

FERNANDA SUMIKA HOJO DE SOUZA

**ALGORITMOS PARA O PROBLEMA DE ATRIBUIÇÃO
DE PAPÉIS EM REDES DE SENSORES SEM FIO**

Belo Horizonte

13 de julho de 2007

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

**ALGORITMOS PARA O PROBLEMA DE ATRIBUIÇÃO
DE PAPÉIS EM REDES DE SENSORES SEM FIO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação.

FERNANDA SUMIKA HOJO DE SOUZA

Belo Horizonte

13 de julho de 2007



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

Algoritmos para o Problema de Atribuição
de Papéis em Redes de Sensores Sem Fio

FERNANDA SUMIKA HOJO DE SOUZA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída por:

D. Sc. GERALDO ROBSON MATEUS – Orientador
Universidade Federal de Minas Gerais

D. Sc. MARCONE JAMILSON FREITAS SOUZA
Universidade Federal de Ouro Preto

D. Sc. JOSÉ MARCOS SILVA NOGUEIRA
Universidade Federal de Minas Gerais

D. Sc. ALEXANDRE SALLES DA CUNHA
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte, 13 de julho de 2007

Resumo

Recentes avanços tecnológicos possibilitaram a combinação de sistemas embutidos e comunicação sem fio, viabilizando um novo tipo de rede móvel *ad-hoc*, conhecida como Rede de Sensores Sem Fio (RSSF). Estas redes têm a capacidade de monitorar o mundo físico através de pequenos sensores que operam de maneira integrada e colaborativa. Devido à natureza bastante compacta dos nós sensores, um dos principais focos no projeto das RSSF é a restrição de energia. Dessa forma, estudos que visam melhorar as condições de operação destas redes, bem como prolongar seu tempo de vida mostram-se muito importantes. Neste trabalho foi estudado o problema de atribuição de papéis em RSSF, cujo objetivo é definir papéis específicos para os sensores, tal que o tempo de vida da rede seja maximizado, garantindo a cobertura dos pontos de demanda e o roteamento das informações. O problema foi tratado em diferentes abordagens, e os resultados computacionais apresentados mostram que é possível prover uma melhoria no projeto de redes através de técnicas de otimização.

Abstract

Recent technological advances allowed the combination of embedded systems and wireless communication, making possible a new type of mobile ad-hoc network, known as Wireless Sensor Network (WSN). These networks have the capacity to monitor the physical world through small sensors that operate in integrated and collaborative way. Due to the compact nature of the sensor nodes, one of the main focus in WSN's design is the energy constraint. In this way, studies aiming to improve the operation conditions of these networks, as well as extend its lifetime are very important. In this work the role assignment problem in WSN was studied, in which the objective is to define specific roles for the sensors, such that the network lifetime is maximized, guaranteeing the coverage of the demand points and the information routing. The problem was treated in different approaches, and the presented computational results show that it is possible to provide an improvement in the network design through optimization techniques.

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre incentivaram a busca pelo conhecimento e me apoiaram durante todo esse percurso.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pelas oportunidades que surgiram durante meu percurso ao longo da vida e pela força que tive nos momentos mais difíceis.

Ao meu orientador, Prof. Geraldo Robson Mateus, agradeço pelos ensinamentos, paciência, compreensão em todos os momentos e por acreditar na minha capacidade.

Aos meus pais, Edina e Mauro, agradeço por todo apoio e incentivo para que meus objetivos fossem alcançados. Com a filosofia de que a busca pelo conhecimento é infinita, sempre me motivaram a enfrentar novos desafios e a enveredar pelo mundo da pesquisa.

À todos meus familiares que torceram pelo meu sucesso, em especial à minha irmã Natália, tia Rô e tio It.

Agradeço aos meus amigos, que estiveram ao meu lado tanto nos momentos de estudo, como também nos de lazer. Com eles pude compartilhar minhas conquistas e dificuldades, tornando cada instante muito significativo nessa caminhada.

Aos amigos do LaPO (Laboratório de Pesquisa Operacional), em especial à Fabíola, Martin, Aioffi, Luciana, Djavan, Henrique e Tatá. Aos que me ajudaram durante a realização desse trabalho, Alla, Nakamura e Maurício. Aos demais amigos, Ju, César, André Bi e Daniel.

Ao meu professor e orientador da graduação, professor Marccone Jamilson, que foi um grande incentivador para que eu continuasse meus estudos de pós-graduação.

Agradeço ainda ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por proporcionar apoio financeiro durante parte do curso.

Neste tempo acelerado da modernidade, que a ciência produzida não apenas contribua para facilitar as atividades humanas, mas também possa gerar conhecimento útil na construção de um mundo melhor.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Geral	2
1.2.2	Específicos	3
1.3	Principais Contribuições	3
1.4	Organização	3
2	Redes de Sensores Sem Fio	4
2.1	Classificação das RSSF	4
2.2	Aplicações	7
2.3	Limitações e Perspectivas	8
3	Problema de Atribuição de Papéis em RSSF	10
3.1	Casos Particulares do Problema	11
3.2	Complexidade	12
3.3	Trabalhos Relacionados	13
3.4	Definição Formal do Problema	14
3.5	Modelo Matemático	15
3.6	Considerações Finais	17

4	Algoritmo	18
4.1	Algoritmo Genético	18
4.2	AG aplicado ao problema	19
4.3	Considerações Finais	22
5	Resultados Computacionais	24
5.1	Experimentos	24
5.2	Gerador de arquivo	26
5.3	Análise e Discussão dos Resultados	26
6	Simulação da Atribuição de Papéis em RSSF	32
6.1	JiST/SWANS	32
6.2	Abordagem Periódica	33
6.2.1	Resultados preliminares	35
6.3	Abordagem <i>Online</i>	39
6.4	Resultados	42
7	Considerações Finais	50
7.1	Conclusão	50
7.2	Trabalhos Futuros	51
A	Tabelas	52
	Referências Bibliográficas	61

Lista de Figuras

2.1	Representação esquemática de uma RSSF	4
4.1	Representação de uma solução	20
4.2	Operador de mutação	20
4.3	Operador de <i>crossover</i>	21
5.1	Representação de uma área de monitoramento mostrando a posição dos nós sensores, sorvedouro e pontos de demanda	25
5.2	Consumo de energia nos cenários 1 e 2 estudados	27
5.3	Área de cobertura nos cenários 1 e 2 estudados	28
5.4	Tempo computacional gasto nos cenários 1 e 2 estudados	28
5.5	Soluções obtidas pelo CPLEX e pelo AG para uma rede de 12 nós	30
5.6	Soluções obtidas pelo CPLEX e pelo AG para uma rede de 51 nós	31
6.1	Fluxograma da simulação periódica	34
6.2	Número de nós ativos por período, para as instâncias de 25 e 50 nós	36
6.3	Número de nós sem energia por período, para as instâncias de 25 e 50 nós	36
6.4	Número de pontos descobertos por período, para as instâncias de 25 e 50 nós	37
6.5	Energia consumida e Energia residual da rede nas instâncias de 25 e 50 nós	37
6.6	Visão da rede para a instância de 25 nós ao longo do tempo	38
6.7	Esquema representativo do alcance do rádio	39

6.8	Cálculo das grades baseado no alcance do rádio	40
6.9	Fluxograma da simulação <i>online</i>	41
6.10	Estados dos nós sensores	41
6.11	Dados médios de nós ativos e sem energia na simulação para instâncias de 25, 50 e 100 nós	44
6.12	Número de pontos descobertos para instâncias de 25, 50 e 100 nós	44
6.13	Energia residual para instâncias de 25, 50 e 100 nós	45
6.14	Visão da rede ao longo do tempo para instância de 100 nós na abordagem periódica	47
6.15	Cobertura da rede ao longo do tempo para instância de 100 nós na abordagem <i>online</i>	49

Lista de Tabelas

5.1	Cenários experimentais	25
6.1	Cenário de simulação periódica para as instâncias de 25 e 50 nós	35
6.2	Cenário de simulação para instâncias de 25, 50 e 100 nós	43
A.1	Resultados computacionais para instâncias de 12 nós do cenário 1	53
A.2	Resultados computacionais para instâncias de 25 nós do cenário 1	54
A.3	Resultados computacionais para instâncias de 51 nós do cenário 1	55
A.4	Resultados computacionais para instâncias de 102 nós do cenário 1	56
A.5	Resultados computacionais para instâncias de 12 nós do cenário 2	57
A.6	Resultados computacionais para instâncias de 25 nós do cenário 2	58
A.7	Resultados computacionais para instâncias de 51 nós do cenário 2	59
A.8	Resultados computacionais para instâncias de 102 nós do cenário 2	60

Lista de Algoritmos

4.1	AG-RSSF	22
6.1	IniciarNovoPeriodo	34
6.2	RecebeMensagem	42

Capítulo 1

Introdução

Os recentes avanços tecnológicos estimularam o desenvolvimento de novas arquiteturas embutidas para sensores, possibilitando a difusão do uso de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), com ampla variedade de aplicações práticas. As RSSF podem ser consideradas como um tipo especial de rede móvel *ad-hoc* que tem a capacidade de monitorar o mundo físico através de pequenos sensores. Akyildiz et al. (2002) mostram que tais redes se tornaram viáveis pela combinação de novas tecnologias de comunicação sem fio, eletrônica digital e melhorias no hardware dos micro sensores.

Devido à sua forma bastante compacta, os sensores apresentam uma série de limitações relativas à capacidade de memória, de transmissão, e principalmente de energia. Contudo, considerando que uma rede é composta por um vasto número de nós e que estes tendem a operar de maneira integrada e colaborativa, os resultados têm se mostrado satisfatórios em termos de qualidade, robustez, além de serem de baixo custo e poderem operar de forma autônoma (Bhardwaj e Chandrakasan, 2002).

A restrição de energia nos sensores devido à bateria limitada por sua forma bastante compacta, é um dos principais focos no projeto das RSSF, já que a substituição das mesmas é inviável na maioria dos casos. Assim, diversos trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de obter um consumo de energia eficiente, prolongando o tempo de vida da rede, como apresentado por Youssef-Massaad et al. (2004); Rajeswaran e Negi (2004); Hu e Li (2004); Zhao et al. (2004). Técnicas de otimização podem ser utilizadas visando minimizar o consumo de energia dos nós (Nakamura et al., 2005; Menezes, 2004; Oliveira, 2004).

Dentre as diferentes aplicações das RSSF, podem-se destacar algumas áreas comuns como ambiental, militar, comercial, doméstica, saúde, entre outras (Akyildiz et al., 2002). A área ambiental engloba monitoramento climático, detecção sísmica, monitoramento de alterações ambientais, enquanto na militar pode-se citar detecção de inimigo, observação de campo de batalha, etc. Nas áreas comercial e doméstica, podem ser usadas para prover segurança, in-

tegrar "smart spaces", entre outros. Por desempenharem uma grande variedade de tarefas, pressupõe-se que em breve as RSSF tenham presença marcante nas diversas atividades humanas. Sendo assim, pesquisas envolvendo as RSSF mostram-se de fundamental importância para o avanço destas. Novas propostas e algoritmos que otimizem as condições de operação das RSSF constituem um crescente desafio.

O problema de atribuição de papéis tem como objetivo definir papéis específicos para cada um dos nós sensores (Frank e Römer, 2005), atendendo aos requisitos de monitoramento, visando a maximizar o tempo de vida da rede. Neste trabalho, o conjunto de papéis que um nó sensor pode assumir é baseado em diferentes tipos de sensoriamento, como por exemplo, sensor de temperatura, pressão, umidade, áudio, vídeo, entre outros. O problema de escolher o papel que cada nó irá desempenhar, satisfazendo aos requisitos de monitoramento, pertence à categoria NP-Difícil, o que significa que possui ordem de complexidade elevada.

A atribuição de papéis pode ser definida como estática ou dinâmica. A atribuição estática consiste em definir papéis particulares para os nós no início de funcionamento do sistema, mantendo-os inalterados até o final. Já na atribuição dinâmica, o papel atribuído a cada nó pode variar durante o tempo de vida da rede. Cada nova atribuição pode ser definida periodicamente, a cada t unidades de tempo (pró-ativa) ou *online*, na qual as novas atribuições ocorrem constantemente, estimuladas pela ocorrência de novos eventos (reativa).

1.1 Motivação

O uso de projetos integrados de dispositivos de *hardware* e *software* na solução de problemas cotidianos tem se mostrado de grande eficiência a fim de reduzir custos e tempo gasto, além de melhorar os serviços. As RSSF utilizam pequenos dispositivos de *hardware*, que são os nós sensores, juntamente com *softwares* adequados, para realizar serviços como monitoramento. A expectativa de popularização das RSSF empregadas em diferentes contextos justifica o desafio da pesquisa nessa área. Assim, a pesquisa e o desenvolvimento de projetos na área de RSSF é tanto de interesse científico, quanto tecnológico e econômico.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Comparar diferentes abordagens para resolver o problema de atribuição de papéis em RSSF no contexto estático e dinâmico e, avaliar as vantagens e desvantagens de cada uma delas.

1.2.2 Específicos

- Elaborar um modelo de otimização para o problema de atribuição de papéis em RSSF, estático, englobando os problemas de cobertura, roteamento e atribuição de papéis propriamente.
- Aplicar a metaheurística Algoritmos Genéticos na resolução do problema de atribuição de papéis em RSSF também no contexto estático.
- Simular a atribuição de papéis em uma RSSF de forma dinâmica, resolvendo o problema em duas abordagens:
 - Centralizada e periódica;
 - Distribuída e *online*.

1.3 Principais Contribuições

Ao longo do processo de elaboração deste trabalho, foram produzidos e publicados dois trabalhos científicos em anais de congressos. Durante o ano de 2006, o artigo intitulado *Um Modelo de Otimização para o Problema de Atribuição de Papéis em Redes de Sensores Sem Fio*, foi publicado nos Anais do XXXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, realizado em Goiânia - GO, de 12 a 15 de setembro de 2006.

Em 2007, foi publicado o artigo intitulado *Exact and Heuristic Approaches for Role Assignment Problem in Wireless Sensor Networks*, em International Network Optimization Conference Proceedings, realizado de 22 a 25 de abril de 2007, em Spa - Bélgica.

Ainda em 2007, foi submetido e aceito o trabalho denominado *Uma Abordagem Periódica para o Problema de Atribuição de Papéis em Redes de Sensores Sem Fio*, no XXXIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional que acontecerá de 28 a 31 de agosto de 2007, Fortaleza - Ceará.

1.4 Organização

Este trabalho está organizado como segue. O capítulo 2 apresenta os principais conceitos sobre RSSF. No capítulo 3, é apresentada a definição do problema de atribuição de papéis em RSSF, bem como trabalhos relacionados. Além disso, é proposta uma formulação matemática para o problema. O algoritmo genético desenvolvido para o problema é descrito no capítulo 4. Resultados computacionais são apresentados no capítulo 5. No capítulo 6 são propostas duas abordagens para resolução do problema de forma dinâmica, através de técnicas de simulação e o último capítulo conclui o trabalho.

Capítulo 2

Redes de Sensores Sem Fio

As RSSF podem ser vistas como um tipo especial de rede móvel *ad-hoc* que tem a capacidade de monitorar o mundo físico através de pequenos sensores. Uma rede de sensores sem fio possui um vasto número de nós sensores distribuídos. Seus elementos computacionais comunicam-se diretamente entre si, e tendem a executar uma tarefa colaborativa. A RSSF é composta basicamente por um conjunto de nós sensores e um ou mais nós sorvedouros. Os nós sensores são utilizados em vasto número, e apresentam capacidades de sensoriamento, memória, processamento e comunicação, limitação de energia e podem ser móveis ou imóveis. Já, os nós sorvedouros geralmente não tem limitação de energia, podendo também ter a característica de mobilidade. A figura 2.1 mostra uma representação de um RSSF, com a detecção de um evento pelos nós sensores e encaminhamento da informação monitorada para um nó sorvedouro.

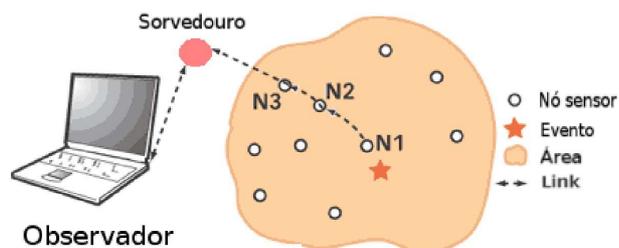


Figura 2.1: Representação esquemática de uma RSSF

2.1 Classificação das RSSF

A classificação das RSSF é baseada em diversos aspectos, tais como configuração, tipos de sensoriamento, tipos de comunicação e processamento. A classificação de uma RSSF é diretamente ligada ao seu propósito e área de aplicação. Dessa forma, a escolha das funções

exercidas pelos nós, da arquitetura, da distribuição e disposição dos nós, do protocolo de comunicação, entre outros, é influenciada pela tarefa que a rede se propõe a executar e pelo objetivo da aplicação.

De acordo com Römer e Mattern (2004), as RSSF podem ser divididas em classes, de acordo com diferentes aspectos.

- Distribuição

A distribuição dos nós na área de monitoramento pode ser feita de maneira aleatória ou instalada em pontos específicos. Além disso, a distribuição pode ser feita em uma única vez (instalação), ou pode ser um processo contínuo, no qual mais nós vão sendo distribuídos ao longo do uso da rede.

Classes: aleatória x manual; "one-time" x iterativa.

- Mobilidade

Os nós sensores podem ter sua localização alterada após a distribuição inicial. Tal mobilidade pode resultar de influências do ambiente, como vento ou água, através de entidades móveis (por exemplo, animais) ou mesmo porque possuem habilidades automáticas, ou seja, por motivo desejado ou efeito acidental. Assim, a mobilidade pode ser ativa ou passiva. Ainda, o movimento pode ser ocasional, com longos períodos de imobilidade entre eles ou constante.

Classes: imóvel x parcialmente x móvel; ativo x passivo; ocasional x contínuo.

- Custo, Tamanho, Recurso e Energia

De acordo com as necessidades da aplicação, os nós sensores podem ter diferentes tamanhos, variando de uma caixa de sapatos (por exemplo, numa estação de tempo) até ser praticamente invisível (aplicações militares). Da mesma forma, o custo desses dispositivos pode ser bastante elevado (redes com poucos nós, mas muito poderosos) até custar centavos (redes de larga escala, composta por sensores bem simples). A variação do tamanho dos sensores e seu custo implica diretamente na capacidade de energia e outros recursos, tais como processamento, armazenamento e comunicação.

Classes: brick x matchbox x grain x dust

- Composição

Inicialmente, foi considerado que as RSSF seriam tipicamente constituídas por dispositivos homogêneos, ou seja, idênticos do ponto de vista de hardware e software. No entanto, em diversos protótipos disponíveis atualmente, passou-se a considerar redes compostas por diferentes dispositivos. Dessa forma, os nós podem diferir em tipo e número de sensores acoplados, alguns nós podem ser equipados com hardware especial, como por exemplo um GPS, entre outros.

Classes: homogêneas x heterogêneas

- Comunicação

A comunicação sem fio entre os sensores pode ser realizada por diferentes modalidades, sendo a mais comum através de ondas de rádio. Às vezes podem ser usadas múltiplas modalidades por um simples sistema de redes.

Classes: rádio x luz x indutivo x capacitivo x som

- Infraestrutura

Dois formas básicas de construção da rede de comunicação são aquelas baseadas em infraestrutura e redes *ad-hoc*. Nas redes baseadas em infraestrutura, os nós sensores podem se comunicar diretamente apenas com a estação base, logo, a comunicação com outros sensores é mediada pela mesma. Por outro lado, nas redes *ad-hoc* os nós podem se comunicar diretamente uns com os outros sem a necessidade de uma infraestrutura.

Classes: estruturada x ad-hoc

- Topologia

A topologia de uma rede é definida pelo seu diâmetro, isto é, o número máximo de *hops* entre quaisquer dois nós da rede. Uma rede *single-hop* é a forma mais simples, onde cada nó sensor é capaz de se comunicar com qualquer outro nó diretamente. Uma rede estruturada com uma estação base forma uma rede em estrela, com um diâmetro de dois *hops*. Uma rede *multi-hop* pode formar um grafo arbitrário, mas geralmente é construída tal como uma árvore ou um conjunto de redes em estrela conectadas.

Classes: single-hop x star x networked stars x árvore x grafo arbitrário

- Cobertura

A cobertura de uma área é definida pelo alcance dos sensores na região de interesse. Com uma cobertura esparsa, apenas partes da área de interesse são cobertas pelos sensores. Com uma cobertura densa, a área é completamente (ou quase completamente) coberta pelos sensores. Sendo a cobertura redundante, múltiplos sensores cobrem a mesma área física.

Classes: esparsa x densa x redundante

- Conectividade

O alcance da comunicação e localização física dos nós definem a conectividade da rede. Se sempre existe uma conexão entre quaisquer dois nós, a rede é dita conexa. A conectividade é intermitente se a rede for particionada ocasionalmente. Caso os nós estejam isolados a maior parte do tempo, ela é dita esporádica.

Classes: conexa x intermitente x esporádica

- Tamanho da rede

O número de nós de uma rede é determinado principalmente por requerimentos relacionados à conectividade e cobertura da rede, e pela dimensão da área de interesse. O tamanho da rede pode variar de poucos nós a milhares de nós sensores.

- Tempo de vida

De acordo com a aplicação, o tempo de vida de uma rede pode variar de algumas horas a vários anos.

Outros aspectos da rede podem ser considerados a fim de classificar as RSSF como apresentado por Tilak et al. (2002); Cheekiralla e Engels (2005); Li e Yang (2006).

2.2 Aplicações

As aplicações das RSSF são as mais variadas possíveis, auxiliando o trabalho humano em uma diversidade de áreas. As aplicações englobam diferentes áreas, podendo ser classificadas em militar, ambiental, saúde, comercial, doméstica, entre outras, conforme Akyildiz et al. (2002).

