desempenho da rede sem controle de densidade.

Capítulo 5

Considerações Finais

5.1 Conclusões

O objetivo desta tese é tratar o Problema de Controle de Densidade em Redes de Sensores sem Fio aqui denominado PCD-RSSF. Este problema consiste em, dado um conjunto de nós sensores, escolher um subconjunto de nós que atenda um ou mais requisitos da aplicação e que ao mesmo tempo otimize um ou mais aspectos da rede como por exemplo, o consumo de energia. Esta visão estática é estendida para um ambiente dinâmico onde, entre outros, fatores como capacidade de energia dos nós sensores e falhas são adicionados aos requisitos de cobertura e conectividade. As vantagens de se fazer controle de densidade são aumentar o tempo de vida da rede, pois a cada período apenas um subconjunto de nós está ligado, e melhorar o processo de disseminação de dados, uma vez que redes de sensores muito densas estão sujeitas a interferências e colisões.

O problema de Controle de Densidade tratado nesta tese tem que atender a dois requisitos essenciais de redes de sensores: cobertura e conectividade. O primeiro requisito garante que os nós sensores escolhidos para coleta de dados cubram a maior área possível e o segundo que estes dados coletados cheguem a um ponto de acesso de onde serão extraídos por um observador externo a rede. Além disso a capacidade de energia da bateria é sempre levada em consideração seja de maneira direta, como uma restrição da abordagem, ou indireta, servindo como parâmetro que estabelece quais nós ainda estão disponíveis para gerar a solução. Os critérios a serem otimizados são o consumo de energia da rede como um todo e a cobertura, ou seja, deseja-se a melhor cobertura com o menor custo de energia. Para tratar este problema são propostas duas abordagens: multiperíodo e periódica.

A definição de multiperíodo consiste em, após estabelecer um tempo de vida total esperado ou desejado para rede, dividir este tempo em períodos, que podem ou não ter a mesma duração. A abordagem multiperíodo para o controle de densidade irá então definir,

para 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. Esta abordagem tem uma visão global da rede e dos períodos e foi proposta por ser uma estratégia nova para lidar com controle de densidade e apresentar com diversas possibilidades de utilização, mesmo que venha de encontro a aspectos das redes de sensores como dinamicidade.

Na concepção da abordagem multiperíodo vislumbrou-se dois objetivos principais para sua utilização: aplicação e avaliação. Considerando que uma visão global da rede e do tempo de vida esperado pode levar a resultados mais eficientes tanto em termos de consumo quanto em cobertura, esta abordagem pode ser utilizada em redes de sensores instaladas em ambientes tolerantes a falhas, ou seja, aqueles em que falhas individuais de nós são facilmente resolvidas. O segundo objetivo diz respeito a utilização da abordagem para avaliar soluções de controle de densidade. Novamente, a visão global dos nós da rede e do tempo de vida esperado gera as melhores configurações possíveis de rede em termos de consumo de energia e cobertura, e que podem funcionar como um limite inferior para soluções de controle de densidade e servir para avaliar estas soluções.

Em termos práticos a abordagem inclui uma modelagem matemática de PLIM, uma proposta de Relaxação Lagrangeana para geração de limites inferiores e uma Heurística Lagrangeana para obtenção de limites superiores para o problema. O modelo matemático traduz todos os objetivos previstos para a abordagem multiperíodo, tratar cobertura, conectividade, restrições de energia e minimizar o consumo de energia. Este modelo é resolvido com um *software* de otimização comercial e obtém a solução ótima para o problema porém tem problemas de escalabilidade que impedem que se tratem instâncias grandes em tempos viáveis, além de depender de pacotes de *software* para ser resolvido. A Relaxação Lagrangeana e Heurística Lagrangeana foram desenvolvidas como estratégias de solução do modelo proposto, pois mantêm todos os objetivos estabelecidos pela abordagem multiperíodo. Estas estratégias de solução obtiveram bons resultados tanto em relação a qualidade das soluções quanto no tempo de execução. Além disso elas minimizam o problema de escalabilidade, podendo tratar instâncias grandes tanto em relação ao número de nós sensores e dimensão da área de monitoramento, quanto ao número de períodos e eliminam a dependência de um pacote de *software* para obtenção da solução.

