

WELLINGTON GOMES RIBEIRO

**APLICAÇÃO DE METAHEURÍSTICAS PARA O PROBLEMA DE COBERTURA E
ROTEAMENTO EM REDES DE SENSOES SEM FIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2012**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

R484a
2012

Ribeiro, Wellington Gomes, 1985-

Aplicação de metaheurísticas para o problema de cobertura e roteamento em redes de sensores sem fio / Wellington Gomes Ribeiro. – Viçosa, MG, 2012.
xii, 96f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: José Elias Cláudio Arroyo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 77-80

1. Pesquisa operacional. 2. Redes locais sem fio.
3. Heurística. 4. Otimização combinatória. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 003

WELLINGTON GOMES RIBEIRO

APLICAÇÃO DE METAHEURÍSTICAS PARA O PROBLEMA DE COBERTURA
E ROTEAMENTO EM REDES DE SENSORES SEM FIO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 12 de junho de 2012

Luciana Brugiolo Gonçalves

Marcelo Lisboa Rocha

José Elias Claudio Arroyo
(Orientador)

*Dedico essa dissertação ao meu grande Deus,
O Todo-Poderoso
O grande Eu sou*

*Aos meus pais
José Antônio, Ione*

*À minha esposa
Regiane*

*À meu irmão
Herson*

E a toda minha família

AGRADECIMENTOS

Com muita alegria no meu coração quero agradecer ao Deus Pai, Deus Filho e ao Deus Espírito Santo. Foi pela Sua vontade que cheguei até aqui. Porque d'Ele por Ele, para Ele são todas as coisas.

Agradeço de todo o meu coração aos meus pais José Antônio Venâncio Ribeiro e Ione Gomes Ribeiro que me motivaram e me incentivaram a continuar e sempre persistir nos meus objetivos e, mesmo em momentos difíceis sempre tiveram uma palavra motivadora para me encher de encorajem para seguir em frente. Sempre me apoiaram financeiramente e emocionalmente, sacrificando a si mesmos para que eu chegasse até aqui e para que pudesse resistir à distância e a saudade que aumentava a cada dia. – Eu amo vocês!

À minha esposa Regiane Soares dos Santos Ribeiro que, mesmo estando longe fisicamente, sempre estávamos ligados em pensamentos e em constantes e longas ligações para podermos amenizar a saudade que era tamanha. – Eu te amo minha linda!

Agradeço muito ao meu orientador José Elias Claudio Arroyo que me recebeu como seu orientando e sempre esteve empenhado pela realização desse trabalho e, foi o responsável pelo surgimento da ideia para explorarmos este assunto. Estava sempre disposto a ajudar e a sugerir novas soluções e mostrar a direção quando eu me achava um pouco “perdido” no andamento e desenvolvimento das atividades.

Agradeço também ao professor Marcelo Lisboa Rocha que foi meu orientador na graduação. Ele foi quem me falou do mestrado da UFV e que me motivou a iniciar essa jornada para realização desse sonho, que está se cumprindo com este trabalho.

Não poderia deixar de agradecer a empresa de telefonia TIM Celular. Pelo plano *Infinity Pré*, que me possibilitou falar com minha família a preço reduzido, fazendo com que dessa forma eu ficasse bem ligado com eles, apesar da distância.

A Universidade Federal de Viçosa pela receptividade e pela estrutura disponibilizada para realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

WELLINGTON GOMES RIBEIRO, nascido no dia 09 de Maio do ano de 1985, natural da cidade de Gurupi no estado do Tocantins, filho de José Antônio V. Ribeiro e Ione Gomes Ribeiro.

Terminou o ensino médio no Centro de Ensino Médio de Gurupi/TO no ano de 2004 e ingressou no Centro Universitário UNIRG em 2005/1 para fazer o curso de Ciência da Computação.

Efetou serviços técnicos em computação como estagiário e pode colocar em prática alguns dos conhecimentos adquiridos durante sua graduação.

Após conclusão do bacharelado, em 2009/1, foi selecionado e convidado a ingressar no Mestrado em Ciência da Computação da Universidade Federal de Viçosa/MG no segundo semestre do mesmo ano.

Trabalhou como professor convidado na faculdade UNIVIÇOSA em Viçosa/MG durante o segundo semestre de 2009.

Trabalho como professor Assistente no Centro Universitário UNIRG a partir do ano de 2010/2, estando até a presente data.