- Militar

O conceito das redes de sensores tornou-se uma abordagem interessante para os campos de batalha, uma vez que tais redes são baseadas na distribuição densa de nós sensores descartáveis e de baixo custo, sendo que a destruição de alguns nós por ações hostis não afeta uma operação militar tanto quanto a destruição de um sensor tradicional. Algumas das aplicações militares de redes de sensores são: monitoramento de forças amigas, equipamento e munição; reconhecimento de forças inimigas e do terreno; detecção e reconhecimento de ataques nucleares, biológicos e químicos.

- Ambiental

As aplicações ambientais mostram-se também de grande importância, auxiliando o trabalho humano, em variadas funcionalidades. Como exemplos, podem ser citadas as seguintes aplicações: rastreamento do movimento dos pássaros, de animais pequenos e de insetos; monitoramento das circunstâncias ambientais que afetam colheitas e animais domésticos; irrigação; detecção química/biológica; monitoramento biológico, da Terra e ambiental em contextos marítimos, terrestres, e atmosféricos; detecção de fogo numa floresta; pesquisa meteorológica ou geofísica; detecção de inundação; estudo da poluição.

- Saúde

Na área de saúde, também podem ser encontradas algumas aplicações das redes de sensores, como por exemplo, monitoramento integrado do paciente; diagnóstico; administração de remédios nos hospitais; monitoramento dos movimentos e dos processos internos dos insetos ou de outros animais pequenos; monitoramento de condições fisiológicas humanas; rastreamento e monitoramento de médicos e pacientes dentro de um hospital.

- Comercial

Algumas das aplicações comerciais mais comuns são: gerenciamento de inventário; moni-

toramento de qualidade de produto; construção de ambientes inteligentes para escritório; controle ambiental em edifícios; brinquedos interativos; museus interativos; controle e automatização do processo de fábrica; transporte; detecção e monitoramento de roubos de carro; rastreamento e detecção de veículos; segurança em comércios, entre outros.

- Doméstica

Como aplicações domésticas podem ser consideradas a automação de aparelhos domésticos, como refrigeradores, fornos de microondas, etc. Estes nós sensores embutidos nos dispositivos domésticos podem interagir com a rede externa através de Internet ou satélite, permitindo que os usuários controlem os dispositivos domésticos local e remotamente com mais facilidade, ao que se denomina de "smart spaces".

2.3 Limitações e Perspectivas

A principal restrição das RSSF é a severa limitação de energia em seus nós sensores. Por isso, esse aspecto é objeto de estudo de muitos trabalhos, como apresentado por Youssef-Massaad et al. (2004); Rajeswaran e Negi (2004); Hu e Li (2004); Zhao et al. (2004); Nakamura et al. (2005); Menezes (2004); Oliveira (2004). Considerando que a reposição de baterias é inviável, devido a fatores como grande número de nós e localização em ambientes de difícil acesso, a restrição de energia torna essas redes mais difíceis de serem projetadas. Tal restrição é considerada um grande desafio na direção de estender o tempo de vida operacional da rede.

Outras restrições, também comuns, são as falhas de comunicação, a variação nas condições da rede e a falência dos nós. Dessa forma, é necessário prover mecanismos de adaptação e auto-configuração.

Assim, um dos principais focos num projeto de RSSF é aumentar o potencial dessas redes, de forma a maximizar seu tempo de vida, ou seja, reduzir e balancear o gasto de energia.

As perspectivas de utilização das RSSF são amplas e muitas pesquisas tem sido empreendidas nessa área, porém, os desafios também são muitos. De acordo com Loureiro (2007), do ponto de vista científico, projetar aplicações práticas para RSSF é desafiante devido à larga escala, volatilidade da comunicação e restrições de consumo de energia em cada nó. Além disso, as RSSF devem ser pensadas para cada contexto, requerendo avaliação cuidadosa, pois soluções para um dado contexto podem não se aplicáveis em outros. Do ponto de vista de aplicação, as RSSF apresentam ampla aplicabilidade em diversos cenários, incluindo monitoramento ambiental, agricultura, pecuária, rastreamento de eventos, coordenação de ações, mineração e processamento de informação. Considerando a riqueza ambiental brasileira, as RSSF podem auxiliar no processo de conhecimento e monitoramento ambiental, principalmente do Pantanal e Região Amazônica.

Com relação à vocação brasileira para agropecuária, na agricultura as RSSF podem mo-

nitorar e rastrear a qualidade do produto agrícola desde a colheita no campo até a mesa do consumidor. As exigências para produtos para exportação, num futuro próximo, indicam que somente serão comercializáveis alimentos rastreáveis (condições em que foram produzidos, processados, etc.). Na pecuária, as RSSF também podem ter aplicabilidade nos programas de avaliação genética de bovinos, cruzamentos, comportamentos dos animais em área de confinamento, etc (Loureiro, 2007).

Além desses aspectos, podemos antever a importância destas redes em relação ao monitoramento das mudanças ambientais resultantes da pressão ocasionada pela expansão das fronteiras agrícola e agropecuária. Na atualidade, o Brasil encontra-se deficiente nesse monitoramento, fato constatado pelas frequentes notícias de desflorestamento, extração clandestina de madeira e invasão e ocupação de áreas do Estado.

Capítulo 3

Problema de Atribuição de Papéis em RSSF

O Problema de Atribuição de Papéis consiste em determinar papéis específicos para cada nó sensor, de forma que estes empreendam diferentes funções, de acordo com as necessidades da aplicação. O comportamento de cada nó sensor deve ser adaptado para desempenhar um determinado papel. Dessa forma, é possível determinar papéis locais dentro de uma rede, em um contexto colaborativo, e assim definir a mudança de estado e capacidade dos nós.

A atribuição de papéis pode ser realizada em diversos níveis, de acordo com os objetivos de cada aplicação. Tal atribuição também pode ser estática ou dinâmica. A atribuição estática consiste em definir papéis particulares para os nós no início de funcionamento do sistema, mantendo-os inalterados até o final. Já na atribuição dinâmica, o papel atribuído a cada nó pode variar durante o tempo de vida da rede. Neste contexto, cada nova atribuição pode ser definida periodicamente, a cada t unidades de tempo (pró-ativa), ou por uma atribuição *online*, na qual as novas atribuições ocorrem constantemente, estimuladas pela ocorrência de novos eventos (reativa).

A atribuição de papéis estática apresenta a vantagem para o desenvolvedor do sistema, que não precisa se preocupar em como modelar essas mudanças de funções nos nós sensores, para as novas atribuições. Por outro lado, a aplicação funcionando de forma estática fica bastante restrita e, na maioria dos casos, não atende as necessidades do monitoramento desejado. Na atribuição de papéis dinâmica, o projeto do sistema deve ser elaborado mais criteriosamente pelo desenvolvedor, com a vantagem de fornecer melhores resultados, já que leva em consideração momentos específicos, ou seja, as características naquele dado momento.

3.1 Casos Particulares do Problema

De acordo com Frank e Römer (2005), alguns problemas de otimização são instâncias clássicas do problema de atribuição de papéis, como por exemplo, *Covering Problem*, *Clustering Problem* e *In-Network Data Aggregation*.

- *Coverage Problem*

Certa área é dita coberta se todas suas regiões físicas encontram-se dentro do raio de observação de pelo menos um nó sensor. Em redes densas, cada região pode ser coberta por muitos nós equivalentes. Assim, o tempo de vida da rede pode ser estendido desligando esses nós redundantes e trocando-os novamente à medida que os nós ativos vão consumindo sua energia.

Um dos possíveis papéis de um nó são então ON e OFF. Os requisitos são de que a área de interesse deve ser coberta pelos nós sensores ON e, estes, devem possuir energia residual suficiente para que sejam utilizados. Na literatura este problema é conhecido como controle de densidade.

- *Clustering Problem*

Clusterização é uma técnica comum que pode melhorar a eficiência de entrega de dados. Assim, elege-se um *clusterhead*, que atua como um nó com maior poder de comunicação e processamento, para cada *cluster* da rede. Dessa maneira, ele atua como um *hub* para os demais nós da vizinhança, denominados *slaves*. Os *slaves* comunicam apenas diretamente com seu *clusterhead*, ao passo que este deve enviar os dados à estação-base. Definem-se ainda os *gateways*, que atuam como *slaves* de mais de um *cluster*. Estes desempenham o papel de interconectar múltiplos *clusters*, encaminhando mensagens entre eles.

Neste contexto, os papéis possíveis são de *clusterhead* (CH), *gateway* (GW) ou *slave* (SLAVE). Um dos requisitos desse problema é que os *clusterheads* devam ser dispositivos mais poderosos em termos de processamento, memória, comunicação e provisão de energia. Este problema trata questões de hierarquia e roteamento.

- *In-Network Data Aggregation Problem*

A redução de transmissão de dados na comunicação é um fator de grande importância nas RSSF devido à escassez de energia e ao alto custo de energia na comunicação sem fio. *In-Network Data Aggregation* é uma forma de redução de dados, através de certos nós que agregam os dados sensorizados pelas diversas fontes. Neste caso, os papéis definidos são *source* (SOURCE), *aggregator* (AGG) e *sink* (SINK). Alguns dos requisitos são de que os nós AGG devam estar localizados próximos a muitas fontes e que nós AGG de mais alto nível devam estar mais próximos ao *sink*. São tratadas questões de hierarquia, roteamento e fusão.

- *Atribuição de Funções de Sensoriamento*

Um outro problema de atribuição de papéis consiste em definir a função de um nó sensor em um momento específico, a fim de atender os objetivos da aplicação em tal momento. Nesse caso, um nó sensor pode alternar suas funções, como por exemplo, deixar de coletar dados de temperatura e passar a coletar imagens. Neste contexto, alguns dos possíveis papéis de um nó sensor são: sensor de temperatura, umidade, pressão, infravermelho, radiação, áudio, vídeo, entre outros.

Diante dos problemas apresentados, que podem ser considerados casos particulares do problema de atribuição de papéis, é possível tratá-lo em diferentes graus de complexidade. O problema de atribuição de papéis pode ser resolvido como sendo um problema que envolve um aspecto isolado, ou como um problema que combina múltiplos fatores ligados à atribuição de papéis. À medida que o número de fatores combinados aumenta maior se torna sua complexidade.

O problema tratado neste trabalho considera o problema de atribuição de funções de sensoriamento juntamente com controle de densidade, cobertura e roteamento em RSSF.

3.2 Complexidade

O problema de escolher o papel que cada nó irá desempenhar, satisfazendo suas propriedades, pertence à categoria NP-difícil uma vez que o problema de cobertura (um caso particular) é um problema NP-difícil, como foi demonstrado por Slijepcevic e Potkonjak (2001). Existe uma similaridade entre o problema de cobertura em RSSF e o problema da galeria de arte (O'Rourke, 1987), que pode ser definido como "de que maneira determinar o número mínimo de guardas necessários para cobrir o interior de uma galeria de arte".

Outro problema bastante conhecido e relacionado a ele, é o problema de localização de facilidades. Nesse caso, um conjunto de facilidades devem atender um conjunto de pontos de demanda (que corresponde a cobrir uma área em RSSF com um conjunto de nós sensores). O objetivo é definir a localização das facilidades a fim de otimizar os custos de transporte e instalação (Drezner e Hamacher, 2002).

Assim, o problema de atribuição de papéis possui ordem de complexidade combinatorial. O esforço computacional para a sua resolução cresce exponencialmente com o tamanho do problema (dado pelo número de nós).

3.3 Trabalhos Relacionados

Akyildiz et al. (2002) mostram que as RSSF tornaram-se viáveis pela convergência de tecnologia de sistemas micro-eleto-mecânicos, comunicação sem fio e eletrônica digital. As possíveis tarefas de sensoriamento e as aplicações de redes de sensores são exploradas, bem como uma revisão de fatores que influenciam o projeto dessas redes, tais como tolerância a falha, escalabilidade, restrições de hardware, custos de produção, ambientes, comunicação, consumo de energia, entre outros.

Yoneki e Bacon (2005) apresentam a importância de um bom projeto do middleware¹/ aplicação, uma vez que este deve prover funções que criam novas potencialidades para extração eficiente, manipulação, transporte, e representação da informação derivada dos dados capturados pelos sensores. Também são relatadas tendências recentes na pesquisa de RSSF, incluindo uma visão geral das várias categorias de RSSF, uma revisão das tecnologias de RSSF e uma discussão de protótipos de pesquisa e aplicações existentes.

Em um projeto de RSSF, sendo o objetivo central atender as necessidades da aplicação, buscando em paralelo maximizar o tempo de vida operacional da rede, é preciso garantir ainda questões de capacidade e roteamento. Um nó sensor possui severas restrições de energia, e deve possuir certa capacidade para executar as funções de monitoramento. Assim, mostra-se necessário avaliar suas capacidades com relação à transmissão, taxas de bit do enlace (banda), e mudança de função. Como pode ser visto no estudo de Youssef-Massaad et al. (2004), a principal preocupação é voltada para capacidade de transmissão, porém, é preciso considerar outros gastos, como no caso da mudança de uma função para outra, já que esta implica em consumo de energia.

O roteamento dos dados também é um aspecto fundamental em um projeto de RSSF. Ao monitorar uma região específica, é preciso garantir que os dados coletados realmente alcancem o destino desejado. Esse é um aspecto importante que deve ser considerado no projeto da rede, pelo fato de consumir energia considerável dos nós, ocasionando falência dos mesmos, podendo possivelmente deixar alguma região descoberta por falta de caminhos viáveis de roteamento. Uma revisão das diferentes técnicas de roteamento é descrita por Al-Karaki e Kamal (2004).

Existem diversos tipos de sensores, para desempenhar as mais diferentes funções. Os mais conhecidos são sensores de temperatura, de umidade, de pressão, de infravermelho, de radiação, de áudio (microfone), de vídeo (câmera) (Ruiz et al., 2003). As funções podem ser de monitoramento climático, de movimento, de equipamento, etc.; ou de coleta de dados, tais como sísmico, acústico, médico, etc.

¹Programa responsável pela mediação entre outros softwares, principalmente em aplicações distribuídas. É utilizado para transferir informações entre programas ocultando do programador diferenças de protocolos de comunicação, plataformas e dependências do sistema operacional.

Uma proposta de algoritmos para atribuição de papéis genérica pode ser encontrada no trabalho desenvolvido por Frank e Römer (2005). Tal abstração permite a atribuição de papéis aos nós sensores baseada nas propriedades dos nós e na sua vizinhança. Um algoritmo distribuído é apresentado e avaliado utilizando instâncias específicas de três problemas: *coverage*, *clustering* e *aggregation*. O trabalho mostra que esta atribuição é eficiente e robusta e praticamente viável no contexto de RSSF.

O estudo apresentado por Bhardwaj e Chandrakasan (2002), mostra que a técnica de atribuição de papéis é conceitualmente simples e extremamente poderosa já que esta pode permitir maneiras arbitrariamente complexas de coleta de dados e ainda fornecer limites superiores através de programas lineares. Os autores demonstram que uma classe de problemas de atribuição de papéis é passível de uma transformação em programas lineares baseados em fluxo em redes, que podem ser resolvidos em tempo polinomial. Neste trabalho, três tipos de papéis para os nós sensores são considerados: *sensor* (coleta informação e transmite), *relay* (simplesmente encaminha adiante a informação recebida) e *aggregator* (agrega dados recebidos de dois ou mais fluxos de dados em um único fluxo). Assim como no trabalho desta dissertação, os autores buscam maximizar o tempo de vida da rede.

No trabalho de Dasgupta et al. (2003), foi desenvolvido um algoritmo para resolver o problema de posicionamento dos nós na área de monitoramento e atribuição de papéis tal que o tempo de vida do sistema seja maximizado e, ao mesmo tempo, garantindo que cada ponto/região de interesse seja coberto por, no mínimo, um nó sensor. Os papéis considerados neste trabalho são definidos como *sensor* e *relay*. Nós *relay* agregam e transmitem pacotes de dados, enquanto nós do tipo *sensor* podem apenas sensoriar e gerar pacotes de dados. Assim, são tratados dois problemas, o de atribuição de papéis e o de posicionamento dos nós, além de serem utilizadas técnicas de agregação de dados. Os resultados alcançados demonstraram que o algoritmo pode oferecer melhorias significativas no tempo de vida do sistema, quando comparado com posicionamento aleatório e atribuição de papéis dos nós.

3.4 Definição Formal do Problema

Uma definição formal do problema pode ser descrita como: dado um conjunto de nós sensores S , um conjunto de nós sorvedouros M , uma área de sensoriamento A e um conjunto de pontos de demanda D , com um conjunto de papéis P , necessários para cobrir A ; a resolução do problema consiste em determinar o papel de cada um dos nós sensores garantindo a cobertura dos pontos de demanda com os papéis necessários, bem como a existência de uma rota partindo de cada nó sensor para um dos nós sorvedouros, visando a minimizar o consumo de energia. Assim, diante das diversas possibilidades de se atribuir os papéis aos nós, procura-se realizar uma atribuição que otimize o consumo de energia dos nós sensores.

3.5 Modelo Matemático

O modelo de otimização desenvolvido para o problema de atribuição de papéis em RSSF é apresentado a seguir. A partir de tal formulação, é possível utilizar técnicas de programação linear inteira mista para resolver o problema. O modelo engloba os problemas de controle de densidade, cobertura, roteamento e atribuição de funções de sensoriamento em um contexto estático. Assim, pode ser obtida uma solução que especifica qual o conjunto de nós sensores que devem ser ativados (cada qual com um papel), que garanta a cobertura da área, além de determinar as rotas das informações entre os nós ativos e os nós sorvedouros. A área a ser monitorada é considerada contínua, porém discretizada em um conjunto de pontos de demanda.

Dado um grafo $G = (N, A)$, onde:

N : conjunto de nós

A : conjunto de arcos entre os nós que estão no raio de comunicação e sensoriamento dos sensores.

Têm-se os seguintes subconjuntos de nós e de arcos:

N^s : nós sensores.

N^m : nós sorvedouros.

N^d : pontos de demanda.

A^c : arcos que conectam nós sensores a pontos de demanda.

A^s : arcos que conectam nós sensores a outros nós sensores.

A^m : arcos que conectam nós sensores a nós sorvedouros.

$E_j(A^s)$: arcos $(i, j) \in A^s$ que chegam em um nó sensor $j \in N^s$.

$S_j(A^s)$: arcos $(j, k) \in A^s$ que saem de um nó sensor $j \in N^s$.

Seja:

D : matriz de energia onde cada d_{ij}^p representa a energia de comunicação para um papel p , entre o nó sensor i e o nó sensor ou sorvedouro j . Essa energia é calculada em função da distância entre os nós e do tipo de papel.

P : conjunto de papéis que um nó sensor pode assumir.

Sejam os parâmetros:

c_l^p : energia para ativar e manter o nó sensor l com papel p .

M : penalidade aplicada quando um ponto de demanda não é coberto.

T^1 : número de pontos de demanda.

b_l : capacidade de um nó sensor l .

Sejam as seguintes variáveis do modelo:

x_{lj}^p : variável que possui o valor 1 se o nó sensor l cobre o ponto de demanda j com papel p e

0 caso contrário.

z_{ij}^{lp} : variável que possui o valor 1 se o arco $(ij) \in (A^s \cup A^m)$ está no caminho entre o nó sensor l com papel p e um nó sorvedouro e 0 caso contrário.

t_l^p : possui o valor 1 se o nó sensor l está ativo com papel p e 0 caso contrário.

h_j : variável binária que representa a não cobertura de um ponto de demanda j .

O modelo de otimização proposto pode ser utilizado para resolver o problema de atribuição de papéis em redes com diversas características, como por exemplo, redes homogêneas ou heterogêneas, sensores posicionados aleatoriamente ou em posições específicas, etc. Assim, o modelo é adaptável a diferentes aplicações. Resolvendo o modelo, a solução ótima especifica o conjunto de nós sensores que devem ser ativados e qual o seu papel (variáveis t_l^p), garantindo a cobertura da área (variáveis x_{lj}^p) e o roteamento das informações (variáveis z_{ij}^{lp}).