Os testes da abordagem multiperíodo consistem basicamente na qualidade dos limites gerados pelas Relaxação Lagrangeana e Heurística Lagrangeana. O limite inferior da Relaxação Lagrangeana é comparado ao Limite Inferior da Relaxação Linear e ainda que tenha perdido em termos de qualidade, está no máximo a 2,302% do limite linear e apresenta as vantagens de não depender de *software* dedicado para ser resolvido, gerar soluções inteiras

que são mais simples de serem viabilizadas visando gerar soluções viáveis e tem tempo de execução bem inferior. A Heurística Lagrangeana é avaliada em relação a solução ótima, para as instâncias em é possível encontrá-la, e em função do GAP que gera em conjunto com o limite inferior. A Heurística obteve resultados satisfatórios em relação a qualidade, podendo ser melhorada com procedimentos mais sofisticados e suas vantagens como no caso do limite inferior são a não dependência de pacotes de *software* e o tempo de execução.

Em termos práticos resolver o problema de controle de densidade com uma visão global do tempo de vida pode não ser desejável ou até factível. Por isso é proposta a Abordagem Periódica para se tratar o PCD-RSSF e que consiste em encontrar a melhor solução para a rede em um determinado instante de tempo e repetir este procedimento periodicamente, atualizando-se a cada novo período características como nós sensores disponíveis, energia residual dos nós sensores e pontos de demanda que ainda podem ser cobertos. O tratamento periódico é proposto como uma alternativa à abordagem multiperíodo com o objetivo de possibilitar lidar com instâncias maiores, tanto em número de nós quanto em tamanho da área de monitoramento, tratar as falhas nos nós sensores e se aproximar mais do aspecto dinâmico das redes de sensores.

Para a abordagem periódica são propostos uma modelagem matemática de PLI para o PDC-RSSF Periódico com duas variações para a função objetivo, com a primeira minimizando a energia consumida pelos nós ativos da rede e a segunda a relação entre a energia consumida pelos nós ativos da rede e a energia residual destes nós. Também é proposto um Algoritmo Híbrido como alternativa de solução do problema, que como acontece no caso multiperíodo preserva todos os objetivos previstos para a abordagem. O algoritmo é denominado híbrido por trabalhar global e localmente. A parte global do algoritmo tem uma visão global da rede escolhe um conjunto de nós sensores com baixo custo de energia para manter a área de cobertura e assegurar a conectividade dos nós construindo uma árvore de roteamento. O componente local é proposto para tratar falhas assim que acontece, sendo acionado para tentar restaurar a cobertura e a conectividade da rede.

Os testes da abordagem periódica avaliam diversos aspectos das redes de sensores. O primeiro deles é a influência da energia residual na composição da solução periódica. Um modelo matemático ou algoritmo que não considera energia residual só necessita ter sua solução recalculada quando houver alguma falha nos nós sensores. Isto acontece porque enquanto um mesmo conjunto de nós estiver disponível a solução ótima será sempre a mesma. O modelo ou algoritmo com energia residual obtém os melhores resultados quando utilizado de maneira mais frequente, o que leva a um maior consumo de energia em função de ativação de nós mas melhora a cobertura e diminui número de falhas de energia logo após que uma solução é gerada por incluir na solução nós com baixa energia residual apenas quando estritamente necessário. Em resumo, se a prioridade é um tempo de vida maior com menor

consumo de energia deve-se escolher o modelo sem energia residual, porém se a prioridade é a cobertura o modelo com energia residual é mais adequado.

O Algoritmo Híbrido proposto é avaliado através da comparação com uma estratégia Global Periódica, que reconstrói a rede em instantes de tempo predefinidos, com uma estratégia que utiliza o Algoritmo Local *Online* para se recuperar de falhas de nós à medida em que elas ocorrem e com a solução ótima obtida resolvendo-se o modelo matemático. Os resultados mostram que a combinação das estratégias global e local leva a soluções melhores do que quando elas são utilizadas separadamente, uma vez que a proposta híbrida se beneficia das vantagens dos dois algoritmos, a visão global que gera soluções melhores e a estratégia local que trata falhas assim que elas ocorrem. A solução ótima serve como um bom parâmetro para consumo de energia e maior cobertura possível.

Em um ambiente com falhas mecânicas, além das falhas por esgotamento de energia, o desempenho relativo dos três algoritmos é similar ao obtido em um ambiente sem estas falhas. Porém estas falhas ressaltaram os aspectos negativos dos Algoritmos Global e Local *Online*, porque no primeiro caso o aumento do número de falhas de nós piora significativamente a cobertura porque este algoritmo não trata falha assim que acontece e no segundo caso porque o aumento do número de falhas aumenta o número de chamadas do algoritmo levando a um aumento desnecessário no número de nós ativos em virtude de sua característica local e abreviando ainda mais seu tempo de vida.