Defendeu sua dissertação no dia 12 de Junho de 2012.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Metodologia utilizada e resultados.....	5
1.4 Organização do documento	5
2 REDES DE SENSORES SEM FIO	7
2.1 Trabalhos Relacionados	8
2.2 Nós Sensores	9
2.3 Caracterização e Composição de uma RSSF	10
2.4 Energia Consumida por um Nó Sensor	14
2.5 Cobertura do Sensor Sem Fio.....	16
2.6 Conexão em RSSF.....	17
3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E MODELO.....	19
3.1 Definição do Problema	19
3.2 Modelo Matemático	21
4 ILS (Iterated Local Search)	26
4.1 ILS para o Problema de Cobertura, Conectividade e Roteamento.....	28
4.1.1 Fase construtiva.....	29
4.1.2 Função de avaliação da Fase construtiva	34
4.1.3 Busca Local.....	34
4.1.4 Perturbação.....	41
4.1.5 Critério de Aceitação.....	45
4.1.6 Parâmetros de Entrada.....	46
4.1.7 Função Objetivo	50
5 RESULTADOS E TESTES COMPUTACIONAIS	52
5.1 Ambiente de Teste e Simulação	52
5.2 Resultados	63

6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
6.1	Trabalhos Futuros	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
	APÊNDICE A	81
	APÊNDICE B	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Aplicação e funcionamento de uma RSSF. Fonte: TAVARES (2002).....	2
Figura 2 - Aplicação de uma RSSF marítima. Fonte: ROCA (2007).	3
Figura 3 - Componentes de um nó sensor, baseado em IAN (2002).	9
Figura 4 - Fases do tempo de vida da rede, baseado em LOUREIRO <i>et al.</i> (2002)..	10
Figura 5 - Comparação entre plataformas dos sensores sem fio. Fonte: SENSORS (2010)	13
Figura 6 - Nó sensor MICA2. Fonte: ROCA (2007).	13
Figura 7 - Raios RC e RS de um nó sensor, baseado em MARTINS (2009).	17
Figura 8 - Conexão entre os nós que estão dentro do limite do R_c	18
Figura 9 - Definição gráfica do problema.	20
Figura 10 - Algoritmo da metaheurística ILS.	27
Figura 11 - Perturbação e busca local da metaheurística ILS.	28
Figura 12 - Algoritmo do ILS para o problema de Cobertura, Conectividade e Roteamento em RSSF.	29
Figura 13 - Algoritmo da construção gulosa.....	31
Figura 14 - Gráfico da construção gulosa com 20 nós sensores.	33
Figura 15 - Estados de uma busca local. Fonte: RUSSEL e NORVING (2007).	35
Figura 16 - Pseudocódigo Busca Local.....	36
Figura 17 - Inserção em uma configuração de rede.	37
Figura 18 - Re-conexão ente os nós dentro da área de perturbada.....	39
Figura 19 - Remoção de nós inúteis em uma área de perturbação.....	40
Figura 20 - Perturbação por inserção.	42
Figura 21 - Perturbação de inserção em cascata.	43
Figura 22 - Perturbação por remoção. Escolha do nó redundante, troca de paternidade dos filhos, desativação do nó redundante.....	45
Figura 23 - Coordenadas dos nós sensores distribuídos em um ambiente 2D.....	47
Figura 24 - Pontos de demanda em uma área 10x10.	49
Figura 25 - Topologia da instância 20_0 para os 4 períodos, PLIM e ILS.....	65
Figura 26 - Topologia da instância 31_0 para os 4 períodos, PLIM e ILS.....	67
Figura 27 - Topologia da instância 4210_10 para os 4 períodos, PLIM e ILS.....	68
Figura 28 - Topologia da instância 5310_0 para os 4 períodos, PLIM e ILS.....	70
Figura 29 - Topologia da instância 6010_10 para os 4 períodos, PLIM e ILS.....	72
Figura 30 - Topologia da instância 8510_1 para os 4 períodos, PLIM e ILS.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo de corrente do Rádio CC1000 da Chipcon na frequência de 868MHz. Fonte: NAKAMURA (2003).	15
Tabela 2 - Tipos de Dispositivos sensores. Fonte: NAKAMURA (2003).....	15
Tabela 3 – Capacidade e Consumo de energia do Processador Atmel ATmega 128L. Fonte: NAKAMURA (2003).	16
Tabela 4 - Coordenada X, Coordenada Y e Tipo dos nós Sensores.	47
Tabela 5 - Consumo de energia de transmissão com relação à distância entre os nós sensores, NAKAMURA (2003).	48
Tabela 6 - Perturbação por inserção para 20 nós.	54
Tabela 7 - Perturbação por inserção para 31 nós.	54
Tabela 8 - Perturbação por inserção para 42 nós.	54
Tabela 9 - Perturbação por inserção para 53 nós.	55
Tabela 10 - Perturbação por inserção para 60 nós.	55
Tabela 11 - Perturbação por inserção para 85 nós.	55
Tabela 12 - Combinação entre as perturbações para rede com 20 nós.	56
Tabela 13 - Combinação entre as perturbações para rede com 31 nós.	57
Tabela 14 - Combinação entre as perturbações para rede com 42 nós.	57
Tabela 15 - Combinação entre as perturbações para rede com 53 nós.	58
Tabela 16 - Combinação entre as perturbações para rede com 60 nós.	58
Tabela 17 - Combinação entre as perturbações para rede com 85 nós.	59
Tabela 18 - Repetições da metaheurística ILS para 20 nós.	60
Tabela 19 - Repetições da metaheurística ILS para 31 nós.	60
Tabela 20 - Repetições da metaheurística ILS para 42 nós.	60
Tabela 21 - Repetições da metaheurística ILS para 53 nós.	60
Tabela 22 - Repetições da metaheurística ILS para 60 nós.	61
Tabela 23 - Repetições da metaheurística ILS para 85 nós.	61
Tabela 24 - Influencia na construção da solução inicial (GRASP + ILS).	62
Tabela 25 – Comparação ente os métodos (GRASP $\alpha = 0.1$ e ILS Gulosa).	63
Tabela 26- Média dos valores com 20 nós.	65
Tabela 27- Resultados iguais à solução ótima, com 20 nós.	65
Tabela 28 – Diferença Percentual do consumo de energia em relação ao PLIM.	66
Tabela 29 – Diferença Percentual da falha de cobertura em relação ao PLIM.	66
Tabela 30- Média dos valores com 31 nós.	67
Tabela 31- Resultados iguais à soluções ótimas, com 31 nós.	67
Tabela 32 – Diferença Percentual do consumo de energia em relação ao PLIM.	68
Tabela 33 - Média dos valores com 42 nós.	69
Tabela 34- % de soluções ótimas, com 42 nós.	69
Tabela 35 – Diferença Percentual do consumo de energia em relação ao PLIM.	69
Tabela 36 - Média dos valores com 53 nós.	70
Tabela 37 – Diferença Percentual do consumo de energia em relação ao PLIM.	71
Tabela 38- Média dos valores com 60 nós.	72
Tabela 39 – Diferença Percentual do consumo de energia em relação ao PLIM.	72