A seguir, é apresentado o modelo de programação linear inteira mista que representa o problema de atribuição de papéis, controle de densidade, cobertura e conectividade em RSSF.

$$\text{Min} \sum_{l \in N^s} \sum_{(i,j) \in A^s \cup A^m} \sum_{p \in P} d_{ij}^p z_{ij}^{lp} + \sum_{l \in N^s} \sum_{p \in P} c_l^p t_l^p + M \sum_{j \in N^d} h_j \quad (3.1)$$

s.t.

$$\sum_{(l,j) \in A^c} x_{lj}^p + h_j \geq 1 \quad \forall j \in N^d, \forall p \in P \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in N^d} x_{lj}^p \leq T^1 t_l^p \quad \forall l \in N^s, \forall p \in P \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in N^s \cup N^m} z_{ij}^{lp} \leq t_i^p \quad \forall l \in N^s, \forall i \in N^s, \forall p \in P \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in N^s} z_{ij}^{lp} \leq t_j^p \quad \forall l \in N^s, \forall j \in N^s, \forall p \in P \quad (3.5)$$

$$\sum_{(ij) \in E_j^s(A^s)} z_{ij}^{lp} - \sum_{(ik) \in S_j^s(A^s \cup A^m)} z_{jk}^{lp} = 0 \quad \forall j \in (N^s - l), \forall l \in N^s, \forall p \in P \quad (3.6)$$

$$\sum_{(ij) \in E_j^s(A^s)} z_{ij}^{lp} - \sum_{(ik) \in S_j^s(A^s \cup A^m)} z_{jk}^{lp} = -t_l^p \quad j = l, \forall l \in N^s, \forall p \in P \quad (3.7)$$

$$\sum_{k \in N^s} d_{lk}^p z_{lk}^{lp} + \sum_{j \in N^s} \sum_{i \in N^s} d_{il}^p z_{il}^{jp} + \sum_{l \in N^s} c_l^p t_l^p \leq b_l \quad \forall l \in N^s, \forall p \in P \quad (3.8)$$

$$\sum_{p \in P} t_l^p \leq 1 \quad \forall l \in N^s \quad (3.9)$$

$$0 \leq x \leq 1 \quad (3.10)$$

$$z, t \in \{0, 1\} \quad (3.11)$$

$$h \geq 0 \quad (3.12)$$

A função objetivo (3.1) visa minimizar o somatório dos custos de energia para transmissão

dos dados entre os nós sensores e os sorvedouros, dos custos de energia para ativar e manter os nós sensores e dos custos de deixar de atender algum ponto de demanda (penalidade). O conjunto de restrições (3.2) garante que cada ponto de demanda com papel p esteja sendo coberto por pelo menos um nó sensor com papel p , caso contrário, encontra-se descoberto. As restrições (3.3) garantem que se um nó sensor encontra-se inativo, ele não deve estar atendendo um ponto de demanda. As restrições (3.4) e (3.5) definem que o fluxo de informações só é possível entre nós ativos. O conjunto (3.6) de restrições garante a conservação de fluxo entre cada nó ativo e o sorvedouro. Em (3.7), as restrições indicam que o roteamento tem origem em um nó l para um sorvedouro. As restrições (3.8) garantem que a capacidade dos nós sensores seja respeitada, ou seja, que tenham energia suficiente para que sejam ativados. Em (3.9), fica garantido que cada nó sensor desempenhe apenas um papel de cada vez. As restrições (3.10) definem as variáveis de cobertura como contínuas entre 0 e 1. Já as restrições (3.11) definem as variáveis de conectividade e ativação como binárias. Finalmente, em (3.12) ficam definidas as variáveis de não cobertura como não negativas.

3.6 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado o problema de atribuição de papéis em RSSF e proposto um modelo de otimização para o mesmo, que pode ser resolvido através de técnicas de programação linear inteira mista utilizando *solvers* disponíveis no mercado.

O procedimento adotado nesse trabalho para validação do modelo consiste na geração de um arquivo .lp que o represente, e consequente execução do mesmo através do *solver* CPLEX (CPLEX, 2007).

Por se tratar de uma abordagem exata, na qual a solução ótima para o problema é buscada, este método mostra-se adequado apenas para instâncias de pequeno porte, uma vez que o problema é de natureza combinatória. Nessa direção, o tempo computacional exigido para resolver o problema na otimalidade é viável. Contudo, uma vez que as RSSF idealizadas apresentam grande número de nós sensores, o uso desse método torna-se impraticável em uma aplicação real.

A solução obtida através de métodos exatos, mostra-se importante do ponto de vista de projeto, a partir da qual podem ser buscadas soluções alternativas, tendo como base comparativa o que seria a solução ideal ou desejada.

Capítulo 4

Algoritmo

O algoritmo aplicado ao problema foi a metaheurística Algoritmo Genético (AG), que é baseado na abordagem evolutiva. Em sistemas biológicos, já foi constatado que a evolução é um fenômeno no qual indivíduos mais aptos permanecem por mais gerações no decorrer do tempo.

Um das vantagens do AG é que dificilmente o processo é encerrado por alcançar uma boa solução ou mesmo um mínimo local. Uma característica de seu comportamento é o fato de dar grandes saltos no espaço de busca, uma vez que os filhos podem ser bem diferentes dos pais. A maior desvantagem é o *crowding*, que ocorre quando um indivíduo, com melhor aptidão se reproduz rapidamente, de forma que cópias dele e de indivíduos muito similares formam uma grande fração da população. O maior problema ocasionado pelo *crowding* é a redução da diversidade da população, deixando o progresso do algoritmo mais lento. Nas próximas seções, é apresentado o funcionamento de um AG, bem como sua utilização na resolução do problema que é objeto de estudo deste trabalho.

4.1 Algoritmo Genético

Os primeiros trabalhos relacionados com Algoritmo Genético surgiram em meados de 1950 quando vários pesquisadores começaram a utilizar computadores para simular sistemas biológicos. Entretanto, seu desenvolvimento se iniciou de fato no início da década de 70 do século passado, coordenado por Holland (1975), com o objetivo de imitar o processo de evolução observado na natureza.

A partir daí, surgiram diversas técnicas de solução de problemas baseados em princípios da evolução natural e hereditariedade, dentre elas está a chamada Programação Evolutiva (PE) na qual se situam os AGs. Programação Evolutiva é um algoritmo genérico probabilístico iterativo que mantém a cada iteração t , uma população de indivíduos (cromossomos) $P(t) =$

$(p_1^t, p_2^t, \dots, p_n^t)$. Em termos matemáticos, cada indivíduo p_i^t , $1 \leq i \leq n$, representa uma solução do problema associado. A cada iteração t , existe um mecanismo que permite a renovação da população, obtendo-se $P(t)$ a partir de $P(t-1)$.

Os AGs constituem uma abstração do processo adaptativo de sistemas naturais. Em primeiro lugar, a evolução se processa por meio de cromossomos, que são dispositivos biológicos armazenadores das características de cada indivíduo. Através de um processo de seleção natural, os cromossomos que apresentam uma estrutura que melhor se adapta ao meio ambiente (*fitness*) se reproduzem com maior frequência. A reprodução é o ponto no qual a evolução se processa. Através da combinação dos materiais genéticos dos ancestrais, novos cromossomos são produzidos. Através de um processo de mutação, os descendentes poderão vir a apresentar características diferentes de seus ancestrais, com um eventual aumento na capacidade de adaptação ao meio.

Dentro desta perspectiva, os aspectos fundamentais são: a estrutura do cromossomo; a função de avaliação; os processos de seleção natural e reprodução; os operadores genéticos, dentre eles o *crossover*, a mutação e a clonagem; a geração da população inicial e a determinação dos parâmetros. Dessa forma, no desenvolvimento dos algoritmos genéticos, os aspectos considerados são baseados nessas características.

4.2 AG aplicado ao problema

Ao ser aplicado ao problema de atribuição de papéis em RSSF, algumas adaptações foram feitas, para adequar cada um dos componentes característicos do AG às particularidades do problema.

1. **Representação da solução:** A representação da solução (figura 4.1) utilizada para o problema consiste em um vetor de tamanho n (número de nós sensores). Cada posição c_i , $i = 0, \dots, n$, admite valores inteiros, indicando se um nó sensor está ativo ou não, e no caso de estar ativo, qual papel de sensoriamento (temperatura, pressão, vídeo) está atribuído a ele. Além disso, um vetor binário de tamanho m (número de pontos de demanda) é usado para indicar se os pontos de demanda estão cobertos ou não e um vetor de rotas indica a conectividade entre os nós.
2. **Geração da população inicial:** A população inicial para o problema de atribuição de papéis foi construída criando um conjunto de soluções (vetores c). As soluções foram geradas por um método construtivo parcialmente guloso, em que a cada iteração um nó sensor é escolhido para ser ativado e assim sucessivamente até que os pontos de demanda tenham sido cobertos ou não exista nenhum nó que não viole a conectividade para ser ativado. O papel a ser atribuído ao nó é sempre aquele que possui o maior número de pontos de demanda descobertos. Assim, para tal papel, um dos nós dentre os 30% com

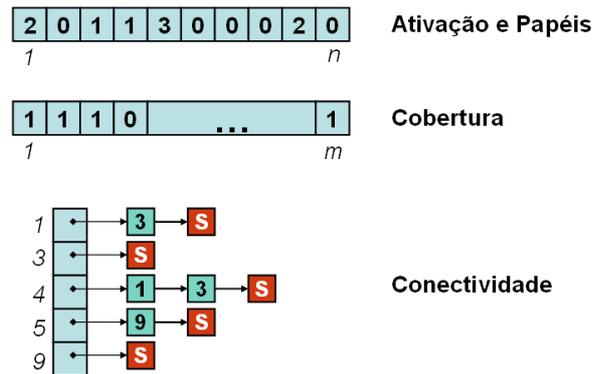


Figura 4.1: Representação de uma solução

a melhor relação custo/benefício é selecionado, isto é, nós que consumam menos energia e cubram o maior número de pontos de demanda. Além disso, é necessária a existência de conectividade para este nó, ou seja, a rota é gerada conjuntamente ao procedimento, sempre buscando conectar o nó ao sensor já ativo que esteja mais próximo a ele.

3. **Função de Avaliação:** A função de avaliação ou aptidão adotada foi a própria função objetivo do problema. Assim, um indivíduo (solução) com menor função de avaliação (gasto de energia) tem maior nível de aptidão do que um com função maior. O não atendimento de algum ponto de demanda acarreta um acréscimo no valor da função de avaliação, através de uma penalidade. Assim, é possível privilegiar soluções que atendam mais pontos. Não foi tratada a questão da sensibilidade da penalidade. O valor da penalidade poderia ser reduzido com o passar o tempo, uma vez que os valores da função de avaliação da população como um todo estarão mais próximos.
4. **Operadores Genéticos:** Nesse trabalho, dois tipos de operadores genéticos foram adotados: mutação e *crossover*.

Mutação: consiste em selecionar dois sensores aleatoriamente e atribuir novos papéis a eles (figura 4.2). A nova atribuição é também aleatória, de forma que possa ser escolhido qualquer um dos papéis ou até mesmo desativar o sensor. Tal atribuição não garante a viabilidade da nova solução, isto é, pontos de demanda podem ficar descobertos e a conectividade para todos os sensores pode não existir. Esta operação é realizada em cada sensor de acordo com uma certa probabilidade, determinada pela taxa de mutação.

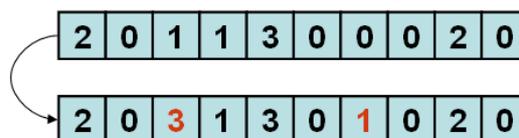


Figura 4.2: Operador de mutação

Crossover: este operador, representado na figura 4.3, constrói dois cromossomos filhos combinando uma subsequência da atribuição associada a um cromossomo pai p_1 e uma subsequência da atribuição associada ao outro cromossomo pai p_2 . É escolhido aleatoriamente um ponto de corte para os cromossomos pais. Os filhos f_1 e f_2 herdam a faixa antes do corte dos pais p_1 e p_2 , respectivamente, e as faixas depois do corte são herdadas de p_1 por f_2 e de p_2 por f_1 . Assim como no processo de mutação, soluções inviáveis podem ser geradas. Em ambos operadores, não é realizado tratamento de viabilidade caso soluções inviáveis sejam geradas. Os cromossomos pais são escolhidos aleatoriamente e de acordo com uma certa probabilidade definida pela taxa de *crossover*, darão origem a cromossomos filhos. O processo de *crossover* é realizado até que a população seja dobrada.

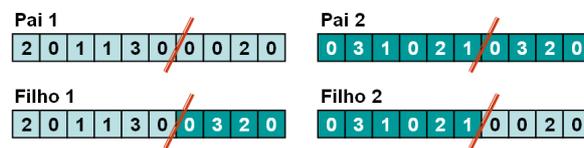


Figura 4.3: Operador de *crossover*

5. **Processo de seleção:** A cada iteração, metade da população é selecionada para sobreviver na próxima geração. A seleção é realizada através de um processo baseado na aptidão dos indivíduos, no qual soluções mais aptas tem mais chances de serem selecionadas, ou seja, a primeira metade da população permanece na geração seguinte.
6. **Definição de parâmetros:** Testes experimentais mostram que quanto maior for a população, melhores serão os resultados alcançados. Mas por outro lado, quanto maior a população, maiores serão também os tempos computacionais exigidos por iteração. O que ocorre na prática é a calibragem dos parâmetros de forma empírica, utilizando o bom senso e o conhecimento prévio do problema. Assim, os valores utilizados foram: 50 indivíduos (tamanho da população), 5% para taxa de mutação, 90% para taxa de *crossover* e número máximo de iterações sem melhora variando entre 20 e 50, dependendo do tamanho do problema.
7. **Pseudo-código do AG:** O algoritmo 4.1, mostrado a seguir, apresenta o pseudo-código do algoritmo genético aplicado ao problema de atribuição de papéis em RSSF. O algoritmo recebe como parâmetros de entrada a rede para a qual se deseja resolver o problema, o tamanho da população inicial, a probabilidade de aplicar o operador de *crossover*, a probabilidade de aplicar o operador de mutação e o número máximo de gerações sem melhora.

A geração da população inicial é feita através da construção de sucessivas soluções gulosas e aleatórias para o problema até se atingir o número de indivíduos (linhas 2 e 3). Uma avaliação da população é realizada a fim de escolher a melhor solução até o momento, de

Algoritmo 4.1: AG-RSSF

Data: *rede, tamPop, taxaCross, taxaMut, numMaxGen*
Result: *melhorSol*

```

1 begin
2   for  $i \leftarrow 1$  to  $tamPop$  do
3      $P.adiciona(criaSolGulosa(.));$            /* geração da população inicial */
4      $melhorSol \leftarrow avaliaPopulacao(.);$            /* avaliação da população */
5     while  $t < numMaxGen$  do
6        $t \leftarrow t + 1;$ 
7        $aplicaCrossover(taxaCross);$            /* processo de crossover */
8        $aplicaMutacao(taxaMut);$            /* processo de mutação */
9        $melhorSol \leftarrow avaliaPopulacao(.);$            /* avaliação da população */
10      if foiAlterada( $melhorSol$ ) then
11         $t \leftarrow 0;$ 
12       $P \leftarrow selecionaPopulacao(.);$            /* processo de seleção */
13    return  $melhorSol;$ 
14 end

```

forma que esta fica armazenada na variável *melhorSol* (linha 4). Em seguida, inicia-se o processo de evolução, respeitando-se o critério de parada, determinado pelo número máximo de gerações sem melhora (linha 5). A variável *t* armazena o número de gerações corrente, sendo incrementada a cada iteração (linha 6) e retornando a zero sempre que uma melhora é obtida. Na linha 7, a nova população $P(t)$ é criada a partir de $P(t-1)$, com o dobro do tamanho da população inicial, que inclui os filhos criados através da operação de *crossover*. A mutação é aplicada a alguns indivíduos da população, de acordo com a probabilidade estabelecida (linha 8). Novamente é realizada uma avaliação da população para definir a melhor solução e os indivíduos sobreviventes. Se a melhor solução for melhorada, a variável *t* retorna a zero (linha 11). Assim, a população é reduzida à metade, ou seja, retorna ao seu tamanho inicial (linha 12). Ao final da execução do algoritmo, a melhor solução é retornada (linha 13).

4.3 Considerações Finais

Um método heurístico para resolução do problema foi apresentado nesse capítulo, seguindo a proposta de programação evolutiva dos AGs.

O uso de metaheurísticas na resolução de problemas combinatórios tem como principal vantagem o fato de encontrar soluções factíveis em um tempo computacional viável. Embora a otimalidade da solução não seja garantida, tais técnicas visam gerar soluções com qualidade próxima à mesma.

A escolha da metaheurística AG nesse trabalho se deve a fatores como ser possível escapar de mínimos locais em sistemas complexos, devido à sua característica de diversificar facilmente

o conjunto de soluções através de operadores genéticos e, além disso, por trabalhar com uma grande quantidade de soluções simultaneamente e permitir que operadores mais complexos sejam incorporados posteriormente a fim de tornar o método mais eficiente.

Capítulo 5

Resultados Computacionais

Foram realizados um conjunto de testes experimentais, para diferentes cenários, a fim de obter um estudo comparativo entre o modelo matemático e a heurística. Os testes computacionais para resolver o problema foram executados utilizando um gerador de instâncias, que é apresentado a seguir.

5.1 Experimentos

As instâncias foram geradas considerando uma disposição aleatória dos nós sensores, em uma área quadrada. Os nós sorvedouros foram posicionados nas extremidades da área. Os pontos de demanda foram dispostos uniformemente em grade na área de monitoramento, sendo atribuídos papéis aleatórios a cada um deles. Foram considerados três papéis distintos, com diferentes custos, de acordo com seu serviço.

A figura 5.1 mostra uma possível representação de uma área a ser monitorada, e a disposição dos nós sensores, sorvedouro e pontos de demanda.

Dois cenários foram considerados nos experimentos, conforme apresentado na tabela 5.1. O primeiro deles mantém a densidade dos sensores, isto é, a área aumenta de tamanho se o número de nós sensores for aumentado. O segundo cenário mantém a mesma dimensão da área, ao aumentar o número de sensores. Ambos os cenários consistem de quatro conjuntos de 33 instâncias cada. Custos diferentes foram definidos para cada papel, uma vez que eles oferecem serviços distintos, por exemplo temperatura, áudio e vídeo. Considerando que o serviço de vídeo implica em um consumo de energia muito maior do que um simples serviço de medição de temperatura, os custos foram baseados nos tamanhos dos pacotes. Além disso, dependendo da distância entre dois nós, a potência de transmissão pode variar.

Os testes foram realizados utilizando o *solver* CPLEX 9.0 (CPLEX, 2007) para resolver

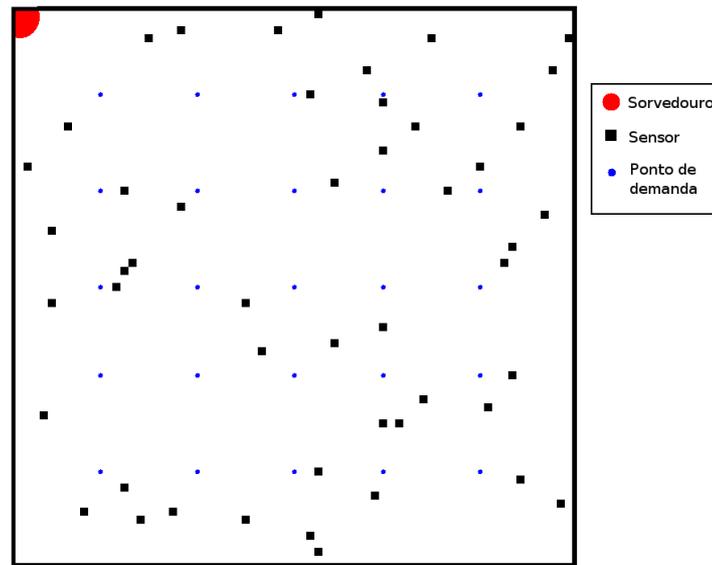


Figura 5.1: Representação de uma área de monitoramento mostrando a posição dos nós sensores, sorvedouro e pontos de demanda

	Cenário1				Cenário 2			
	12	25	51	102	12	25	51	102
# de sensores	12	25	51	102	12	25	51	102
# de sorvedouros	4				4			
# de pontos de demanda	100				100			
# de papéis	3				3			
raio de comunicação (m)	5				5			
raio de sensoriamento (m)	5				5			
área (m)	10x10	15x15	22x22	30x30	10x10			
penalidade	10000				10000			

Tabela 5.1: Cenários experimentais

os conjuntos das instâncias conforme definido. Também foram geradas soluções viáveis para as instâncias via o algoritmo genético proposto no capítulo 4. Em ambos os casos, os testes foram executados sob o sistema operacional Linux, em um microcomputador com processador Pentium 4 de 2.40 GHz e 1GB de memória RAM.

As tabelas A.1, A.2, A.3 e A.4, presentes no apêndice A, apresentam os dados referentes às 33 instâncias de 12, 25, 51 e 102 nós do cenário 1, respectivamente, enquanto as tabelas A.5, A.6, A.7 e A.8 apresentam os dados referentes ao cenário 2 para essas mesmas instâncias.

Para cada método são apresentados o tempo computacional em segundos, o número de nós ativos, o número de pontos descobertos e a função objetivo em mAms, correspondente à energia consumida.

5.2 Gerador de arquivo

O gerador de arquivos para representar as instâncias do problema recebe um conjunto de parâmetros de entrada e retorna um arquivo de saída que representa o modelo matemático correspondente.

Os parâmetros de entrada correspondem a características de configuração conforme segue:

- número e coordenadas dos nós sensores
- número e coordenadas dos nós sorvedouros
- número dos pontos de demanda
- raio de comunicação
- raio de sensoriamento
- dimensão da área
- número e especificação dos papéis
- capacidade de energia dos nós sensores
- custo de não cobertura de um ponto de demanda
- custos de energia de ativação e manutenção dos sensores de acordo com os papéis
- custos de energia de roteamento de acordo com os papéis

A saída do gerador consiste de um arquivo que representa o modelo apresentado no capítulo 3, de acordo com os parâmetros fornecidos. Os mesmos parâmetros de entrada foram utilizados para resolver o problema via AG.

5.3 Análise e Discussão dos Resultados

A partir dos experimentos realizados, foram avaliados três principais aspectos: energia consumida, cobertura da área e tempo computacional. Para cada conjunto contendo 33 instâncias com mesmo número de nós, o valor médio é apresentado. Pode-se notar que o CPLEX fornece o valor ótimo enquanto AG (média) corresponde à média de 10 execuções da mesma instância e AG (melhor) mostra a melhor execução.

Avaliando o consumo de energia, conforme apresentado na figura 5.2, é possível observar que instâncias menores consomem menos energia no cenário 1. Aumentando o número de nós, a diferença entre a heurística e o CPLEX também aumenta.

O cenário 2 apresenta um comportamento diferente, devido ao fato de ter área fixa e aumento no número de nós. Observa-se que existem mais possibilidades de escolher quais nós serão ativados, logo, a atribuição de papéis pode ser melhor. Isso pode ser confirmado pelo decréscimo nos valores de energia à medida que aumenta o número de nós. Assim como no cenário 1, a diferença entre os métodos amplifica com o aumento do número de nós, porém não é significativo quando se considera o aumento de 51 para 102 nós.