Outro aspecto observado foi a influência da localização do sorvedouro no tempo de vida da rede. A conclusão é que o sorvedouro deve ser posicionado na área de monitoramento de maneira a aumentar o número de nós conectados a ele diretamente e que diminua as rotas. Como isto aumenta bastante o tempo de vida 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 as abordagens multiperíodo e periódica foram comparadas para tentar estabelecer se e quando a primeira serve como parâmetro de qualidade para a segunda. Nos testes é observado que quanto maior o número de períodos da abordagem multiperíodo melhores são seus resultados, o que permite que ela seja utilizada como limite inferior em termos de energia consumida e falhas de cobertura para outras soluções de controle de densidade. Porém para assegurar este fato deve-se escolher com cuidado os parâmetros do modelo multiperíodo. Poucos períodos com longa duração podem levar a resultados que não servem para avaliar por exemplo a abordagem periódica. Complementando estes testes, é incluída na bateria uma solução sem controle de densidade, ou seja, onde todos os nós estão ativos mas a árvore de conectividade é montada para minimizar o consumo de energia com transmissão, e o resultado é um consumo de energia desnecessário que leva a um tempo de vida bem inferior ao das soluções com controle de densidade.

5.2 Trabalhos Publicados

Nesta seção são listados, em ordem cronológica do mais recente ao mais antigo, os trabalhos publicados durante o doutorado. Entre os trabalhos publicados, os que são diretamente ligados a tese são:

Andrade, I.B.D.; MATEUS, G.R.; NAKAMURA, F.G. A GRASP Heuristic to Density Control: Solving Multi-Period Coverage and Routing Problems in Wireless Sensor Networks. 14th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2009), Sousse, Tunísia, 2009.

Campos. B.S.; NAKAMURA, F.G. Problema de Cobertura em Rede de Sensores sem Fio planas voltado ao rastreamento de animais. XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO 2009), Porto Seguro, Bahia ,2009.

Andrade, I.B.D.; NAKAMURA, F.G. Uma Heurística GRASP para o Controle de Densidade: Resolvendo o Problema de Cobertura e Roteamento Multi-Período em Redes de Sensores Sem Fio Planas. XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO 2009), Porto Seguro, Bahia, 2009.

Andrade, I.B.D.; NAKAMURA, F.G. ; Mateus, G.R. Uma Abordagem Multiperíodo para a Solução do Problema de Cobertura e Conectividade em Redes de Sensores Sem Fio Planas. XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO 2008), João Pessoa, Paraíba, 2008.

Martins, F.V.C.; NAKAMURA, F.G. ; Takahashi, R.H.C. Uma Análise Multiobjetivo para o Problema de Cobertura e Conectividade em uma Rede de Sensores Sem Fio Plana. XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO 2008), João Pessoa, Paraíba, 2008.

Martins, F.V.C.; NAKAMURA, F.G.; Quintão, F.P.; Mateus, G.R. Model and Algorithms for the Density, Coverage and Connectivity Control Problem in Flat WSNs. International Network Optimization Conference (INOC 2007), Spa, Bélgica, 2007.

NAKAMURA, F.G.; Martins, F.V.C.; Quintão, F.P.; Mateus, G.R. Controle de Densidade em Redes de Sensores: Modelos e Algoritmos. XXXIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO 2007), Fortaleza, Ceará, 2007.

NAKAMURA, F.G.; Martins, F.V.C.; Quintão, F.P.; Mateus, G.R. Modelo e Algoritmos para Serviço de Controle de Densidade de Redes de Sensores sem Fio. XII Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços (WGRS 2007), Belém, Pará, 2007.

Martins F.V.C.; Quintão, F.P.; Andrade I.B.D.; NAKAMURA F.G. Uma Abordagem Híbrida para a Solução do Problema de Cobertura e Conectividade em uma Rede de Sensores Sem Fio Planas. XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO 2006), Goiânia, Goiás, 2006.

Martins F.V.C.; Andrade I .B.D.; Nakamura F.G.; Mateus G.R. Uma abordagem online para os problemas de cobertura Redes de Sensores sem Fio Planas. I Workshop de Computação e Aplicações (WCOMPA 2006), Cuiabá, Mato Grosso, 2006.