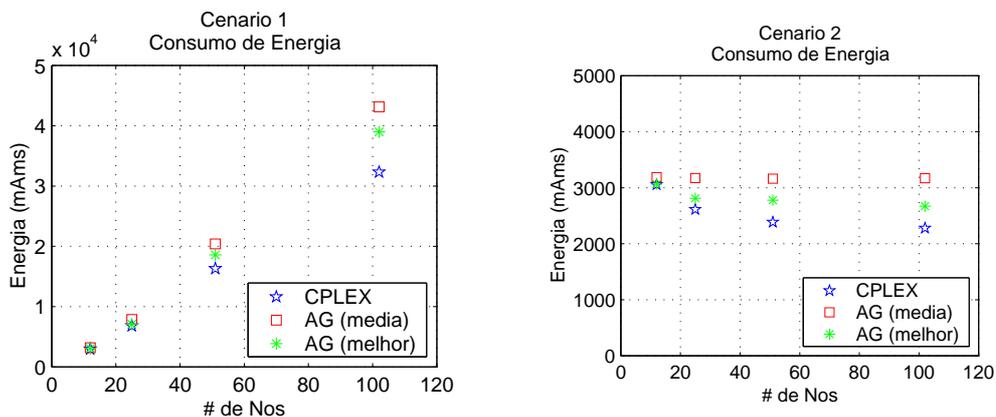


Figura 5.2: Consumo de energia nos cenários 1 e 2 estudados

Em relação ao cenário 1, aumentando o número de nós, o consumo de energia aumenta proporcionalmente nos três casos avaliados: CPLEX, AG (media) e AG (melhor). Observa-se, além disso, que o aumento do número de nós aumenta a diferença no consumo de energia entre a heurística e o CPLEX. Para instâncias de 51 nós, considerando os valores médios, no AG (melhor) há um consumo de energia de 13,9% a mais em relação ao CPLEX, enquanto que para instâncias de 102 nós, observa-se um valor 20,6% mais elevado do que o CPLEX.

Já, no cenário 2 não há diferenças significativas no consumo de energia entre as abordagens, nas instâncias de 12 nós. Para instâncias de 51 nós, considerando os valores médios, AG (melhor) apresenta 16,5% de consumo de energia a mais do que o CPLEX. Para instâncias de 102 nós, essa diferença é de 17,2%, demonstrando apenas um pequeno aumento quando as instâncias variam de 51 para 102 nós.

Considerando-se que no cenário 2 existem mais possibilidades de escolher quais nós serão ativados, a atribuição de papéis pode ser melhor neste caso, ocasionando uma diminuição no consumo de energia.

Em seguida, é possível observar a área de cobertura na figura 5.3. No primeiro cenário, a cobertura da área completa não foi viável. No entanto, considerando que se tem cem pontos de demanda, uma cobertura entre 98% e 100% é aceitável. O cenário 2 mostra uma cobertura de 100% para 3 conjuntos de instâncias. Apenas para o conjunto de 12 nós, 2% dos pontos não foram cobertos. Sendo assim, em relação à cobertura da área, não houve diferenças significativas entre as abordagens.

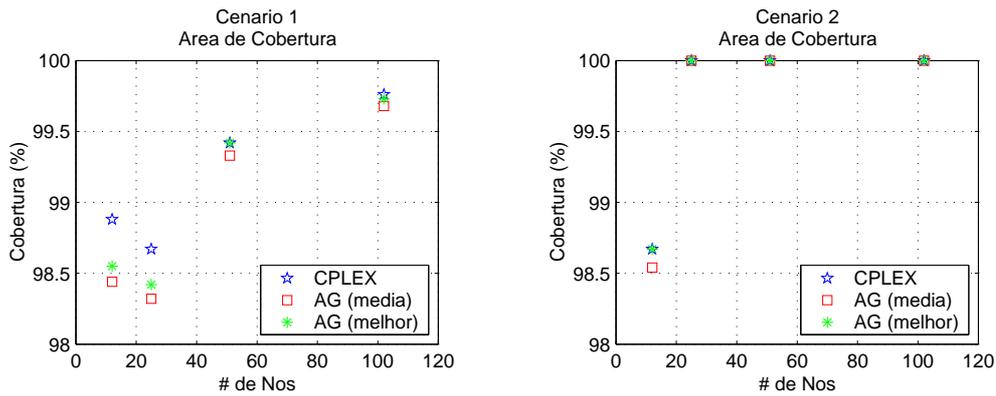


Figura 5.3: Área de cobertura nos cenários 1 e 2 estudados

O tempo computacional apresentado na figura 5.4 mostra que o tempo aumenta rapidamente no método exato, tal que instâncias de 102 nós gastaram até uma hora e meia em alguns casos. Por outro lado, nota-se que o tempo da heurística é um pouco maior do que no método exato nas instâncias de 12 nós, mas aumentando o número de nós, o tempo permanece viável.

No cenário 1, os tempos computacionais na solução exata e na heurística aumentam com o aumento do número de nós, sendo mais acentuado na solução exata. Já, no cenário 2, o tempo computacional no CPLEX aumenta quase que exponencialmente ao aumento no número de nós. Entretanto, na heurística, esse aumento é bem menor, demonstrando uma melhoria bastante significativa de desempenho.

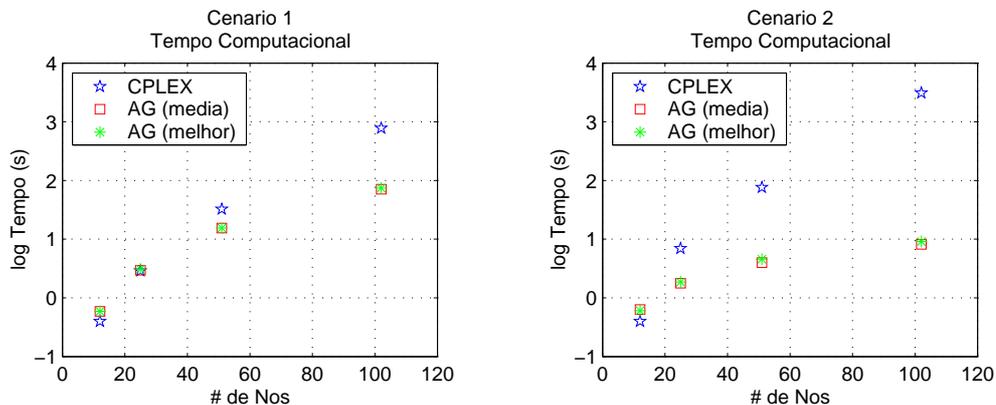
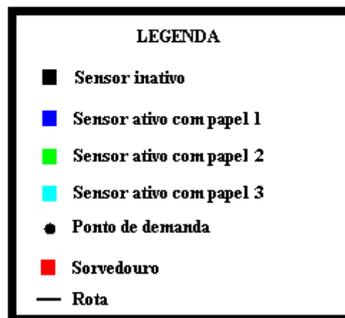


Figura 5.4: Tempo computacional gasto nos cenários 1 e 2 estudados

Analisando-se em conjunto os parâmetros energia consumida, cobertura da área e tempo computacional, é possível inferir que a solução heurística dada pelo AG nas condições do cenário 1 (mesma densidade de nós) proporciona um desempenho pior da rede do que a solução exata obtida pelo CPLEX, principalmente quando se eleva o número de nós de 51 para 102. Por outro lado, nas condições do cenário 2 (aumento na densidade de nós), a solução heurística mostra um desempenho significativamente melhor da rede em comparação com a

solução exata. Observa-se uma pequena elevação no consumo de energia na medida em que se aumenta o número de nós, que, no entanto, é compensada pela significativa diferença nos tempos computacionais, o que torna esta opção viável.

Nas figuras 5.5 e 5.6 são apresentados dois exemplos comparativos entre a solução exata fornecida pelo CPLEX e a solução heurística dada pelo AG.



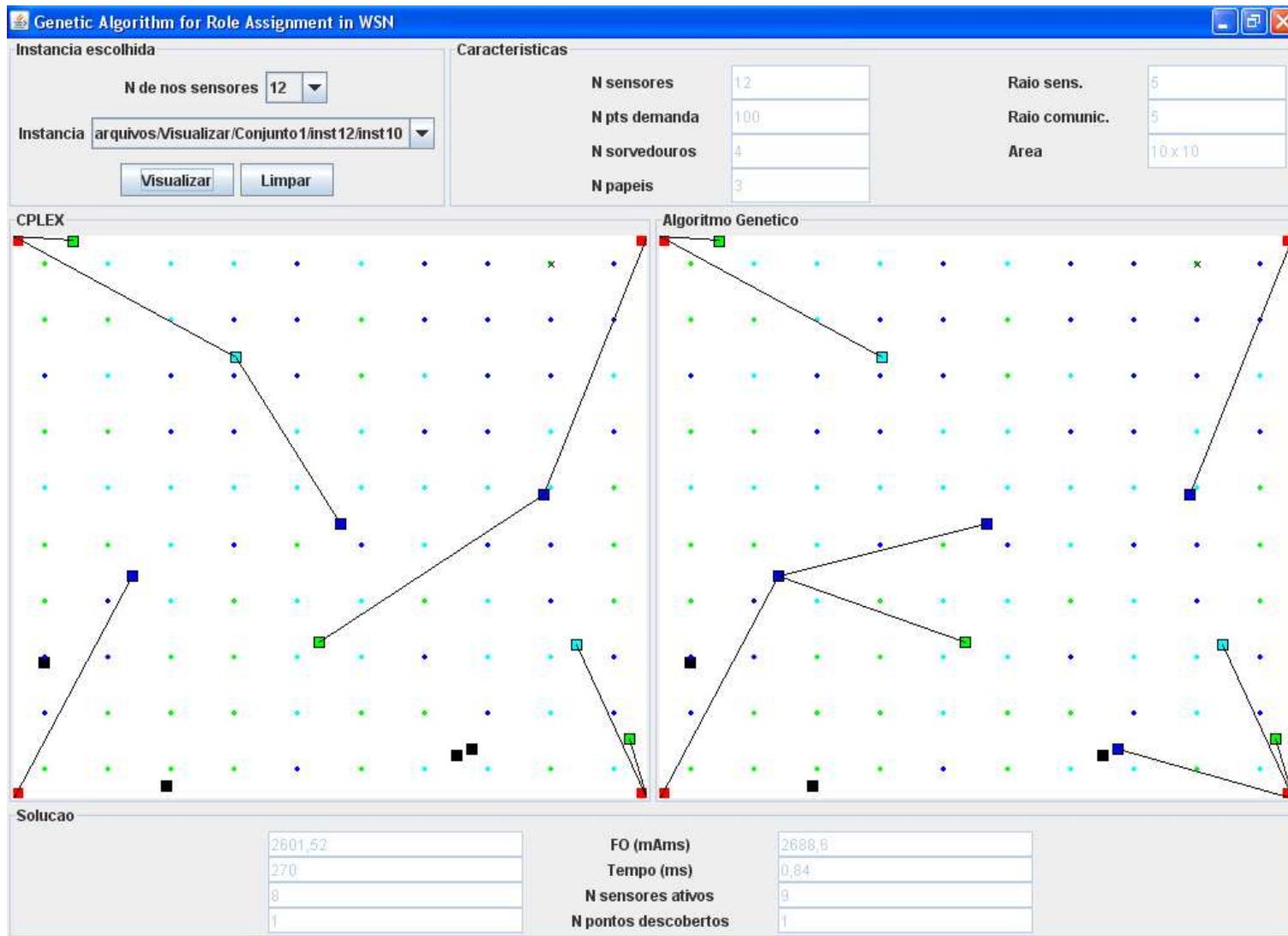


Figura 5.5: Soluções obtidas pelo CPLEX e pelo AG para uma rede de 12 nós

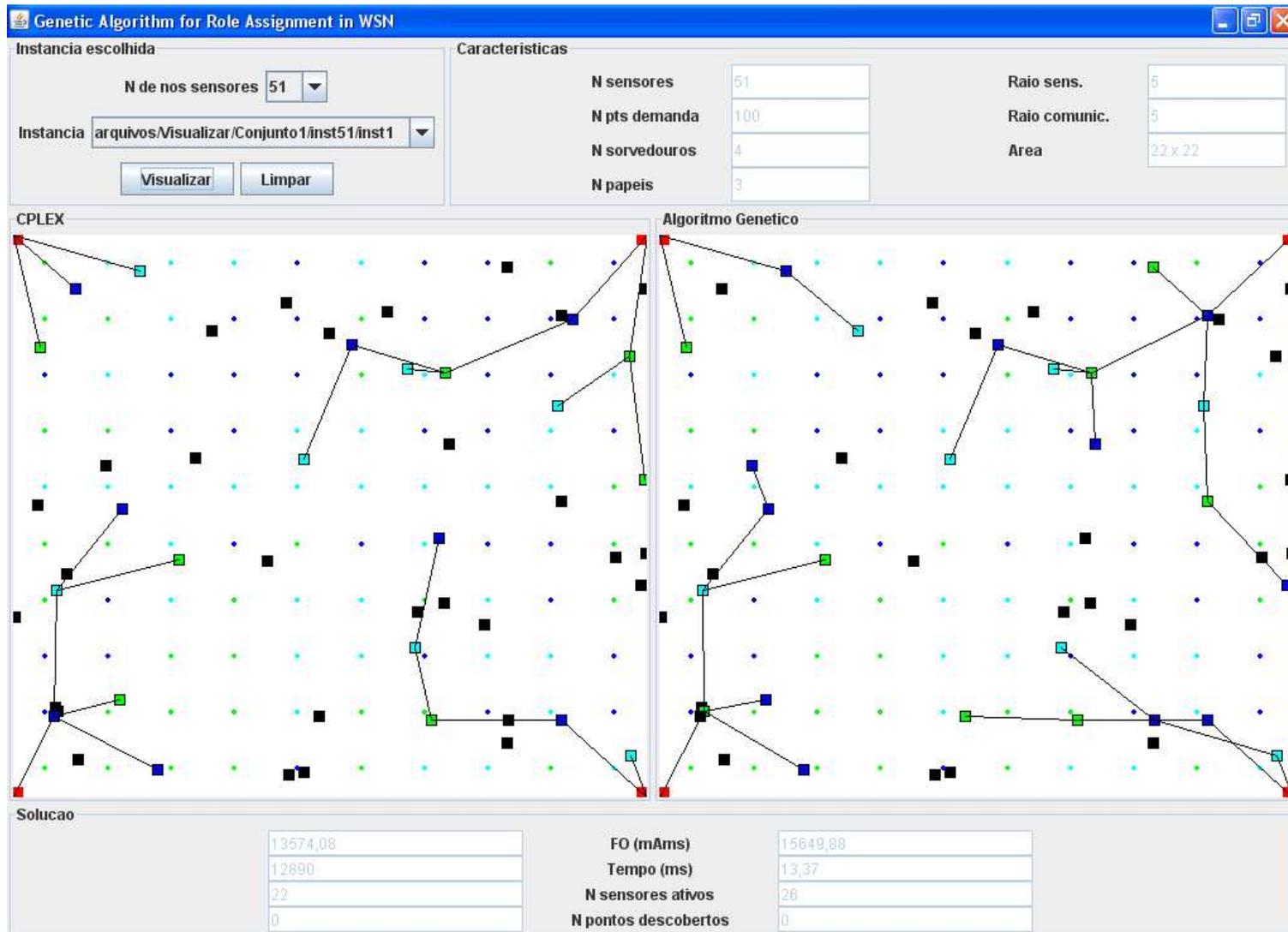


Figura 5.6: Soluções obtidas pelo CPLEX e pelo AG para uma rede de 51 nós

Capítulo 6

Simulação da Atribuição de Papéis em RSSF

Simulação é um método de avaliação experimental bastante utilizado em projetos de pesquisa na área de ciência da computação. Este método permite estudar o comportamento e reações de um determinado sistema através de modelos. Para tal, os modelos são desenvolvidos de forma a imitar parcial ou totalmente as propriedades deste sistema, em uma menor escala. Dois problemas são recorrentes ao optar-se por utilizar simulação nos testes computacionais: Definição do cenário de simulação (modelo) e a ferramenta a ser utilizada. Para o primeiro problema optou-se por duas abordagens denominadas periódica e *online*. Nesse trabalho, foi escolhido como ferramenta de apoio aos testes computacionais o simulador JiST/SWANS (JiST/SWANS, 2007), por prover escalabilidade e portabilidade, entre outras facilidades.

6.1 JiST/SWANS

JiST (Java in Simulation Time) (JiST/SWANS, 2007) é uma ferramenta de simulação de eventos discretos de alto desempenho, desenvolvido pela Universidade de Cornell, que utiliza a máquina virtual Java para executar as simulações. Sua abordagem mostra-se eficiente e flexível, além de ser transparente com relação à linguagem para codificação da simulação. Todo o código pode ser escrito na linguagem Java, compilado utilizando um compilador Java padrão e executado sobre a JVM (Java Virtual Machine). Dessa forma, a depuração do código pode ser feita de forma fácil e transparente, e têm-se a vantagem da portabilidade.

Outra importante característica é a escalabilidade. Testes publicados por (Barr et al., 2005), mostram que esse simulador é mais escalável do que o NS-2 (NS2, 2007) e o GloMoSim (Bajaj et al., 1999).

Sendo o JiST um simulador de eventos discretos para simulações gerais, sobre ele foi implementado o SWANS (Scalable Wireless Ad-hoc Network Simulator), um simulador de redes *ad-hoc*. O SWANS possui uma arquitetura inspirada na divisão de camadas, usual em elementos de rede, o modelo de camadas de referência OSI. Para adequar o JiST/SWANS à simulação de RSSF, foi necessária a criação de um arcabouço, proposto e desenvolvido por Aioffi (2007). Dessa forma, foi desenvolvida uma extensão no arcabouço para adaptação às particularidades desse problema.

6.2 Abordagem Periódica

Considerando que o método de simulação trata-se de um contexto dinâmico, inicialmente foi proposta uma abordagem dinâmica pró-ativa, denominada "Abordagem Periódica", na qual o problema é resolvido de forma centralizada, e a reconfiguração da rede é realizada em intervalos de tempo.

O algoritmo periódico proposto é executado ao longo do tempo de simulação estipulado pelo usuário, sendo que o intervalo entre os períodos também é um parâmetro de entrada. Uma vez que uma RSSF tem como principal função monitorar uma determinada área, onde eventos ocorrem com o passar do tempo, esta deve sofrer reconfigurações para que não deixe de atender aos requisitos do seu monitoramento. Nesse contexto, a ocorrência de eventos é representada por constantes alterações nos pontos de demandas distribuídos na área em questão. Assim, foi definido que todos os pontos de demanda teriam o mesmo papel no início do funcionamento da rede, por exemplo, toda a área teria uma demanda por medição de temperatura. Ao longo do tempo, alguns desses pontos de demanda podem ter seus papéis alterados aleatoriamente, com uma probabilidade P , sendo que tal alteração pode ocorrer apenas uma vez dentro do mesmo período.

Considerando que as demandas tenham sofrido alterações, uma nova atribuição deve ser feita periodicamente, a fim de que a rede continue atendendo aos requisitos de monitoramento. Logo, ao fim de cada período, o algoritmo genético é invocado para resolver o problema de atribuição de papéis, cobertura e roteamento. Em seguida, a rede é reconfigurada, de acordo com a nova solução calculada.

Uma vez que o algoritmo é centralizado, a nova atribuição deve ser enviada aos sensores que compõem a rede para que os mesmos alterem seus papéis, alterem o nó pai para o qual devem enviar mensagens de dados de sensoriamento, ou até mesmo, tornem-se inativos, desligando seu monitor, processador e rádio. Tal procedimento é realizado através do envio de mensagens de controle, partindo do nó sorvedouro, que é responsável pelo contato com o meio externo à rede.

Dessa forma, assim que o sorvedouro obtém a solução gerada pelo algoritmo genético,

ele gera uma mensagem de controle, contendo a nova atribuição para os sensores, e propaga essa mensagem na rede através do protocolo *flooding* (Maroti et al., 2004). Para tanto, os nós sensores possuem um sistema de *timer* sincronizado com o tempo de duração de um período, que liga o rádio do sensor para o recebimento da mensagem de controle. Ao verificar a mensagem, o sensor é capaz de inferir a informação necessária a partir do seu identificador, para efetuar a possível troca de papel, de nó pai no roteamento, ou se tornar inativo.

Mensagens de dados relativas ao monitoramento são enviadas ao sorvedouro através da árvore de roteamento definida, a uma taxa constante definida como parâmetro de entrada da simulação.

A figura 6.1 apresenta o fluxograma do funcionamento da simulação periódica descrita.

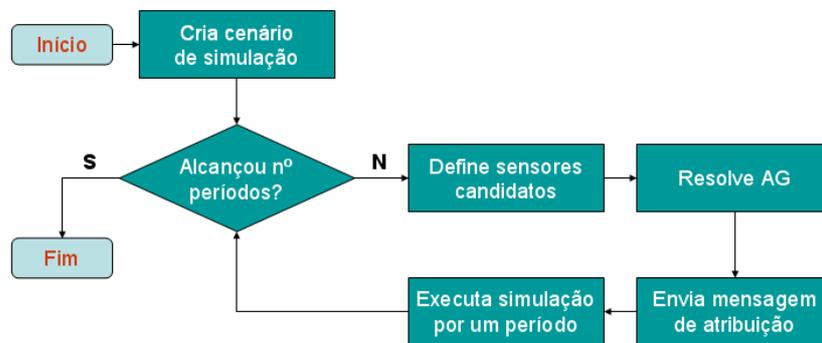


Figura 6.1: Fluxograma da simulação periódica

O algoritmo 6.1 apresentado a seguir corresponde ao pseudo-código do algoritmo periódico descrito anteriormente.