NAKAMURA, F.G.; Quintão, F.P.; Menezes, G. C.; Mateus, G.R. An Optimal Node Scheduling for Flat Wireless Sensor Networks. 4th International Conference on Networking (ICN 2005), Reunion Island, France, 2005.

Quintão, F.P.; NAKAMURA, F.G.; Mateus, G.R. Evolutionary Algorithm for the Dynamic Coverage Problem applied to Wireless Sensor Networks Design. IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2005), Edinburgh, United Kingdom, 2005.

Menezes, G. C.; de Aquino, A.L.L.; Cabral. R. da S.; NAKAMURA, F.G. Uma Abordagem Paralela para os Problemas de Cobertura e Conectividade em Redes de Sensores Sem Fio. XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO 2005), Gramado, Rio Grande do Sul, 2005.

Quintão, F.P.; NAKAMURA, F.G.; Mateus, G.R. Algoritmo Evolutivo para o Problema Dinâmico de Cobertura Aplicado ao Gerenciamento de Redes de Sensores sem Fio. XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO 2005), Gramado, Rio Grande do Sul, 2005.

NAKAMURA, F.G.; Quintão, F.P.; Mateus, G.R.; Menezes, G.C. Planejamento Dinâmico para Controle de Cobertura e Conectividade em Redes de Sensores sem fio. VI Workshop de Comunicação sem fio e Computação Móvel (WCSF 2004), Fortaleza, Ceará, 2004.

Menezes, G. C.; Mateus, G.R.; NAKAMURA, F.G. Modelo e Algoritmos para os Problemas de Cobertura e Conectividade em Redes de Sensores sem Fio. VI Workshop de Comunicação sem fio e Computação Móvel (WCSF 2004), Fortaleza, Ceará, 2004.

Menezes, G. C.; Mateus, G.R.; NAKAMURA, F.G. Uma Abordagem Lagrangeana para os problemas de Densidade, Cobertura e Conectividade em uma Rede de Sensores sem Fio. XXXVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO 2004), São João Del Rey, Minas Gerais, 2004.

Quintão, F.P.; NAKAMURA, F.G.; Mateus, G.R. Modelo Exato e Algoritmo Híbrido para Controle de Topologia de Redes de Sensores sem Fio. XXXVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO 2004), São João Del Rey, Minas Gerais, 2004. Trabalho premiado com o primeiro lugar no Prêmio de Iniciação Científica (PIC) da Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional - SOBRAPO.

Quintão, F.P.; NAKAMURA, F.G.; Mateus, G.R. A Hybrid Approach to Solve the Coverage and Connectivity Problem in Wireless Sensor Networks. 4th EU/ME Workshop: Design and Evaluation of Advanced Hybrid MetaHeuristics (EU/ME 2004), Nottingham, United Kingdom, 2004.

Quintão, F.P.; Mateus, G.R.; NAKAMURA, F.G. Uma abordagem evolutiva para o Problema de Cobertura em Redes de Sensores sem Fio. XXIV Congresso da Sociedade Brasileira da Computação (SBC 2004). Trabalho premiado em primeiro lugar no XXIII Concurso de Trabalhos de Iniciação Científica - CTIC e publicado na Revista eletrônica de iniciação científica - REIC.

Quintão, F.P.; NAKAMURA, F.G.; Mateus, G.R. Evolutionary Algorithms for Combinatorial Problems in the Uncertain Environment of the Wireless Sensor Networks. Shengxiang Yang et al. Evolutionary Computation In Dynamic And Uncertain Environments, 2007.

Os trabalhos com tema em comum, mas que não são o foco do projeto tese são:

NAKAMURA, E.F.; Figueiredo, C.M.S.; NAKAMURA, F.G.; Loureiro, A.A.F. Diffuse: A topology building engine for wireless sensor networks?. Signal Processing, 2007.

Nakamura, E.F.; NAKAMURA, F.G.; Figueiredo, C.M.S.; Loureiro, A.A.F. Using Information Fusion to Assist Data Dissemination in Wireless Sensor Networks. Telecommunication Systems, 2005.

Nakamura, E.F.; NAKAMURA, F.G.; Figueiredo, C. M. S.; Loureiro, A. A. F. Detecção de Falhas em Redes de Sensores sem Fio Baseada na Medição do Tráfego e em Técnicas de Fusão de Dados. 23^o Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC 2005), Fortaleza, Ceará, 2005.

Os trabalhos publicados e não relacionados a tese são:

Gómez-Ravetti, M.; NAKAMURA, F.G.; Meneses C.N.; Resende, M.; Mateus, G.R.; Pardalos, P. A Hybrid Metaheuristic for the Permutational Flow Shop Problem. 19th International Symposium on Mathematical Programming (ISMP 2006), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

5.3 Trabalhos Futuros

Os trabalhos futuros previstos para a Abordagem Multiperíodo são melhorar a Heurística Lagrangeana com o objetivo de diminuir e estabilizar os valores dos GAPS, principalmente quando se trabalhar com instâncias maiores. É desejado que o aumento das instâncias, seja no número de nós e/ou no número de períodos, não traga pioras tão significativas aos valores do limite superior e dos GAPS. Uma possível opção é adicionar mecanismos de busca local aos procedimentos já implementados. Outro objetivo é transformar os algoritmos de Relaxação Lagrangeana e Heurística Lagrangeana em uma ferramenta para avaliação de soluções para controle de densidade, uma vez que se entende que esta é a maior contribuição desta tese. Além disso aspectos como o custo de disseminação da solução serão incorporados à abordagem para torná-la ainda mais flexível e abrangente.

Para a Abordagem Periódica são previstos o desenvolvimento de um novo algoritmo para substituir o algoritmo genético na resolução do problema de cobertura, uma vez que um dos objetivos da utilização do algoritmo genético era poder contar com diversas possíveis soluções para o problema. Porém, como só a melhor solução gerada é utilizada, deseja-se que um algoritmo especialmente desenvolvido para o problema melhore os resultados. É prevista ainda uma versão distribuída do Algoritmo Local *Online* também para substituir a versão atual, e que deve trabalhar com as mesmas funções já desenvolvidas mas com um número reduzido de informações, como por exemplo o número de nós candidatos a substituir o nó em falha. Este aspecto deve tornar o Algoritmo Híbrido mais adequado às características das redes de sensores. O custo de disseminação da solução também será incorporado a esta abordagem.

Por fim, considerando que as redes de sensores sem fio são redes dinâmicas principalmente por seus nós estarem sujeitos a falhas tanto mecânicas quanto por esgotamento de energia, é importante que as soluções desenvolvidas se adaptem a esta realidade. Os trabalhos futuros incluem a proposta da abordagem dinâmica para o controle de densidade que utilizará o conhecimento adquirido com as abordagens multiperíodo e periódica para projetar, implementar e simular um esquema dinâmico de controle de densidade em redes de sensores sem fio. O objetivo é que na escolha da melhor solução sejam incluídas além das

métricas de avaliação já utilizadas como consumo de energia, energia residual dos nós e cobertura, métricas de redes como atraso, latência e perdas de pacotes.

Referências Bibliográficas

Andrade, I.; Mateus, G. & Nakamura, F. (2009). A grasp heuristic to density control: Solving multi-period coverage and routing problems in wireless sensor networks. Em *14th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, pp. 493 -- 499. Sousse , Tunisia.

Andrade, I. & Nakamura, F. (2009). Uma heurística grasp para o controle de densidade: Resolvendo o problema de cobertura e roteamento multi-período em redes de sensores sem fio planas. Em *XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)*. Porto Seguro, Bahia.

Andrade, I.; Nakamura, F. & Mateus, G. (2008). Uma abordagem multiperíodo para a solução do problema de cobertura e conectividade em redes de sensores sem fio planas. Em *XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)*. João Pessoa, Paraíba.

Aquiar, A. B. de; Pinheiro, P. C. A. L. V. (2007). Optimizing energy consumption in heterogeneous wireless sensor networks: A novel integer programming model. Em *I International Conference on Operational Research for Development*, pp. 496--505. Fortaleza, CE, Brasil.

Bhardwaj, M.; Chandrakasan, A. & Garnett, T. (2001). Upper bounds on the lifetime of sensor networks. Em *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 785 – 790. Helsinki, Finlândia.

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

Cerpa, A. & Estrin, D. (2002). Ascent: Adaptive self-configuring sensor networks topologies. Em *21st IEEE Computer and Communications Society (INFOCOM)*, volume 3, pp. 1278–1287. Nova York, EUA.