Algoritmo 6.1: IniciarNovoPeriodo

```

1 begin
2   numeroPeriodo ← numeroPeriodo + 1;           /* incrementa n° períodos */
3   defineSensoresCandidatos();                 /* define sensores com energia */
4   converteDadosParaAlgoritmo();              /* converte dados */
5   resolveAG();                                /* resolve AG */
6   converteDadosParaSimulador();              /* converte dados */
7   enviaMensagemControle();                   /* envia mensagem */
8   JistAPI.sleep(tempoPeriodo);               /* executa a simulação */
9   self.iniciarNovoPeriodo();                 /* inicia novo período */
10 end
  
```

Ao iniciar um novo período, o contador do número de períodos é incrementado (linha 2). Em seguida, são definidos os sensores que ainda possuem energia residual, ou seja, sensores sem energia não mais poderão participar da simulação (linha 3). Na linha 4 os dados da simulação são convertidos para o modelo do algoritmo genético, que é resolvido em seguida (linha 5). Novamente os dados são convertidos, dessa vez do modelo do algoritmo para o

modelo da simulação (linha 6). Na linha 7 é enviada uma mensagem de controle com a nova atribuição, que corresponde à solução retornada pelo AG. A linha 8 indica que a simulação permanece em execução pelo tempo de duração de um período, até que um novo período, com uma nova atribuição, seja iniciado (linha 9).

6.2.1 Resultados preliminares

Os testes foram executados utilizando instâncias geradas pelo simulador. Para tanto, o simulador recebe um conjunto de parâmetros de entrada, que definem as características das instâncias a serem geradas. Os parâmetros de entrada necessários são apresentados a seguir: número de nós sensores, número de nós sorvedouros, número de pontos de demanda, raio de comunicação (distância máxima alcançada pelo rádio na comunicação entre sensores), raio de sensoriamento (distância máxima alcançada para coleta de dados de sensoriamento), dimensões da área, número e especificação dos papéis, capacidade dos nós sensores (quantidade inicial de energia da bateria do sensor), energia de ativação, manutenção e roteamento (ambos em função do papel). Além disso, é preciso definir os seguintes parâmetros de simulação: tempo de simulação e tempo do período.

Para as instâncias geradas, foi considerada uma disposição aleatória dos nós sensores, em uma área quadrada. O nó sorvedouro foi posicionado na extremidade superior esquerda da área, que corresponde à coordenada (0,0). Os pontos de demanda foram dispostos uniformemente em grade, discretizando a área de monitoramento, sendo atribuído inicialmente o mesmo papel a cada um deles.

A tabela 6.1 apresenta o cenário considerado nos experimentos. Este cenário consiste de duas instâncias, uma de 25 nós e outra de 50 nós.

	Instância 1	Instância 2
# de sensores	25	50
# de sorvedouros	1	
# de pontos de demanda	25	49
# de papéis	3	
raio de comunicação	20m	
raio de sensoriamento	20m	
área	50m x 50m	70m x 70m
capacidade	50J	
tempo de simulação	320min	
tempo do período	25min	

Tabela 6.1: Cenário de simulação periódica para as instâncias de 25 e 50 nós

Foram realizadas 33 execuções para cada uma das instâncias. Os gráficos a seguir apresentam dados médios das 33 execuções, para as instâncias de 25 nós e de 50 nós. Na figura 6.2, é

mostrado o número de nós ativos por período. Pode-se notar que o número de nós ativos não é muito variável ao longo do tempo, já que é basicamente o mínimo de sensores necessários para cobrir a área de monitoramento.

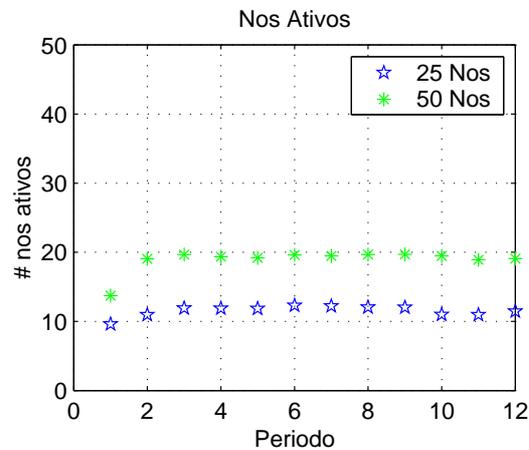


Figura 6.2: Número de nós ativos por período, para as instâncias de 25 e 50 nós

A figura 6.3 apresenta o número de sensores sem energia por período. O número de sensores sem energia permanece zero por um bom tempo da simulação, até que alguns deles começam a esgotar sua capacidade.

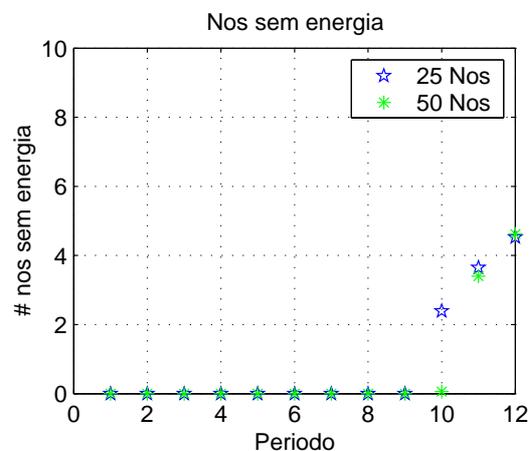


Figura 6.3: Número de nós sem energia por período, para as instâncias de 25 e 50 nós

O número de pontos descobertos, de acordo com a figura 6.4, inicialmente foi zero para a instância de 25 nós, aumentando somente após alguns períodos, quando a rede não mais conseguiu prover cobertura em toda a área. Na instância de 50 nós, pelo posicionamento aleatório dos nós, um ponto de demanda ficou descoberto desde o início da simulação pois nenhum sensor foi capaz de cobri-lo. Ao longo dos períodos, esse número foi aumentando, da mesma forma que na instância de 25 nós.

A figura 6.5 apresenta o gasto de energia total da rede, ao longo dos períodos e a energia

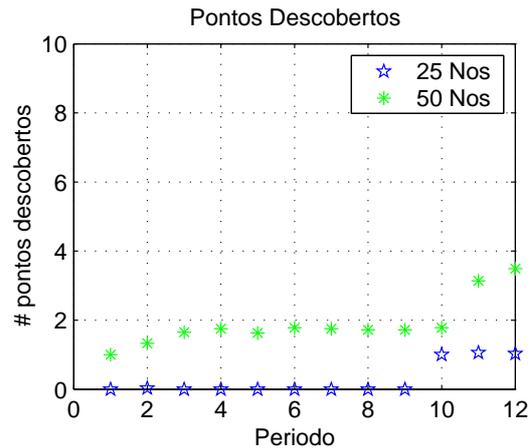


Figura 6.4: Número de pontos descobertos por período, para as instâncias de 25 e 50 nós

residual da rede. Pode-se perceber que a energia gasta por período (a) é quase constante, pois o número de sensores ativos também não varia muito. Como a densidade dos nós é mantida nas instâncias testadas, observa-se que aumentando o número de nós, aumenta-se também o gasto de energia. Se a área fosse fixa e o número de nós aumentado, provavelmente com 50 nós a atribuição seria melhor do que com 25 nós e o gasto de energia seria reduzido. Em (b), observa-se que a energia residual na rede vai decrescendo, ao longo dos períodos.

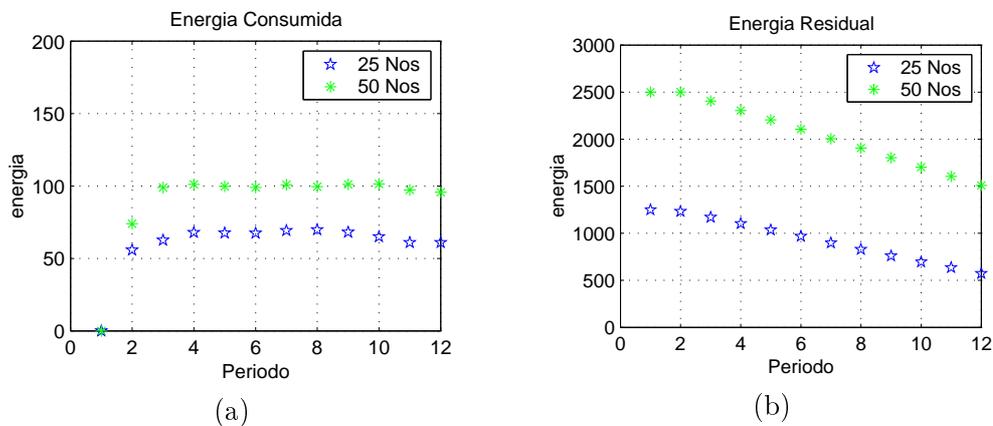


Figura 6.5: Energia consumida e Energia residual da rede nas instâncias de 25 e 50 nós

Na figura 6.6 é apresentada uma execução da simulação para a instância de 25 nós. É possível observar a evolução da simulação através de "fotografias" do estado da rede, de tempos em tempos. Pode-se perceber que os sensores podem trocar de papel a cada novo período para melhor atender as demandas, alguns pontos de demanda podem ficar descobertos e alguns sensores podem ficar sem energia e deixar de participar da simulação. O papel de cada sensor é definido pelo número no canto superior direito (por exemplo: 1 - temperatura, 2 - áudio e 3 - vídeo), que também indica que ele encontra-se ativo. Os sensores não ativos não apresentam rota para o roteamento dos dados até o sorvedouro (posicionado na extremidade superior esquerda da área), e não apresentam papel atribuído a eles.

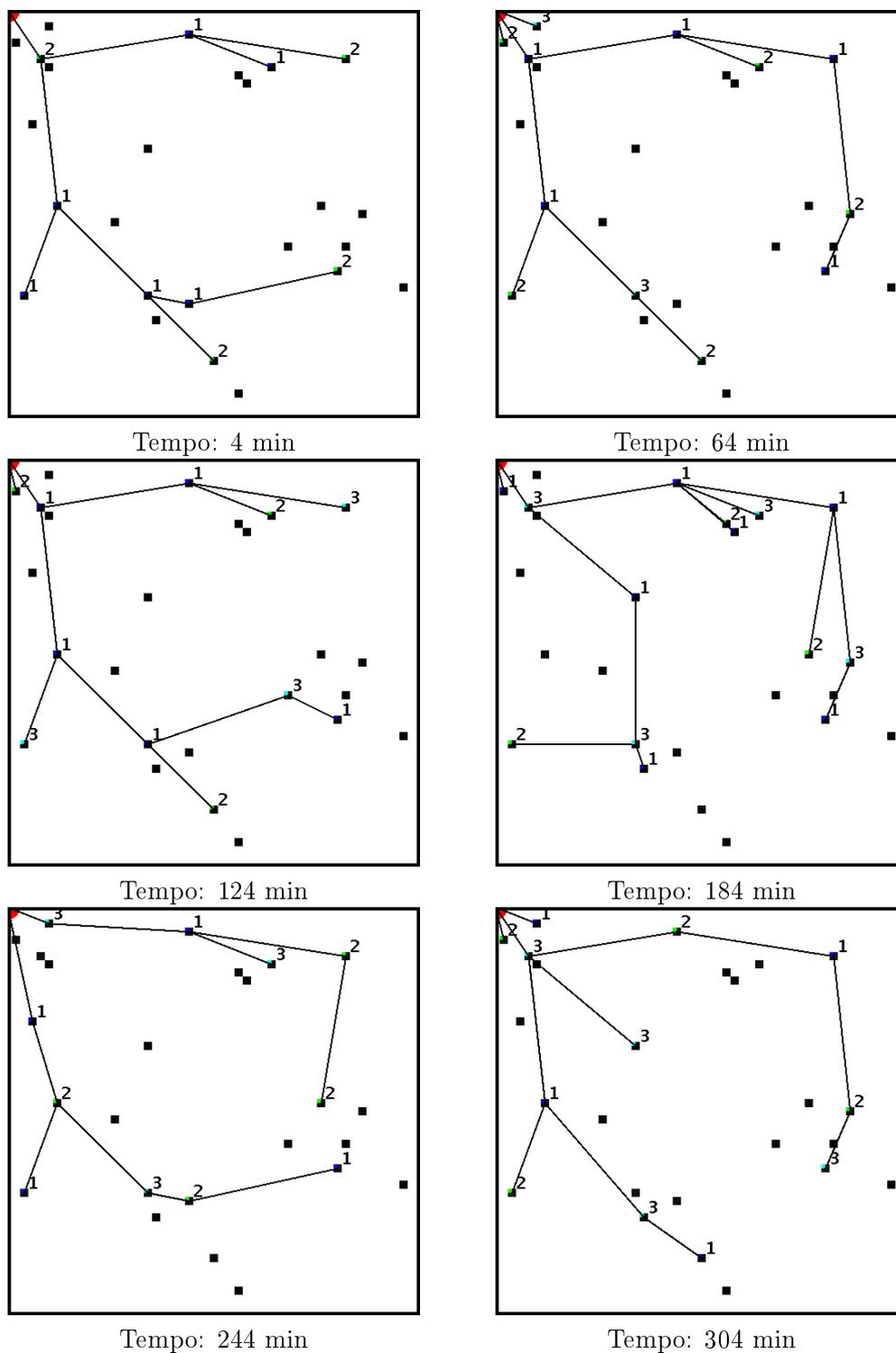


Figura 6.6: Visão da rede para a instância de 25 nós ao longo do tempo

6.3 Abordagem *Online*

A segunda abordagem proposta para fins de simulação foi uma abordagem dinâmica reativa, denominada "Abordagem *Online*", na qual o problema é resolvido de forma distribuída. Nesse contexto, a tomada de decisão é local, a partir de comunicação com nós vizinhos, e a reconfiguração da rede é realizada constantemente, estimulada pela ocorrência de eventos.

O algoritmo distribuído proposto foi baseado no algoritmo GAF (Xu et al., 2001), que objetiva reduzir o consumo de energia, identificando nós que são equivalentes do ponto de vista de localização no roteamento, e desliga nós desnecessários mantendo fidelidade do roteamento, ou seja, uma conectividade ininterrupta entre nós ativos. O GAF é aplicável ao cenário de redes planas, homogêneas e é dependente de informação de localização.

Seu princípio consiste na divisão da área em grades virtuais definidas, tal que para duas grades adjacentes A e B, todos os nós de A podem se comunicar com todos os nós de B e vice-versa. Dessa forma, as grades são calculadas em função do alcance do rádio. Assim, todos os nós de uma grade são equivalentes para questões de roteamento. Na figura 6.7 pode-se observar o alcance do rádio para um nó sensor. Nota-se que o sensor 1 alcança os sensores 2, 3 e 4, mas não tem comunicação com o sensor 5.

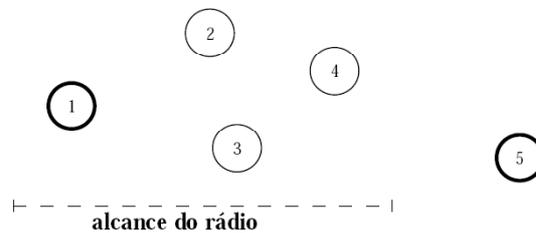


Figura 6.7: Esquema representativo do alcance do rádio

A figura 6.8 mostra a divisão da área em grades, sendo que o valor correspondente ao lado r das grades é calculado a partir de R (raio de alcance do rádio). Logo, pode-se obter r a partir das seguintes equações (Xu et al., 2001):

$$r^2 + (2r)^2 \leq R^2 \quad (6.1)$$

$$r \leq \frac{R}{\sqrt{5}} \quad (6.2)$$

As tomadas de decisão para ativar e desativar os nós sensores são independentes do protocolo de roteamento utilizado. Assim, caso um nó que esteja participando do roteamento de pacotes torne-se inativo, o novo roteamento do tráfego é dependente de uma rápida reconfigu-

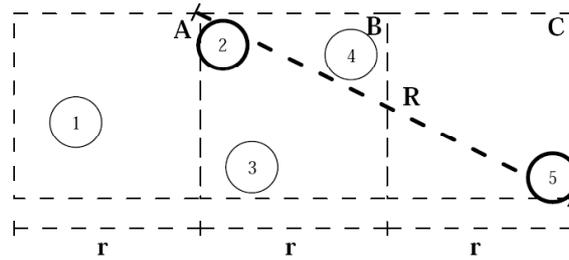


Figura 6.8: Cálculo das grades baseado no alcance do rádio

ração do protocolo. Embora a maioria dos protocolos de roteamento *ad-hoc* tendam a reagir rapidamente, esta característica pode levar à perda de pacotes. Xu et al. (2001) apresentam resultados computacionais obtidos através de simulação, combinando o algoritmo GAF com os protocolos de roteamento AODV (Perkins e Royer, 1999) e DSR (Johnson e Maltz, 1996). Dessa forma, demonstrou-se que a combinação utilizando o GAF é capaz de estender o tempo de vida da rede consideravelmente, comparado com o uso dos protocolos independentemente.

Nessa adaptação do algoritmo GAF, também é utilizado o modelo de estado dos nós, para controle de densidade da rede. Assim, são definidos três estados principais para um nó sensor: *dormindo*, *descobrimdo* e *ativo*. A diferença ocorre no estado *descobrimdo*, já que são utilizados n estágios desse estado, sendo n o número de papéis requeridos.

Assim, os nós iniciam no estado *descobrimdo* e no primeiro estágio. Nesse estado, os nós têm seus rádios ligados e realizam troca de mensagens de descoberta para identificar outros nós que estejam na mesma grade. Mensagens de descoberta contém uma tupla com valores de identificador da grade, energia residual, estado, papel e pai do nó.

Cada nó tem um sistema de *timer*, sendo que se o tempo de descoberta for atingido, ele passa para o estado *ativo*, com papel igual ao estágio de descoberta que ele se encontrava. Por outro lado, o *timer* pode ser interrompido por eventuais mensagens de descoberta de nós no mesmo estágio, que contenham maior energia residual ou que estejam no estado *ativo* com papel igual ao estágio que ele se encontra. Nesse caso, esse nó passa para o próximo estágio se existir demanda por esse papel dentro da sua grade, ou para os estágios seguintes, sucessivamente. Se não existir demanda por nenhum outro papel, o nó pode passar ao estado *dormindo*.

Ao entrar no estado *dormindo*, o nó inicia novamente um *timer*, que após um determinado tempo modifica seu estado para *descobrimdo* novamente. Isso permite um balanceamento do gasto de energia na rede.

Um nó no estado *ativo* somente passa ao estado *dormindo* se receber uma mensagem de descoberta de nós com mais energia residual, que estejam como *ativo* com o mesmo papel, ou se existir algum nó *ativo* e não mais existir a demanda do papel do nó. Nós no estado *ativo*

continuam a enviar mensagens de descoberta para seus vizinhos.

Além disso, os nós trocam mensagens no início da simulação para determinar as rotas para envio de mensagens de dados relativas ao monitoramento da rede. Assim, é utilizada uma mensagem de controle partindo do nó sorvedouro, através de um *flooding*. Nessa mensagem, é enviado o identificador da grade, que é atribuída como pai do nó que a recebe. Com isso, um nó não tem um nó pai específico, mas um conjunto de nós pais (todos aqueles pertencentes à grade). Uma vez que o GAF garante que haja pelo menos um sensor ativo em cada grade pra fins de roteamento, um nó sempre terá um pai garantido. Esse procedimento é realizado apenas uma vez, logo, um nó sempre terá a mesma grade pai. Vale ressaltar que nem sempre nós da mesma grade possuem mesma grade pai; depende da mensagem que tenha recebido. Se nós da mesma grade receberem mensagens de grades diferentes simultaneamente, pode ser que alguns sensores tenham uma grade pai e alguns tenham outra. Quando os nós recebem mensagens de uma grade que não seja adjacente, nem todos os sensores pertencentes à grade pai são alcançáveis. Nesse caso, o sensor terá como pais em potencial somente os sensores que seu rádio tiver alcance.

Assim como na abordagem periódica, mensagens de dados são enviadas ao nó sorvedouro a uma taxa constante, nesse caso, através das rotas definidas a partir do *flooding*.

A figura 6.9 mostra o fluxograma do funcionamento da simulação *online* apresentada e na figura 6.10 podem ser vistos os possíveis estados de um nó sensor.

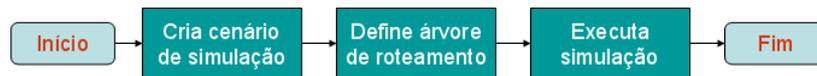


Figura 6.9: Fluxograma da simulação *online*

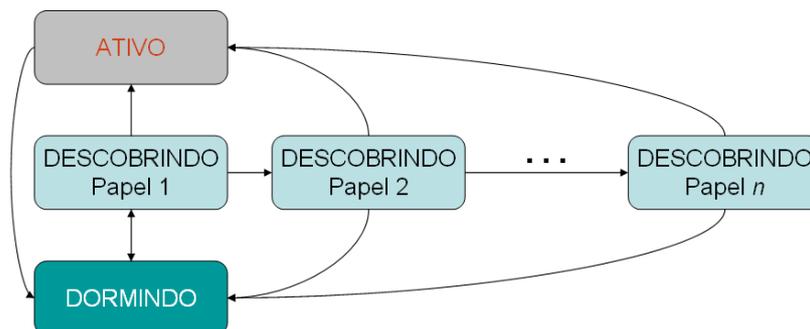


Figura 6.10: Estados dos nós sensores

O algoritmo 6.2, apresenta o pseudo-código do algoritmo executado pelo nó sensor ao receber uma mensagem.