- Chakrabarty, K.; Iyengar, S. S.; Qi, H. & Cho, E. (2002). Grid coverage for surveillance and target organization in distributed sensor networks. Em *IEEE Transactions on Computers*, pp. 51(12):1448–1453.
- Estrin, D.; Girod, L.; Pottie, G. & Srivastava, M. (2001). Instrumenting the world with wireless sensor networks. Em *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, volume 4, pp. 2033--2036. Salt Lake City, EUA.
- Fisher, M. L. (1981). The lagrangian relaxation method for solving integer programming problems. *Management Science*, 27:1--18.
- Goffin, J. & Vial, J. (1998). Convex nondifferentiable optimization: an interior point perspective. Em *2nd School on Optimization*. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Haupt, R. & Haupt, S. (1998). *Practical Genetic Algorithms*. Wiley-Interscience, 1 edição.
- Heinzelman, W.; Chandrakasan, A. & Balakrishnan, H. (2002). An Application-specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, pp. 660–670.
- Hinojosa, Y.; Puerto, J. & Fernández, F. R. (2000). A multiperiod two-echelon multicommodity capacitated plant organization problem. *European Journal of Operational Research*, 123:271--291.
- Hiriart, J. & Lemaréchal, C. (1991). *Convex Analysis and Minimization Algorithms*. Springer-Verlag.
- Hollar, S. (1996). *Cots dust*. Dissertação de mestrado, University of California - Berkeley.
- Huang, C. & Tseng, Y. (2003). The coverage problem in a wireless sensor network. Em *2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA)*, pp. 115--121. San Diego, EUA, ACM Press.
- Karp, R. M. (1972). Reducibility among combinatorial problems. Em *Complexity of Computer Computations: Proc. of a Symp. on the Complexity of Computer Computations*, pp. 85--103.
- Kawatra, R. & Bricker, D. (2000). A multiperiod planning model for the capacitated minimal spanning tree problem. *European Journal of Operational Research*, 121:412--419.
- Lemaréchal, C. (1989). *Nondifferentiable optimization*, volume 1. Handbooks in Operations Research and Management Science – Elsevier Science Publishers B.V.

- Machado, M.; Goussevskaia, O.; Loureiro, R. M. A.; Mateus, G. & Nogueira, J. (2005). Data dissemination using the energy map. Em *2nd Annual Conference on Wireless On demand Network Systems and Services (WONS)*, pp. 139--148. St. Moritz, Switzerland.
- Martins, F.; Carrano, E.; Wanner, E.; Takahashi, R. & Mateus, G. (2009a). A dynamic multiobjective hybrid approach for designing wireless sensor networks. Em *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, volume 1, pp. 1145--1152. Trondheim, Noruega.
- Martins, F.; Carrano, E.; Wanner, E.; Takahashi, R. & Mateus, G. (2009b). A hybrid multiobjective approach for designing wireless sensor networks. Em *12-th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiN)*, volume 1, pp. 321--324. Tenerife, Espanha.
- Martins, F.; Nakamura, F. & Takahashi, R. (2008). Uma análise multiobjetivo para o problema de cobertura e conectividade em uma rede de sensores sem fio plana. Em *XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)*. João Pessoa, Paraíba.
- Martins, F.; Quintão, F.; Nakamura, F. & Mateus, G. (2007). Model and algorithms for the density, coverage and connectivity control problem in flat wsns. Em *International Network Optimization Conference (INOC)*, pp. 321--324. Spa, Bélgica.
- Megerian, S.; Koushanfar, F.; Qu, G.; Veltri, G. & Potkonjak, M. (2002). Exposure in wireless sensor networks: theory and practical solutions. *Wireless Networks*, 8(5):443--454.
- Megerian, S. & Potkonjak, M. (2003). Low power 0/1 Coverage and Scheduling Techniques in Sensor Networks. Technical Report 030001, University of California, Los Angeles.
- Meguerdichian, S.; Koushanfar, F.; Potkonjak, M. & Srivastava, M. B. (2001). Coverage Problems in Wireless ad hoc Sensor Networks. Em *IEEE Conference on Computer Communications (ICC)*, pp. 1380--1387. Anchorage, EUA.
- Menezes, G.; Lins, A.; Cabral, R. & Nakamura, F. (2005). Uma abordagem paralela para os problemas de cobertura e conectividade em redes de sensores sem fio. Em *XXXVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)*, pp. 1840--1850. Gramado, RS.
- Menezes, G.; Mateus, G. R. & Nakamura, F. (2004a). Modelo e algoritmos para os problemas de cobertura e conectividade em redes de sensores sem fio. Em *XXXV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)*, volume 1. São João del Rey, MG.
- Menezes, G.; Mateus, G. R. & Nakamura, F. (2004b). Uma abordagem lagrangeana para os problemas de densidade, cobertura e conectividade em uma rede de sensores sem fio.