Ao receber uma mensagem de descoberta (linha 2), o sensor verifica se a mensagem é

Algoritmo 6.2: RecebeMensagem

```

Data: mensagem
1 begin
2   if mensagem é do tipo MensagemDescoberta then
3     if mensagem é da mesma grade and mensagem tem mais energia then
4       if sensorCorrente está no estado DESCOBRINDO then
5         | passa para próximo estágio DESCOBRINDO;
6       if sensorCorrente está no estado ATIVO then
7         | if mensagem é ATIVO com mesmo papel or mensagem é ATIVO and
8         | não existe demanda com papel do sensorCorrente then
9         | | passa para estado DORMINDO;
9   if mensagem é do tipo MensagemSensoriamento then
10    if mensagem é destinada ao sensorCorrente and sensorCorrente está ATIVO
11    then
12    | encaminha mensagem para sensorPai;
12   if mensagem é do tipo MensagemControle then
13    if mensagem é primeira recebida desse round then
14    | atribui sensor pai;
15    | encaminha mensagem adiante;
16 end

```

proveniente da mesma grade e se o sensor que a enviou possui mais energia do que o mesmo (linha 3). Em caso positivo, se o sensor encontrar-se no estado *descobrimdo* (linha 4) ele passa ao próximo estágio de descoberta (linha 5), pois o sensor que enviou a mensagem assumirá o papel anterior ou mesmo já se encontra *ativo* com o papel anterior. Se o sensor estiver no estado *ativo* com o mesmo papel da mensagem recebida de um sensor também *ativo* ou se não existe mais a demanda que ele cobria, ele pode passar ao estado *dormindo* (linhas 6, 7 e 8).

No recebimento de uma mensagem de sensoriamento, o sensor verifica se a mensagem é realmente destinada a ele (linhas 9 e 10). Nesse caso, se este encontrar-se ativo, ele prossegue com o roteamento da mensagem, encaminhando-a ao seu pai, na linha 11.

Caso o sensor receba uma mensagem de controle (linha 12), ele verifica se é a primeira vez que ele recebe uma mensagem com esse identificador de round e atualiza seu nó pai (linhas 13 e 14). Em seguida, ele encaminha a mensagem adiante, através do protocolo *flooding* (linha 15).

6.4 Resultados

Foram realizados testes a fim de comparar as duas abordagens propostas (periódica e *online*), utilizando o método de simulação. Assim, para gerar as instâncias, os parâmetros de entrada

para o simulador são os mesmos descritos na seção 6.2.1. Em ambas as abordagens, foi utilizado o mesmo tempo de duração da simulação, e a coleta de dados foi feita nos mesmos intervalos de tempo.

Novamente, foi considerada uma disposição aleatória dos nós sensores, simulando um lançamento de aeronave, em uma área quadrada. O nó sorvedouro foi posicionado na extremidade superior esquerda da área, que corresponde à coordenada (0,0). Os pontos de demanda foram dispostos uniformemente em grade, discretizando a área de monitoramento, sendo atribuído inicialmente o mesmo papel a cada um deles.

A tabela 6.2 apresenta o cenário considerado para instâncias de 25, 50 e 100 nós.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
# de sensores	25	50	100
# de sorvedouros	1		
# de pontos de demanda	25	49	100
# de papéis	3		
raio de comunicação	20m		
raio de sensoriamento	20m		
área	50m x 50m	70m x 70m	100m x 100m
capacidade	50J		
tempo de simulação	300min		
tempo do período	10min		20min

Tabela 6.2: Cenário de simulação para instâncias de 25, 50 e 100 nós

Foram utilizadas 33 instâncias distintas para redes de 25, 50 e 100 nós. Os gráficos a seguir apresentam dados médios das 33 instâncias, coletados em intervalos de 10 minutos de duração. Na figura 6.11, são mostrados o número de nós ativos em (a), (c) e (e), e em (b), (d) e (f) o número de nós sem energia, no decorrer do tempo de simulação. Cada intervalo tem duração de 10 minutos. Pode-se notar que o número de nós ativos é consideravelmente maior na abordagem *online*. Considerando que a abordagem centralizada possui uma visão global da rede, a atribuição é feita de forma mais eficiente do que na distribuída, onde a visão local causa redundância na cobertura. É possível observar que ao final da simulação o número de sensores ativos passa a ser menor na abordagem *online*, mas apenas pelo fato de muitos dos sensores já se encontrarem sem energia.

O número médio de pontos descobertos, pode ser visto na figura 6.12. Nota-se novamente que, embora o algoritmo *online* seja capaz de detectar a alteração na demanda mais rapidamente do que o periódico, um maior número de pontos ficaram descobertos. O posicionamento aleatório dos nós gerou, em alguns casos, instâncias em que o raio de comunicação de nenhum sensor tinha alcance ao nó sorvedouro. Tal fato impediu o roteamento de dados, fazendo com que a cobertura fosse nula na rede. Dessa forma, essas instâncias tiveram 100% dos pontos descobertos.

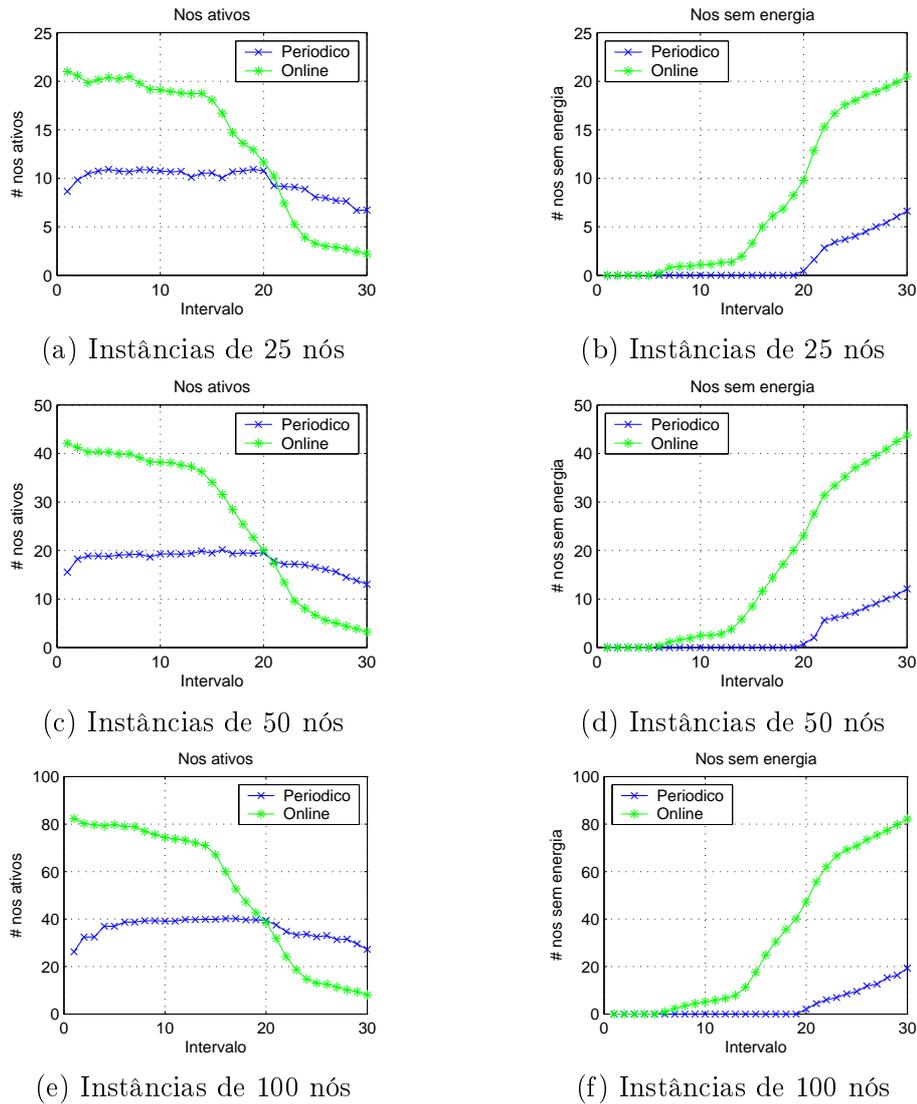


Figura 6.11: Dados médios de nós ativos e sem energia na simulação para instâncias de 25, 50 e 100 nós

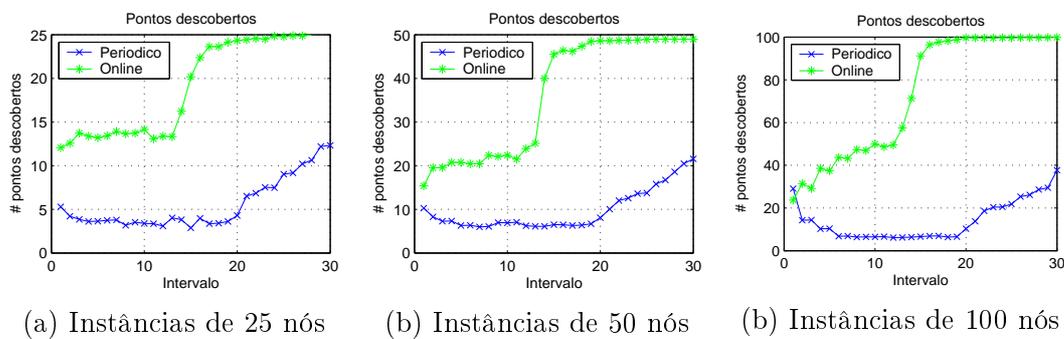


Figura 6.12: Número de pontos descobertos para instâncias de 25, 50 e 100 nós

A figura 6.13 apresenta a energia residual da rede durante a simulação. Observa-se que a energia residual na rede vai decrescendo, ao longo do tempo, sendo que a abordagem centralizada propiciou maior economia do que a abordagem *online*.

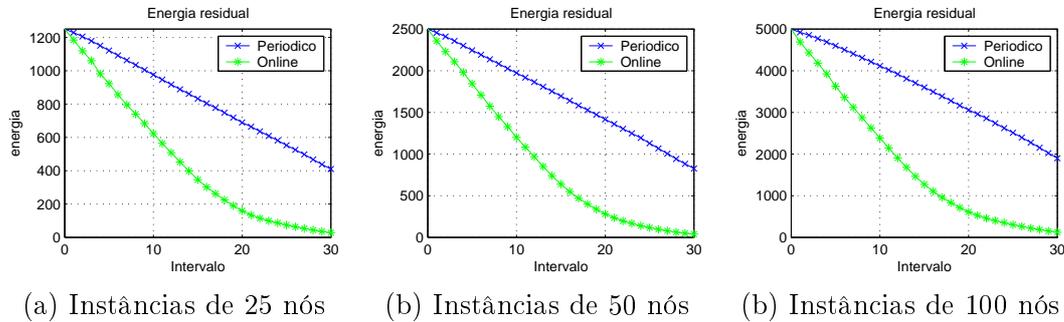
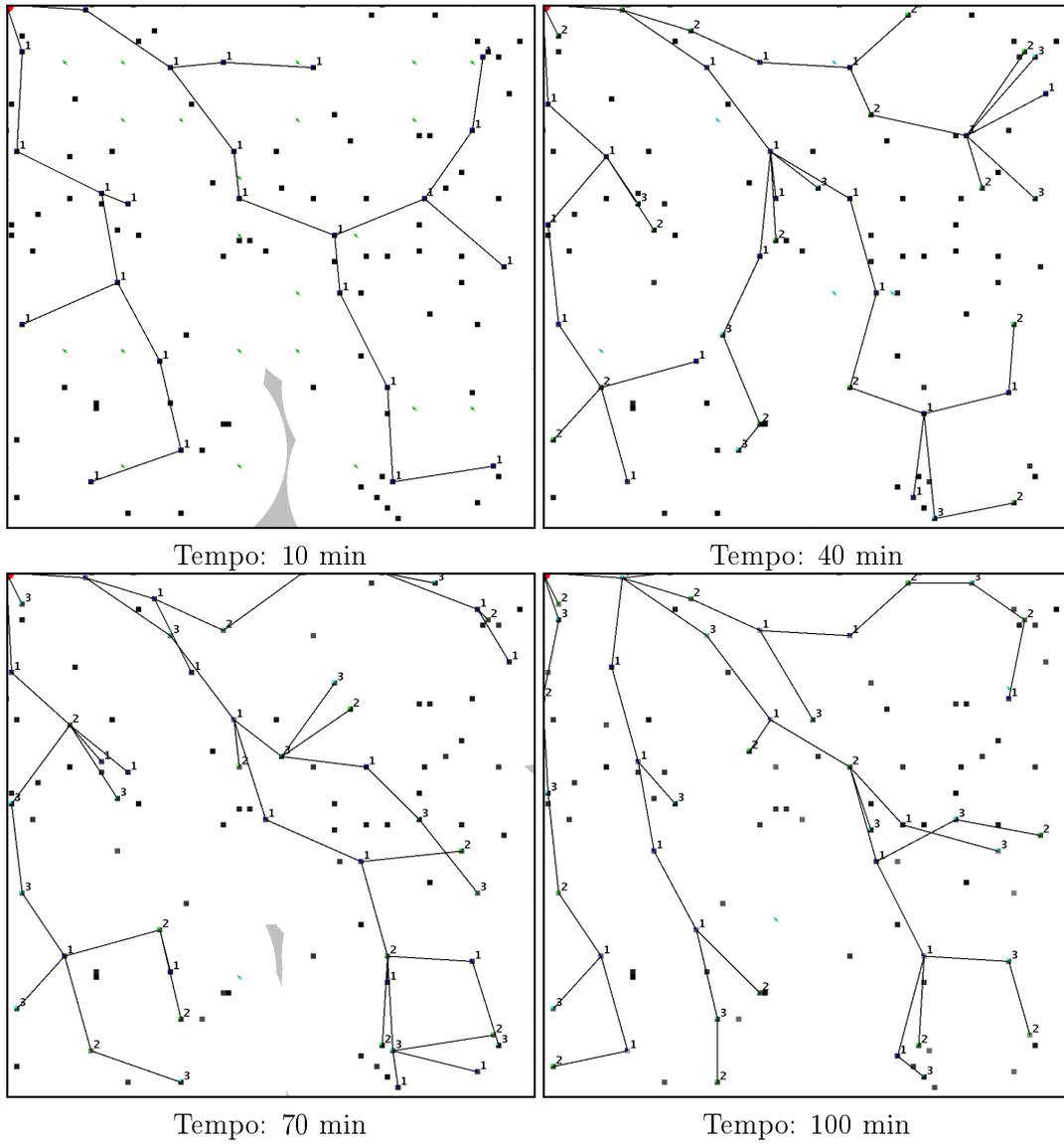


Figura 6.13: Energia residual para instâncias de 25, 50 e 100 nós

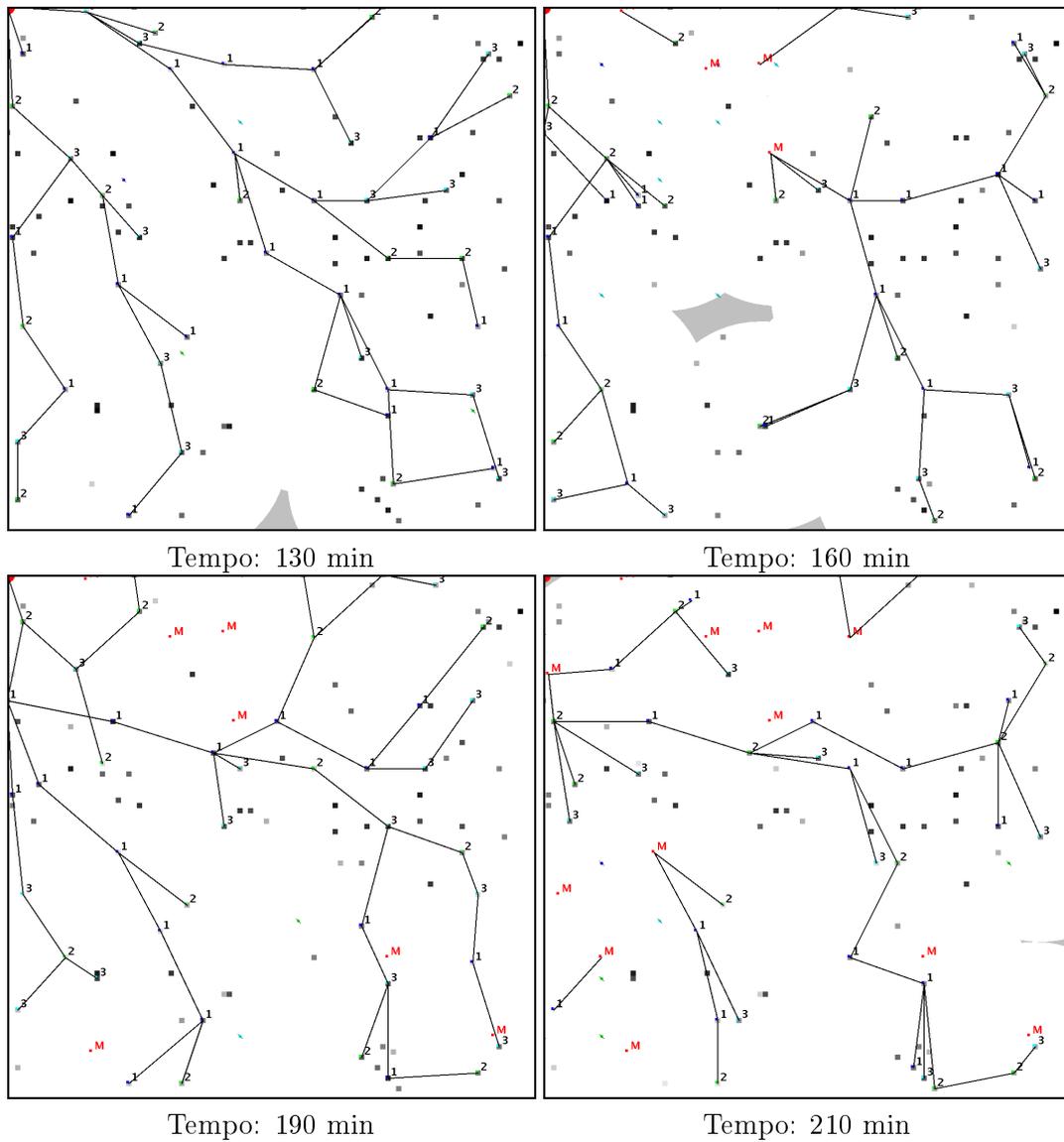
Nas figuras 6.14 (a) e (b) e 6.15 (a) e (b) são apresentadas as simulações periódica e *online*, respectivamente, para uma instância de 100 nós. Assim como na seção 6.2 a simulação é apresentada através de "fotografias" do estado da rede, de tempos em tempos. O papel de cada sensor é definido pelo número no canto superior direito (1,2 e 3), que também indica que ele encontra-se ativo. Os sensores não ativos não apresentam rota para o roteamento dos dados até o sorvedouro (posicionado na extremidade superior esquerda da área), e não apresentam papel atribuído a eles. Sensores sem energia (mortos) são indicados por (M).

Pode-se perceber que os sensores podem perder roteamento no decorrer da simulação. Na figura 6.14, a partir do tempo de 160min, observa-se que existem nós sensores que esgotaram sua energia e possuem filhos na árvore de roteamento. Até que uma nova atribuição seja definida, e uma nova rota seja criada, estes sensores filhos perdem roteamento.

Como apresentado anteriormente, a abordagem *online* mostrou-se inferior à abordagem periódica, como pode ser constatado na figura 6.15, que mostra um maior número de sensores ativos, e que no decorrer da simulação apresenta menor energia residual na rede. Além disso, a perda no roteamento mostrou-se mais frequente nesta abordagem.