- Em *Workshop de Comunicação sem Fio e Computação Móvel (WCSF)*, volume 1, pp. 192--201. Fortaleza, CE.
- Mini, R.; Loureiro, A. & Nath, B. (2004). The distinctive design characteristics of a wireless sensor network: The energy map. *Computer Communications*, 27(10):935--945.
- Nakamura, E. F.; Figueiredo, C.; Nakamura, F. G. & Loureiro, A. (2007a). Diffuse: A topology building engine for wireless sensor networks. *Signal Processing*, 87:2991--3009.
- Nakamura, E. F.; Nakamura, F. G.; Figueiredo, C. & Loureiro, A. (2005a). Detecção de falhas em redes de sensores sem fio baseada na medição do tráfego e em técnicas de fusão de dados. Em *XXIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, volume N, pp. 579--592. Fortaleza, Ceará.
- Nakamura, E. F.; Nakamura, F. G.; Figueiredo, C. & Loureiro, A. (2005b). Using information fusion to assist data dissemination in wireless sensor networks. *Telecommunication Systems*, 30:237--254.
- Nakamura, F.; G.C.Menezes, F. Q. & Mateus, G. R. (2004). Planejamento dinâmico para controle de cobertura e conectividade em redes de sensores sem fio. Em *Workshop de Comunicação sem Fio e Computação Móvel (WCSF)*, volume 1, pp. 182--191. Fortaleza, CE.
- Nakamura, F.; Martins, F.; Quintão, F. & Mateus, G. (2007b). Controle de densidade em redes de sensores: Modelos e algoritmos. Em *XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)*. Fortaleza, Ceará.
- Nakamura, F.; Martins, F.; Quintão, F. & Mateus, G. (2007c). Modelo e algoritmos para serviço de controle de densidade de redes de sensores sem fio. Em *XII Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços (WGRS)*. Belém, Pará.
- Nakamura, F.; Quintao, F.; Menezes, G. & Mateus, G. (2005c). An Optimal Node Scheduling for flat Wireless Sensor Networks. Em *IEEE International Conference on Networking (ICN)*, volume 3420, pp. 475--483. Ilha de Reunião, França.
- Niculescu, D. & Nath, B. (2001). Ad hoc positioning systems. Em *IEEE Global Telecommunications Conference (GlobeCom)*, volume 5, pp. 2926--2931.
- Park, S.; Savvides, A. & Srivastava, M. B. (2000). Sensorsim: a simulation framework for sensor networks. Em *3rd ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiN)*, pp. 104--111. Boston, EUA, ACM Press.

- Park, S.; Savvides, A. & Srivastava, M. B. (2001). Simulating networks of wireless sensors. Em *33rd Conference on Winter Simulation*, pp. 1330--1338. Arlington, Virginia, IEEE Computer Society.
- Quintao, F.; Nakamura, F. & Mateus, G. R. (2004). A Hybrid Approach to solve the Coverage and Connectivity Problem in Wireless Sensor Networks. Em *IV European Workshop on Meta-heuristics (EU/ME)*, volume 1.
- Quintao, F.; Nakamura, F. & Mateus, G. R. (2005). Evolutionary Algorithm for the Dynamic Coverage Problem Applied to Wireless Sensor Networks Design. Em *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, volume 2, pp. 1589--1596. Edinburgh, UK.
- Quintão, F.; Mateus, G. R. & Nakamura, F. (2004a). Uma abordagem evolutiva para o problema de cobertura em redes de sensores sem fio. Em *Congresso da Sociedade Brasileira de Computação*, volume 1, pp. 440--450. Salvador, BA. Trabalho premiado como 1o lugar no concurso de Iniciação Científica da SBC - CTIC.
- Quintão, F.; Nakamura, F. & Mateus, G. R. (2004b). Modelo exato e algoritmo híbrido para controle de topologia de redes de sensores sem fio. Em *XXXV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)*, volume 1. São João del Rey, MG. Trabalho premiado com o 1o lugar do Concurso de Iniciação Científica da SOBRAPO.
- Quintão, F.; Nakamura, F. & Mateus, G. R. (2005a). Algoritmo evolutivo para o problema dinâmico de cobertura aplicado ao gerenciamento de redes de sensores sem fio. Em *XXXVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)*, pp. 1225--1236. Gramado, RS.
- Quintão, F.; Nakamura, F. & Mateus, G. R. (2005b). Evolutionary algorithm for the dynamic coverage problem applied to wireless sensor networks design. Em *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, volume 2, pp. 1589--1596. Edinburg, UK.
- Quintão, F.; Nakamura, F. G. & Mateus, G. (2007). *Evolutionary Computation in Dynamic and Uncertain Environments*, capítulo Evolutionary algorithms for Combinatorial Problem in the uncertain Environment of Wireless Sensor Networks, pp. 197--222. Springer Series on Computational Intelligence. Springer.
- Quintão, F. P.; Mateus, G. & Nakamura, F. G. (2004c). Uma abordagem evolutiva para o problema de cobertura em redes de sensores sem fio. *REIC. Revista eletrônica de iniciação científica*, III.
- Ruiz, L.; Nogueira, J. & Loureiro, A. (2003). Manna: A management architecture for wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, pp. 116--125.