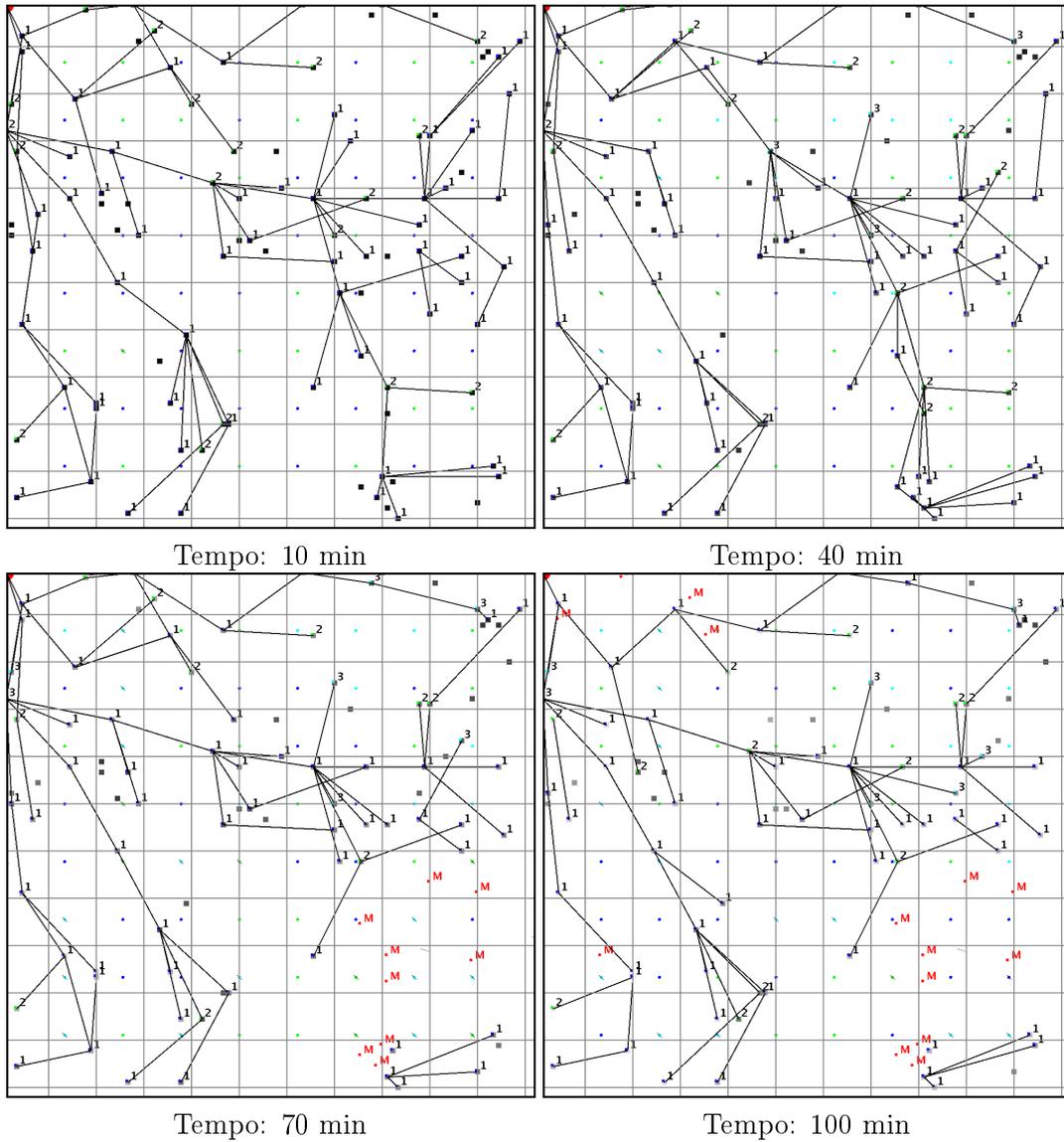


(a)

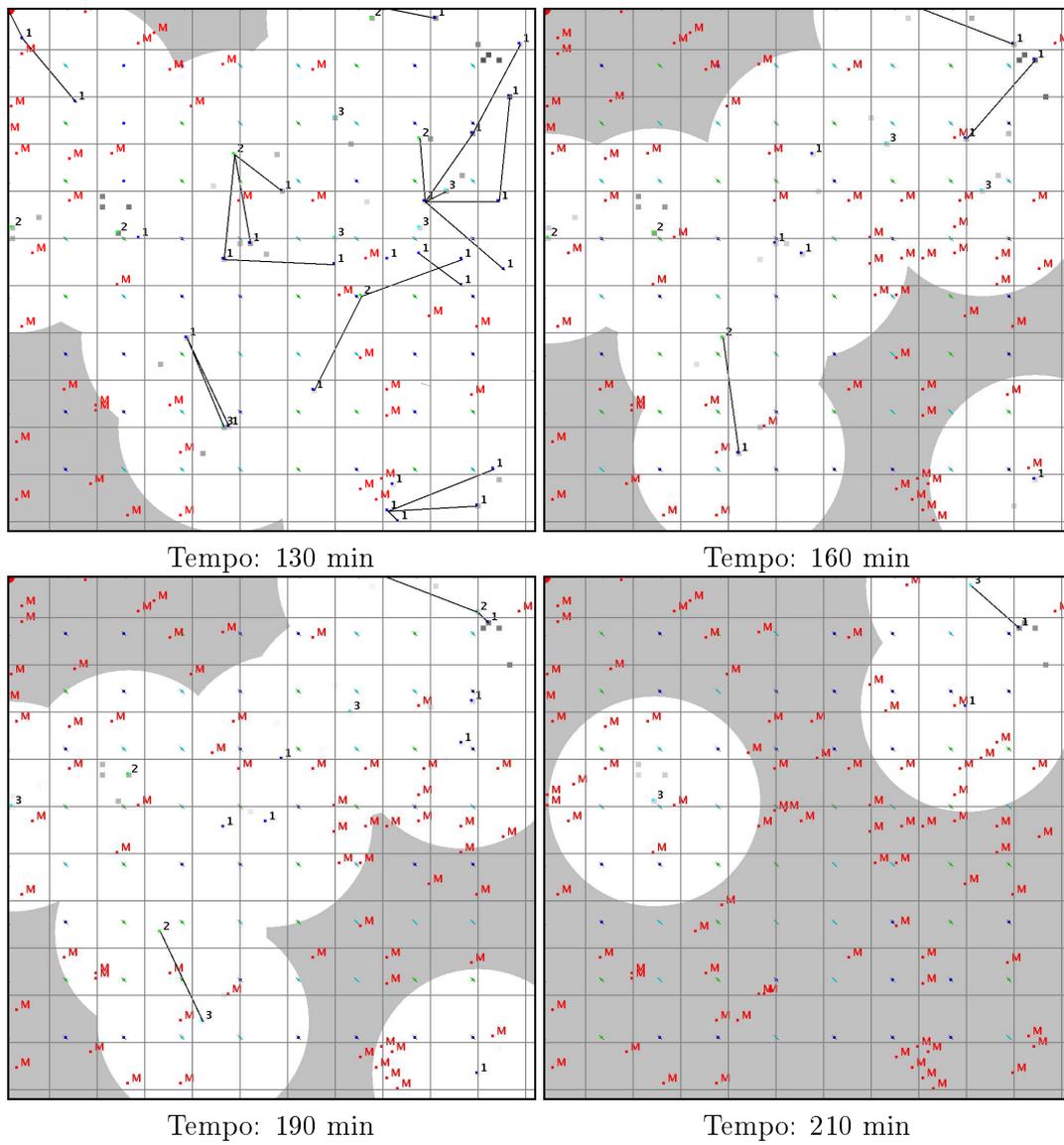


(b)

Figura 6.14: Visão da rede ao longo do tempo para instância de 100 nós na abordagem periódica



(a)



(b)

Figura 6.15: Cobertura da rede ao longo do tempo para instância de 100 nós na abordagem *online*

Capítulo 7

Considerações Finais

7.1 Conclusão

Neste trabalho foram propostas soluções para tratar conjuntamente o problema de atribuição de papéis, controle de densidade, cobertura e roteamento em RSSF, visando a minimizar o consumo de energia da rede. Para tanto, inicialmente foi desenvolvido um modelo de programação linear inteira mista. Constatou-se que o modelo não se mostrou adequado do ponto de vista de escalabilidade, já que o tempo computacional exigido para solucionar o problema torna-se impraticável com o aumento do tamanho das instâncias.

Assim, foi proposta uma solução heurística, baseada na metaheurística algoritmos genéticos, que obteve melhor desempenho em relação ao tempo, além de fornecer resultados satisfatórios em termos de qualidade, quando comparado com a abordagem exata.

Finalmente, com o objetivo de realizar experimentos mais próximos de um cenário real, foi utilizado o método de simulação para avaliar o comportamento de uma rede ao longo de seu tempo de vida. No decorrer da simulação, é considerada a ocorrência de novos eventos, representados por alterações nos pontos de demanda da área monitorada. A primeira abordagem proposta foi denominada periódica, onde a reconfiguração da rede é feita em intervalos de tempo e as soluções são geradas de forma centralizada através do algoritmo genético proposto anteriormente. A segunda abordagem consiste em uma resolução distribuída, proposta como um algoritmo *online*, no qual os nós tomam decisões baseadas em uma visão local, reativa à ocorrência de novos eventos.

A partir dos testes realizados, foi possível observar que a abordagem periódica se mostrou mais adequada do que a *online*, devido às particularidades da combinação dos problemas considerados. Por se tratar de uma rede heterogênea, a adaptação do algoritmo GAF não se mostrou eficiente na economia de energia, uma vez que era necessário um grande número de sensores ativos com os diferentes papéis. Pode-se dizer que o algoritmo apresenta melhor

desempenho em redes densas, onde a cobertura fica menos prejudicada, ao conseguir cobrir mais pontos com diferentes demandas. No entanto, como a decisão é tomada com a visão local de cada grade, o número de sensores ativos permanece elevado, gerando um consumo de energia desnecessário. Logo, o funcionamento do algoritmo deve ser otimizado para melhor aproveitamento dos recursos.

7.2 Trabalhos Futuros

Diante das conclusões obtidas a partir da análise dos testes realizados, são propostos os seguintes trabalhos futuros. Primeiramente, é possível aperfeiçoar o modelo matemático adicionando restrições de corte a fim de torná-lo mais eficiente.

Pretende-se inserir uma busca local no algoritmo genético (capítulo 4), uma vez que melhores resultados podem ser alcançados com tal refinamento.

A abordagem periódica pode ser estendida futuramente para um algoritmo híbrido, inserindo mecanismos de decisão local no intervalo de tempo entre as reconfigurações periódicas centralizadas, a fim de que os eventos que ocorram durante esse tempo seja detectados imediatamente e tão logo sejam cobertos.

Propor nova abordagem *online*, de maneira que esta seja mais eficiente em termos de cobertura e gasto de energia, já que o algoritmo utilizado (seção 6.3) não mostrou-se adequado ao problema.

Além disso, podem ser desenvolvidas outras heurísticas para resolver o problema, sendo possível alcançar melhores resultados.

Neste trabalho foram avaliadas principalmente questões relativas à cobertura e energia. Outras métricas podem ser consideradas a fim de garantir a qualidade das soluções, tais como taxa de entrega de mensagens, energia consumida com mensagens de controle e tráfego na rede.

Apêndice A

Tabelas

Inst	CPLEX				AG (média)				AG (melhor)			
	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)
1	0,36	10	2	3760,84	0,54	10,4	2,5	3468,35	0,43	11	2	3847,92
2	0,44	8	0	3628,12	0,60	10,2	0,3	3843,18	0,87	9	0	3715,20
3	0,41	8	2	2910,05	0,81	8,9	2,4	3053,24	0,89	8	2	2910,52
4	0,33	9	2	2960,52	0,58	9,8	2,3	3163,74	0,64	9	2	2960,52
5	0,42	7	3	2275,24	0,54	8	3	2362,32	0,57	7	3	2275,24
6	0,60	9	0	2923,44	0,53	9,1	0	3043,02	0,40	9	0	2997,60
7	0,43	9	0	3162,64	0,32	9,6	0	3214,89	0,23	9	0	3162,64
8	0,42	7	3	2551,52	0,86	7,4	3	2590,06	0,82	7	3	2551,52
9	0,24	8	0	3112,64	0,52	9,7	0	3286,27	0,61	8	0	3112,64
10	0,48	8	0	2362,32	0,47	9,8	0	3171,67	0,35	9	0	2960,52
11	0,27	8	1	2601,52	0,63	8,2	1	2618,94	0,54	8	1	2601,52
12	0,52	9	0	3162,64	0,60	9,3	0	3196,18	0,52	9	0	3162,64
13	0,52	9	0	3199,72	0,63	9,6	0	3465,14	0,65	9	0	3236,80
14	0,18	7	5	2547,16	0,71	6,1	16	2505,87	0,64	6	16	2497,16
15	0,41	8	0	3186,8	0,90	8,2	0	3581,70	1,22	8	0	3186,80
16	0,29	8	0	2362,32	0,43	9,4	0	2995,35	0,43	9	0	2960,52
17	0,20	10	0	3212,64	0,55	9,6	0,6	3035,16	0,33	10	0	3212,64
18	0,38	9	3	2449,4	0,64	9,6	3	3011,53	0,74	9	3	2449,40
19	0,30	8	3	2325,24	0,53	8,5	3	2368,78	0,51	8	3	2325,24
20	0,30	9	0	3162,64	0,35	9,3	0	3188,76	0,31	9	0	3162,64
21	0,28	9	1	4259,04	0,73	9,2	1,3	4130,54	0,66	9	1	4259,04
22	0,42	9	0	2960,52	0,49	10,6	0	3377,44	0,47	10	0	3249,72
23	0,44	7	0	2514,44	0,77	9,2	0	3734,58	1,04	8	0	2840,72
24	0,38	7	2	2860,52	0,65	8,4	2	3319,71	0,70	8	2	2947,60
25	0,49	10	1	3212,64	0,62	10,7	1,2	3477,24	0,68	10	1	3212,64
26	0,40	8	5	2873,44	0,63	8	5	2893,65	0,49	8	5	2873,44
27	0,43	9	1	3199,72	0,58	9,8	1,1	3565,80	0,61	9	1	3199,72
28	0,51	9	0	3034,68	0,51	10,2	0	3568,06	0,53	10	0	3526,00
29	0,30	9	0	3236,8	0,63	9,1	0,1	3427,42	0,52	9	0	3438,92
30	0,23	9	1	2923,44	0,57	9,4	1,2	2958,27	0,45	9	1	2923,44
31	1,28	9	1	3162,64	0,61	9	1	3170,06	0,46	9	1	3162,64
32	0,38	9	0	2412,32	0,48	9,4	0	2781,89	0,43	9	0	2412,32
33	0,29	8	1	2836,36	0,59	9	1,5	3044,71	0,73	8	1	2836,36
Média	0,40	8,48	1,12	2949,82	0,59	9,17	1,56	3170,11	0,59	8,70	1,45	3035,52

Tabela A.1: Resultados computacionais para instâncias de 12 nós do cenário 1

Inst	CPLEX				AG (média)				AG (melhor)			
	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)
1	2,08	14	1	7535,04	3,17	15,1	1	8167,98	3,17	15	1	7659,20
2	3,16	14	3	6784,72	3,00	15,6	3	7652,48	3,22	14	3	6986,84
3	2,85	14	0	6780,36	2,78	15,8	0,2	7880,75	2,55	17	0	7189,92
4	2,34	13	0	7794,04	2,83	15,7	0	8970,33	2,69	14	0	7881,12
5	2,77	13	4	7517,76	3,01	16,2	4,4	8662,70	3,15	14	4	7641,92
6	3,05	16	1	7874,24	2,86	16,7	1,2	8637,10	3,84	16	1	7911,32
7	2,50	16	1	8055,28	3,11	17,5	1,1	9372,89	3,67	16	1	8533,68
8	2,19	14	1	6339,04	3,09	13,7	3	7095,15	3,98	13	3	6219,24
9	2,78	15	0	6727,84	3,01	16,7	0	8197,44	3,89	15	0	6764,92
10	4,59	14	3	8157,40	3,64	15,1	3,4	8621,00	3,12	14	3	8194,48
11	2,71	12	0	5892,96	3,17	14,7	0	7851,78	3,44	13	0	6660,56
12	3,02	15	0	5973,16	2,42	17	0	7198,28	2,52	17	0	6423,60
13	2,75	12	3	5930,04	2,89	14,5	3	7533,28	2,79	14	3	6784,72
14	1,61	13	0	5596,88	2,65	15,2	0	6819,64	2,55	14	0	5758,12
15	4,47	15	0	7143,72	3,26	15,7	0,2	8000,00	3,00	14	0	7567,76
16	2,18	15	0	6319,24	2,56	17,1	0	8108,10	3,51	16	0	6608,44
17	1,59	14	0	7167,88	2,80	16,9	0,2	8699,66	3,10	15	0	7840,24
18	3,13	12	8	7472,12	3,03	13,5	8,1	8061,51	2,61	13	8	7559,20
19	4,71	13	1	6145,08	2,86	15,2	1	7565,23	3,24	15	1	6669,68
20	1,77	14	0	6195,08	2,60	16,2	0	6977,10	2,54	15	0	6484,28
21	4,46	14	0	6710,56	3,08	15,6	0	7919,24	2,32	15	0	7345,84
22	2,38	15	0	6286,52	2,90	15,9	0	7169,09	2,73	15	0	6488,64
23	2,28	15	2	6121,48	3,34	16,1	2,4	6687,53	3,49	15	2	6121,48
24	1,75	15	0	5973,16	2,63	16,1	0,1	6693,49	2,43	16	0	6097,32
25	2,39	15	4	7185,16	3,40	16,8	4	8961,56	3,82	16	4	8059,64
26	1,50	16	0	6517,56	2,84	17,2	0,2	7107,51	3,08	17	0	6641,72
27	4,06	14	3	7291,48	3,39	14,9	3,7	7671,94	4,02	15	3	7415,64
28	3,83	16	2	7750,64	2,89	17	2,1	8996,50	2,31	16	2	8261,76
29	2,12	15	1	6484,28	2,73	15,9	3	7639,56	2,39	17	3	6769,68
30	4,05	14	3	5997,32	2,91	14,3	7,1	6823,13	3,06	13	7	6021,48
31	5,67	13	1	5708,12	3,01	15,4	1,1	6490,54	2,69	14	1	5869,36
32	2,41	14	1	6858,88	3,27	16,2	1	8344,69	3,53	15	1	6983,04
33	2,87	14	1	7774,24	3,26	16,4	1,1	8778,41	3,79	15	1	8063,44
Media	2,91	14,18	1,33	6789,74	2,98	15,82	1,68	7859,26	3,10	14,94	1,58	7075,10

Tabela A.2: Resultados computacionais para instâncias de 25 nós do cenário 1

Inst	CPLEX				AG (média)				AG (melhor)			
	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)
1	29,13	24	1	15966,48	12,85	29,2	1	20426,90	13,25	29	1	18780,08
2	12,89	22	0	13574,08	13,23	28	0	17145,53	13,37	26	0	15649,88
3	21,82	22	0	15466,60	13,93	28,6	0	20322,30	14,61	26	0	16713,56
4	28,78	24	0	14849,00	13,52	29,4	0	19731,22	15,87	26	0	17385,36
5	66,56	26	1	19578,88	17,00	27,5	1	23823,18	18,00	26	1	21297,64
6	14,63	22	0	13232,36	15,02	27,8	0,1	17949,69	17,59	25	0	15690,76
7	19,96	23	0	13356,52	14,88	27,4	0	17773,74	13,56	26	0	15505,92
8	31,78	23	0	15730,36	16,30	29,4	0,3	20084,71	15,06	31	0	19588,96
9	56,80	24	0	19791,52	14,69	29,1	0	22985,78	16,26	27	0	21883,48
10	18,41	24	2	21202,72	18,85	29,1	2,2	26279,04	20,62	27	2	25050,52
11	18,64	24	0	18661,68	16,23	28,4	0	24450,12	14,84	28	0	21722,64
12	21,51	23	0	14250,80	15,16	28	0	19211,17	16,59	26	0	16709,20
13	21,54	24	1	20879,92	16,88	29,4	1	28858,01	17,58	30	1	26930,20
14	14,16	23	0	13500,48	14,71	27	0,2	16993,16	14,47	24	0	14688,32
15	62,43	23	1	14366,40	15,96	27,3	1,6	18044,51	12,29	28	1	17349,40
16	22,90	21	4	12576,00	14,11	25,2	4,3	15692,98	12,46	22	4	13413,40
17	60,61	26	1	18799,48	16,26	29	1,3	21617,41	18,53	28	1	20457,56
18	20,38	23	1	20830,64	17,50	28,1	1	25944,04	20,74	24	1	23040,72
19	24,90	27	0	17513,88	14,57	28,9	0	20036,81	15,80	26	0	19277,88
20	21,83	25	0	14936,08	14,82	29,4	0,5	18256,31	14,67	29	0	17997,04
21	22,52	24	0	16391,08	15,26	28,1	0	20844,04	11,31	29	0	18966,20
22	32,74	24	0	16774,24	17,43	28,6	0,2	20731,12	14,89	27	0	18519,40
23	19,51	22	0	14818,80	14,61	27,9	0	18628,89	10,92	28	0	16866,64
24	40,82	24	1	22273,68	18,33	28,6	1,1	25595,63	21,12	28	1	24282,60
25	40,98	24	0	14152,48	13,55	28,3	0	16457,11	13,52	25	0	15303,24
26	29,30	22	0	14637,76	14,53	27,7	0	18625,29	14,40	27	0	16994,04
27	39,96	23	0	18728,00	18,79	28,7	0,2	24215,15	20,67	27	0	20853,24
28	41,06	24	0	14172,84	15,66	27,7	0	17655,25	14,74	27	0	15918,00
29	50,57	24	0	17875,00	15,63	28,1	0	21248,80	16,42	26	0	19426,20
30	22,77	24	0	16465,24	15,64	29,3	0	20268,67	16,12	26	0	17979,36
31	89,53	21	1	13012,96	15,79	26,7	1	15973,01	14,24	24	1	14305,16
32	25,06	21	5	14666,28	15,65	26	5,1	18353,36	17,46	23	5	16452,32
33	30,06	24	0	15216,16	13,81	29	0,1	19014,34	16,08	27	0	18127,52
Media	32,56	23,45	0,58	16310,56	15,49	28,21	0,67	20401,13	15,70	26,61	0,58	18579,59

Tabela A.3: Resultados computacionais para instâncias de 51 nós do cenário 1

Inst	CPLEX				AG (média)				AG (melhor)			
	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)
1	352,68	34	1	30652,04	66,81	49,4	1,1	43205,72	75,09	41	1	36946,44
2	1060,23	35	0	28099,92	64,76	47,4	0	38589,47	70,21	41	0	34843,80
3	1066,04	37	0	32923,6	76,94	48,6	0	47508,06	72,42	45	0	41452,80
4	556,3	37	0	34395,88	70,27	47,9	0	46526,57	56,24	44	0	42508,64
5	417,65	37	0	28295,16	58,95	49,8	0	37878,44	65,78	46	0	35439,88
6	1418,56	36	1	43379,52	82,08	45	1	51602,31	77,42	41	1	48807,60
7	370,1	33	0	25217,48	59,27	44,9	0	35007,84	54,90	41	0	32089,00
8	918,59	38	0	38555,92	78,52	48,6	0,5	51133,59	84,69	46	0	47875,44
9	1318,8	34	0	33825,64	77,28	44,1	0,2	45656,70	69,55	42	0	41744,84
10	784,83	37	1	37517,12	71,90	46,2	1	47372,93	80,07	44	1	43435,64
11	168,44	35	0	30557,36	69,79	45,7	0	40478,35	83,51	39	0	35032,44
12	391,13	37	0	39927,32	84,28	46,4	0	52133,58	77,20	42	0	48075,32
13	625,83	35	1	32177,96	81,40	47,2	1	42090,78	85,21	45	1	37339,84
14	1020,92	37	0	30343,28	67,65	48,1	0	40308,62	78,56	45	0	37438,00
15	222,92	35	0	35430,08	81,10	47,6	0	49539,46	72,99	43	0	45867,80
16	1413,77	40	1	40927,24	77,39	50,7	1,1	51476,62	85,88	46	1	44760,72
17	224,91	35	1	29266,84	73,21	45,8	1	39636,54	77,53	43	1	34841,28
18	268,93	38	0	28950,08	69,82	47,1	0	38732,68	68,03	47	0	36601,56
19	2142,9	35	0	26706,16	71,48	47,8	1	37501,66	81,16	45	1	33015,32
20	580,54	35	0	30486,84	67,29	44,6	0	38342,95	72,38	40	0	35172,60
21	1386,6	36	0	29139,44	68,86	46,6	0,1	38199,90	68,87	43	0	36152,16
22	313,81	34	0	28412,72	58,79	47	0	37728,78	65,40	46	0	32570,20
23	156,04	38	0	29272,16	65,39	48,3	0	39178,96	73,74	46	0	34561,60
24	2940,89	36	1	32704,92	74,30	45,9	1	44455,53	83,88	40	1	38255,32
25	969,19	36	0	30895,28	59,20	49,4	0	39996,35	68,17	48	0	37262,28
26	684,59	35	1	33504,12	83,18	48,2	1	43355,84	83,67	47	1	40447,68
27	141,05	38	0	31094,88	67,81	48	0,4	41347,31	81,21	43	0	39703,84
28	555,98	37	0	35380,32	73,95	48	0	49415,66	80,93	43	0	44684,16
29	161,24	36	0	39284,04	84,84	46,5	0	53882,80	88,00	44	0	49963,88
30	215,15	36	0	28463,28	66,90	47	0	38050,50	80,94	45	0	31584,48
31	294,22	37	0	32223,44	67,90	49,5	0	46130,42	69,29	43	0	37692,80
32	466,6	34	0	28297,12	61,23	47,8	0	36067,98	70,01	45	0	32523,84
33	1738,17	38	0	30562,68	72,24	47,8	0,2	40847,93	74,32	47	0	37979,32
Media	768,11	36,09	0,24	32329,39	71,36	47,36	0,32	43132,75	75,07	43,82	0,27	38990,02