- Savvides, A.; Park, S. & Srivastava, M. B. (2001). On modeling networks of wireless micro-sensors. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, 29(1):318--319.
- Seródio, C.; Nakamura, E. & Loureiro, A. (2004). Multi:a hybrid adaptive dissemination protocol for wireless sensor networks. Em *1st International Workshop on Algorithmic Aspects of Wireless Sensor Networks (Algosensors)*, pp. 171–186. Turku, Finland.
- Shor, N. (1985). *Minimization Methods for Nondifferentiable Functions*. Springer-Verlag.
- Siqueira, I.; Ruiz, L.; Loureiro, A. & Nogueira, J. (2004). Um serviço de gerenciamento para controle de densidade de redes sensores sem fio. Em *22o. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)*, pp. 249--262, Gramado, RS.
- Siqueira, I.; Seródio, C.; Nogueira, A. L. J. & Ruiz, L. (2006). An integrated approach for density control and routing in wireless sensor networks. Em *20th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*, pp. 82--88. Ilha de Rodes, Grécia.
- Technology, C. (2006). Micaz - wireless measurement system. fonte: <http://www.xbow.com/products/productsdetails.aspx?sid=101>.
- Tilak, S.; Abu-Ghazaleh, N. B. & Heinzelman, W. (2002a). Infrastructure tradeoffs for sensor networks. Em *1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA)*, pp. 49--58. Atlanta, EUA.
- Tilak, S.; Abu-Ghazaleh, N. B. & Heinzelman, W. (2002b). Infrastructure tradeoffs for sensor networks. Em *1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, pp. 49--58. Atlanta, EUA, ACM Press.
- Tilak, S.; Abu-Ghazaleh, N. B. & Heinzelman, W. (2002c). A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 6(2):28--36.
- Türkogullari, Y.B., A.-N. A. I. E. C. (2007). Optimal placement and activity scheduling to maximize coverage lifetime in wireless sensor networks. pp. 275–280. cited By (since 1996) 0.
- Türkogullari, Y. B.; Aras, N.; Altinel, I. K. & Ersoy, C. (2010). A column generation based heuristic for sensor placement, activity scheduling and data routing in wireless sensor networks. *European Journal of Operational Research*, 207(2):1014 – 1026.

- Vieira, M.; Vieira, L.; Ruiz, L.; Loureiro, A.; Fernandes, A. & Nogueira, J. (2003). Scheduling Nodes in Wireless Sensor Networks: A Voronoi Approach. Em *28th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks (LCN)*, pp. 423–429. Bonn, Königswinter, Germany.
- Wang, X.; Xing, G.; Zhang, Y.; Lu, C.; Pless, R. & Gill, C. (2003). Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks. Em *1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pp. 28--39. Los Angeles, EUA.
- Xu, Y.; Bne, S.; Mori, U.; Heidemann, J. & Estrin, D. (2003). Topology control protocols to conserve energy in wireless ad hoc networks. Relatório técnico 6, University of California, Los Angeles, Center for Embedded Networked Computing.
- Ye, F.; Zhong, G. & e L. Zhang, J. C. (2003). Peas: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks. Em *23rd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, pp. 28--37. Providence, EUA.
- Zhang, H. & Hou, J. (2005). Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. *Wireless ad hoc and Sensor Networks*, 1:89--123.