Tabela A.4: Resultados computacionais para instâncias de 102 nós do cenário 1

Inst	CPLEX				AG (média)				AG (melhor)			
	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)
1	0,58	9	2	3785,00	0,78	9,4	2	4049,58	0,72	9	2	3950,04
2	0,34	8	1	2873,44	0,62	8,3	1	2910,69	0,50	8	1	2873,44
3	0,57	8	0	2910,52	0,65	8,3	0	3024,91	0,45	8	0	2910,52
4	0,30	8	1	2399,40	0,60	9,1	1	2495,19	0,72	8	1	2399,40
5	0,48	7	1	3062,64	0,65	7,3	1	3096,18	0,51	7	1	3062,64
6	0,80	9	1	2923,44	0,49	9,9	1,3	3121,34	0,46	9	1	2960,52
7	0,34	9	0	4024,20	0,73	9	0,6	3792,12	0,80	9	0	4024,20
8	0,27	8	1	3075,56	0,74	8,2	1	3092,98	0,49	8	1	3075,56
9	0,34	9	0	3747,92	0,54	10,6	0,2	4038,26	0,81	9	0	3747,92
10	0,47	8	0	2873,44	0,53	8,3	0	2932,94	0,55	8	0	2873,44
11	0,33	8	3	3112,64	0,74	9,2	3,1	3464,55	0,88	8	3	3112,64
12	0,44	8	12	3351,84	0,71	7,2	12	3367,68	0,57	8	12	3351,84
13	0,54	9	0	2923,44	0,49	9,4	0	2978,48	0,38	9	0	2923,44
14	0,22	10	1	3047,60	0,59	10,2	1,3	3065,02	0,59	10	1	3047,60
15	0,43	8	0	2564,44	0,64	8,6	0	2974,84	0,82	8	0	2564,44
16	0,51	8	0	3660,84	0,67	9,3	0	4059,41	1,13	8	0	3697,92
17	0,36	9	1	2923,44	0,50	9,2	1	3006,80	0,38	9	1	2923,44
18	0,41	9	0	2960,52	0,66	9,1	0	3340,61	0,72	9	0	2960,52
19	0,32	7	0	2823,44	0,47	8,5	0	2974,27	0,39	8	0	2910,52
20	0,46	8	2	2910,52	0,70	8,2	2	3150,92	0,52	8	2	2910,52
21	0,34	8	3	2564,44	0,60	8,9	3	2763,58	0,46	8	3	2564,44
22	0,40	8	4	3182,44	0,61	8	4,3	2923,17	0,50	8	4	3182,44
23	0,31	9	0	3236,80	0,72	9,1	0,3	3285,93	0,56	9	0	3236,80
24	0,27	9	0	3199,72	0,51	9,7	0,7	3588,87	0,68	9	0	3199,72
25	0,29	9	0	2853,64	0,68	9,6	0,2	3077,76	0,71	9	0	2853,64
26	0,58	9	0	2960,52	0,66	10	0	3525,86	0,51	9	0	2960,52
27	0,30	9	1	3162,64	0,48	9,3	1	3188,76	0,29	9	1	3162,64
28	0,42	9	1	3199,72	0,56	9,4	1,1	3234,55	0,73	9	1	3199,72
29	0,35	9	1	2923,44	0,62	9,1	1	3009,65	0,55	9	1	2923,44
30	0,35	8	2	2362,32	0,70	8	2,4	2455,89	0,54	8	2	2362,32
31	0,41	8	4	3112,64	0,80	8,1	4,6	3003,78	0,71	8	4	3112,64
32	0,27	8	0	2601,52	0,73	8,9	0	2668,77	0,75	8	0	2601,52
33	0,33	11	2	3538,92	0,44	11,1	2	3637,93	0,33	11	2	3538,92
Media	0,40	8,52	1,33	3056,15	0,63	8,98	1,46	3190,95	0,60	8,55	1,33	3066,04

Tabela A.5: Resultados computacionais para instâncias de 12 nós do cenário 2

Inst	CPLEX				AG (média)				AG (melhor)			
	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)
1	8,94	9	0	2923,44	3,06	9,6	0	3588,376	2,79	9	0	2960,52
2	6,70	8	0	2873,44	1,77	9,4	0	3204,452	1,71	8	0	2873,44
3	6,56	7	0	2275,24	1,18	9,1	0	3196,068	1,56	8	0	2840,72
4	8,33	7	0	2312,32	1,64	9,6	0	2784,108	1,51	9	0	2449,4
5	9,62	8	0	2873,44	1,66	8,8	0	3225,928	2,36	8	0	2910,52
6	10,15	7	0	2860,52	1,90	8,8	0	2998,36	1,42	8	0	2910,52
7	6,05	8	0	2362,32	1,78	9,9	0	3734,464	2,50	9	0	2651,52
8	8,07	8	0	2836,36	2,12	9,5	0	3217,304	1,85	9	0	3162,64
9	7,12	7	0	2238,16	1,74	9,8	0	3470,56	2,12	9	0	2960,52
10	5,24	8	0	2873,44	1,18	9,1	0	3068,616	1,39	8	0	2873,44
11	9,59	8	0	2873,44	1,85	9,9	0	3610,356	2,07	9	0	2960,52
12	4,46	7	0	2312,32	2,81	9,9	0	3464,872	2,50	8	0	2564,44
13	4,16	7	0	2238,16	1,12	9,4	0	2967,796	1,48	9	0	2412,32
14	8,52	7	0	2823,44	1,77	9,9	0	3112,324	2,18	8	0	2873,44
15	5,44	8	0	2325,24	1,55	8,9	0	2739,656	1,65	8	0	2325,24
16	8,84	7	0	2275,24	1,96	8,9	0	3303,56	1,75	8	0	2601,52
17	8,54	8	0	2873,44	1,53	10,1	0	3322,336	1,14	9	0	3162,64
18	7,35	8	0	2362,32	1,67	8,9	0	3085,008	2,09	8	0	2399,4
19	5,50	7	0	2275,24	1,84	8,6	0	3070,808	0,98	7	0	2823,44
20	6,55	8	0	2325,24	1,34	9,5	0	3286,52	1,23	9	0	2960,52
21	3,44	8	0	2325,24	1,75	9,9	0	3128,392	1,52	9	0	2923,44
22	4,51	8	0	2325,24	1,44	8,8	0	2657,88	1,58	8	0	2325,24
23	6,22	8	0	2325,24	2,13	9,2	0	2906,756	1,52	9	0	2651,52
24	6,35	9	0	2923,44	1,61	10,2	0	3417,128	2,06	10	0	3047,6
25	4,97	8	0	2325,24	1,80	9,2	0	2950,452	1,98	9	0	2449,4
26	5,79	8	0	2362,32	2,05	10,4	0	3382,268	2,41	9	0	2997,6
27	8,38	9	0	2923,44	1,45	10,1	0	3261,7	1,70	10	0	3010,52
28	4,97	8	0	3112,64	1,45	9,6	0	3218,596	1,41	9	0	3162,64
29	3,86	9	0	3162,64	2,91	10,2	0	3256,012	3,71	9	0	3162,64
30	13,16	9	0	2923,44	2,18	9,3	0	3023,36	2,11	9	0	2923,44
31	10,00	8	0	3112,64	1,68	8,8	0	3174,888	1,73	8	0	3112,64
32	5,23	7	0	2312,32	1,61	8,4	0	2595,056	1,53	7	0	2312,32
33	6,10	9	0	2923,44	1,61	10,4	0	3240,42	1,50	10	0	3010,52
Media	6,93	7,88	0	2611,21	1,79	9,46	0	3171,65	1,85	8,61	0	2811,10

Tabela A.6: Resultados computacionais para instâncias de 25 nós do cenário 2

Inst	CPLEX				AG (média)				AG (melhor)			
	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)
1	91,78	8	0	2873,44	5,58	10,5	0	3613,96	6,85	10	0	3249,72
2	99,57	8	0	2325,24	3,10	9,9	0	3257,08	2,25	10	0	3010,52
3	67,62	7	0	2238,16	3,54	9	0	2872,84	5,07	8	0	2362,32
4	78,23	7	0	2312,32	4,12	9,4	0	2861,94	6,22	8	0	2325,24
5	99,27	7	0	2860,52	3,48	9,3	0	3238,13	1,84	8	0	2910,52
6	90,40	7	0	2312,32	3,77	10,4	0	3296,84	3,93	8	0	2910,52
7	62,45	7	0	2238,16	4,52	9,6	0	2983,18	3,94	9	0	2486,48
8	43,54	7	0	2238,16	5,71	10,8	0	3345,34	5,78	10	0	2812,76
9	67,73	7	0	2238,16	4,00	10,1	0	3482,72	4,89	9	0	2725,68
10	50,99	8	0	2325,24	3,87	9,7	0	3254,86	9,11	8	0	2873,44
11	54,53	7	0	2312,32	4,54	10,5	0	3499,74	5,22	9	0	2997,60
12	53,85	7	0	2238,16	4,97	10,6	0	3118,17	5,84	8	0	2362,32
13	55,88	7	0	2238,16	4,29	9,5	0	2809,21	3,70	8	0	2325,24
14	57,85	7	0	2275,24	3,33	10,2	0	3248,52	3,28	9	0	2960,52
15	90,31	7	0	2275,24	3,60	9,7	0	3057,90	2,28	8	0	2601,52
16	76,37	7	0	2275,24	3,63	8,5	0	2632,99	3,82	7	0	2275,24
17	102,01	8	0	2325,24	3,87	10,4	0	3337,77	4,73	9	0	3199,72
18	60,94	8	0	2325,24	4,27	9,5	0	3070,44	4,16	9	0	2449,40
19	68,22	7	0	2275,24	4,26	8,9	0	3208,68	4,21	7	0	2823,44
20	53,06	8	0	2325,24	3,45	10	0	3390,70	3,24	8	0	3112,64
21	78,71	8	0	2325,24	3,88	10,2	0	3199,08	4,28	9	0	2923,44
22	64,35	7	0	2275,24	4,19	9,4	0	2631,82	7,23	8	0	2325,24
23	69,33	7	0	2238,16	3,89	9,9	0	2981,31	4,93	9	0	2412,32
24	86,53	8	0	2325,24	3,69	10,1	0	3424,92	5,06	9	0	2997,60
25	64,82	8	0	2325,24	3,62	9,3	0	3193,27	4,89	8	0	2564,44
26	64,16	8	0	2325,24	4,58	9,5	0	3190,04	6,00	8	0	2947,60
27	127,78	8	0	2873,44	3,62	9,6	0	3043,74	2,96	9	0	2923,44
28	84,25	7	0	2312,32	3,58	9,8	0	3318,46	3,20	9	0	3162,64
29	82,19	8	0	2325,24	4,82	10,8	0	3319,38	4,23	9	0	3162,64
30	84,43	7	0	2823,44	4,46	10,9	0	3239,83	3,73	10	0	3010,52
31	114,65	8	0	2564,44	3,86	9,7	0	3256,97	4,50	9	0	3162,64
32	66,52	7	0	2275,24	4,14	8,8	0	2622,04	6,99	7	0	2312,32
33	96,95	8	0	2873,44	3,60	10,9	0	3318,57	4,05	10	0	3010,52
Media	76,04	7,42	0	2384,51	4,06	9,86	0	3161,23	4,62	8,61	0	2778,49

Tabela A.7: Resultados computacionais para instâncias de 51 nós do cenário 2

Inst	CPLEX				AG (média)				AG (melhor)			
	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)	Tempo (s)	# ativos	# desc	FO (mAms)
1	4514,13	7	0	2275,24	8,21	10,7	0	3561,73	15,37	10	0	3212,64
2	3763,48	6	0	2225,24	6,52	10,1	0	3178,02	10,17	9	0	2651,52
3	1982,77	7	0	2238,16	7,48	9,9	0	3090,88	14,58	11	0	2660,64
4	3622,25	7	0	2275,24	6,49	10,8	0	3157,40	8,61	9	0	2651,52
5	5234,96	7	0	2275,24	9,53	10,3	0	3187,58	4,85	9	0	2960,52
6	1642,23	6	0	2188,16	7,17	10,4	0	3286,59	4,25	9	0	2960,52
7	2281,57	7	0	2238,16	8,57	10,1	0	3106,69	10,51	9	0	2412,32
8	1635,85	7	0	2238,16	7,77	9,8	0	3033,60	14,00	9	0	2412,32
9	2037,12	7	0	2238,16	5,88	10,8	0	2989,23	4,42	10	0	2499,40
10	4487,47	7	0	2275,24	9,10	10,3	0	3228,37	8,37	9	0	2960,52
11	3502,86	7	0	2275,24	8,38	10,6	0	3442,94	7,29	10	0	3249,72
12	1960,65	7	0	2238,16	6,65	10,6	0	3126,31	8,36	9	0	2449,40
13	1505,35	7	0	2238,16	6,22	10,7	0	3102,08	11,21	7	0	2238,16
14	1828,80	7	0	2238,16	7,09	9,7	0	3016,60	7,56	8	0	2325,24
15	2956,92	7	0	2238,16	10,17	10,4	0	3303,53	13,20	9	0	2688,60
16	2524,87	7	0	2275,24	8,30	9	0	3084,26	4,64	9	0	2651,52
17	2669,16	7	0	2275,24	7,77	9,8	0	3256,22	10,72	8	0	2873,44
18	2420,71	7	0	2238,16	9,26	10,4	0	3379,72	5,25	10	0	2775,68
19	3632,74	6	0	2262,32	8,01	10,2	0	3140,99	11,36	9	0	2651,52
20	1980,72	7	0	2238,16	7,34	11	0	3229,70	9,00	9	0	2614,44
21	2568,47	8	0	2325,24	7,21	10,6	0	3082,62	4,94	9	0	2412,32
22	4806,46	7	0	2275,24	9,71	9,5	0	2748,57	9,28	8	0	2325,24
23	1653,41	7	0	2238,16	9,48	9,9	0	2958,99	9,59	8	0	2362,32
24	2140,90	7	0	2275,24	8,21	10	0	3281,86	21,32	9	0	2725,68
25	5177,50	8	0	2325,24	8,21	10,8	0	3352,32	8,43	10	0	3010,52
26	4435,92	8	0	2325,24	9,44	9,9	0	3269,00	20,99	8	0	2399,40
27	5401,01	7	0	2275,24	6,61	9,9	0	3069,86	3,90	9	0	2923,44
28	3177,66	7	0	2275,24	9,38	10,4	0	3028,56	4,83	9	0	2614,44
29	3992,27	7	0	2275,24	7,46	10,5	0	3050,06	5,98	9	0	2614,44
30	5740,15	7	0	2823,44	9,67	11,5	0	3409,13	13,19	10	0	3010,52
31	2380,91	7	0	2275,24	8,56	9,1	0	3156,88	6,29	9	0	2449,40
32	1732,48	7	0	2238,16	7,93	10,1	0	2792,17	4,88	8	0	2399,40
33	1696,34	7	0	2312,32	10,43	11,5	0	3519,21	7,64	10	0	3010,52
Media	3063,28	7,00	0	2279,49	8,13	10,28	0	3170,35	9,24	9,03	0	2671,43

Tabela A.8: Resultados computacionais para instâncias de 102 nós do cenário 2

Referências Bibliográficas

- Aioffi, W. M. (2007). Métodos integrados para organização de redes de sensores sem fio com sorvedouro móvel e controle de densidade. Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Akyildiz, I. F.; Su, W.; Sankarasubramaniam, Y. e Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38:393–422.
- Al-Karaki, J. N. e Kamal, A. E. (2004). Routing techniques in wireless sensor networks: A survey. *Wireless Communications, IEEE [see also IEEE Personal Communications]*, 11:6–28.
- Bajaj, L.; Takai, M.; Ahuja, R.; Bagrodia, R. e Gerla, M. (1999). GloMoSim: A scalable network simulation environment. Technical Report 990027, UCLA.
- Barr, R.; Haas, Z. J. e van Renesse, R. (2005). Scalable wireless ad hoc network simulation. *Handbook on Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad hoc Wireless, and Peer-to-Peer Networks. Ch. 19*, pp. 297–311.
- Bhardwaj, M. e Chandrakasan, A. (2002). Bounding the lifetime of sensor networks via optimal role assignments. In *INFOCOM*.
- Cheekiralla, S. e Engels, D. W. (2005). A functional taxonomy of wireless sensor network devices. In *IEEE 2nd International Conference on Broadband Networks*, pp. 26–33.
- CPLEX (2007). Cplex. www.cplex.com.
- Dasgupta, K.; Kukreja, M. e Kalpakis, K. (2003). Topology-aware placement and role assignment for energy-efficient information gathering in sensor networks. In *ISCC*, pp. 341–348.
- Drezner, Z. e Hamacher, H., editores (2002). *Facility location: Applications and Theory*. Springer, Berlin.
- Frank, C. e Römer, K. (2005). Algorithms for generic role assignment in wireless sensor networks. In *SenSys*, pp. 230–242.

- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*. University of Michigan Press.
- Hu, Z. e Li, B. (2004). On the fundamental capacity and lifetime limits of energy-constrained wireless sensor networks. In *IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, pp. 2–9.
- JiST/SWANS (2007). Java in simulation time / scalable wireless ad hoc network simulator. <http://jist.ece.cornell.edu>.
- Johnson, D. B. e Maltz, D. A. (1996). Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In Imielinski e Korth, editores, *Mobile Computing*, volume 353. Kluwer Academic Publishers.
- Li, M. e Yang, B. (2006). A survey on topology issues in wireless sensor network. In *ICWN*, p. 503.
- Loureiro, A. A. (2007). Grandes desafios da pesquisa em computação no Brasil 2006 - 2016.
- Maroti, M.; Simon, G.; Kusy, B. e Ledeczi, A. (2004). The flooding time synchronization protocol. In *ACM 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pp. 39–49, Baltimore, MD, USA.
- Menezes, G. C. (2004). Modelo e algoritmos para a definição da densidade, cobertura e conectividade em uma rede de sensores sem fio. Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Nakamura, F. G.; Quintão, F. P.; Menezes, G. C. e Mateus, G. R. (2005). An optimal node scheduling for flat wireless sensor networks. In *ICN (1)*, pp. 475–482.
- NS2 (2007). Network simulator 2. www.isi.edu/nsnam/ns.
- Oliveira, A. L. (2004). Modelo e algoritmos para organização de redes de sensores sem fio hierárquicas. Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.
- O'Rourke, J. (1987). *Art Gallery Theorems and Algorithms*. The International Series of Monographs on Computer Science. Oxford University Press, New York. QA830 O74a.
- Perkins, C. E. e Royer, E. M. (1999). Ad-hoc on-demand distance vector routing. *wmcsa*, 00:90.
- Rajeswaran, A. e Negi, R. (2004). Capacity of power constrained ad-hoc networks. In *INFOCOM*.
- Römer, K. e Mattern, F. (2004). The design space of wireless sensor networks. *IEEE Wireless Communications Magazine*, 11:54–61.
- Ruiz, L. B.; Nogueira, J. M. e Loureiro, A. A. F. (2003). Manna: A management architecture for wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 41(2):116–125.

- Slijepcevic, S. e Potkonjak, M. (2001). Power efficient organization of wireless sensor networks. In *IEEE International Conference on Communications*, volume 2, pp. 472–476.
- Tilak, S.; Abu-Ghazaleh, N. B. e Heinzelman, W. (2002). A taxonomy of wireless micro-sensor network models. *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, 6(2):28–36.
- Xu, Y.; Heidemann, J. S. e Estrin, D. (2001). Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. In *Mobile Computing and Networking*, pp. 70–84.
- Yoneki, E. e Bacon, J. (2005). A survey of wireless sensor network technologies: Research trends and middleware role. Technical Report UCAM-CL-TR-646, University of Cambridge.
- Youssef-Massaad, P. G.; Medard, M. e Zheng, L. (2004). Impact of processing energy on the capacity of wireless channels. In *International Symposium on Information Theory and its Applications*.
- Zhao, W.; Ammar, M. e Zegura, E. (2004). The energy-limited capacity of wireless networks. In *IEEE Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, pp. 279–288.