Tabela 40 – Diferença Percentual da falha de cobertura em relação ao PLIM.....	73
Tabela 41- Média dos valores com 85 nós.....	74
Tabela 42 – Diferença Percentual do consumo de energia em relação ao PLIM.	74
Tabela 43 – Diferença Percentual da falha de cobertura em relação ao PLIM.....	74
Tabela 44 - Resultados das 12 instâncias com 20 nós.	82
Tabela 45 - Tempo das 12 instâncias com 20 nós.....	83
Tabela 46 - Resultados das 12 instâncias com 31 nós.	84
Tabela 47 - Tempo das 12 instâncias com 31 nós.....	85
Tabela 48 - Resultados das 12 instâncias com 42 nós.	86
Tabela 49 - Tempo das 12 instâncias com 42 nós.....	87
Tabela 50 - Resultados das 12 instâncias com 53 nós.	88
Tabela 51 - Tempo das 12 instâncias com 53 nós.....	89
Tabela 52 - Resultados das 12 instâncias com 60 nós.	90
Tabela 53 - Tempo das 12 instâncias com 60 nós.....	91
Tabela 54 - Resultado das 12 instâncias com 85 nós.....	92
Tabela 55 - Tempo das 12 instâncias com 85 nós.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BL – Busca Local

CPLEX – Software matemático

FO – Função Objetivo

GRASP – (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*)

ILS – *Iterated Local Search* e Método ILS Básico

PLIM – Programação Linear Inteira Mista

R_C – Raio de Comunicação dos sensores

R_S – Raio de Sensoriamento dos sensores

RSSF – Redes de Sensores Sem Fio

RESUMO

RIBEIRO, Wellington Gomes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Junho de 2012. **APLICAÇÃO DE METAHEURÍSTICAS PARA O PROBLEMA DE COBERTURA E ROTEAMENTO EM REDES DE SENSORES SEM FIO.** Orientador: José Elias Cláudio Arroyo. Coorientador: André Gustavo dos Santos.

Uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) é formado por dispositivos autômatos composto por uma bateria, um processamento, uma memória e um raio de transmissão e sensoriamento. Estes dispositivos formam uma RSSF contendo características como: cobertura, conectividade e roteamento. Esse trabalho propõe a aplicação de uma metaheurística para configurar uma RSSF de forma a garantir a cobertura de um ambiente, a conectividade entre os dispositivos e o roteamento entre eles. É feita uma divisão da topologia da rede em períodos de tempo, para garantir um maior tempo de vida da rede em sua aplicação. Os resultados obtidos mostram que através da metaheurística pode-se ter um bom desempenho em relação à topologia da rede comparada a solução do modelo exato do problema e, com um tempo computacional inferior.

ABSTRACT

RIBEIRO, Wellington Gomes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June, 2012.
METAHEURISTICS APPLICATION TO THE PROBLEM OF COVERAGE ANDROUTING IN WIRELESS SENSOR NETWORKS. Adviser: José Elias Cláudio Arroyo. Co-Adviser: André Gustavo dos Santos.

A Wireless Sensor Network (WSN) consists of automata devices composed of a battery, a process, a memory and a transmission radius and sensing. These devices form a WSN containing features such as: coverage, connectivity and routing. This work proposes the application of a metaheuristic to configure a WSN in order to ensure coverage of an environment, the connectivity between devices and the routing between them. It made a division of the network topology in time periods to ensure a longer lifetime of the network in its application. The results show that by metaheuristic can have a good performance in relation to the topology of the network compared to the solution exact of model to the problem, and with a lower computational time.

1 INTRODUÇÃO

As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são uma tecnologia que têm sido tema de várias pesquisas nas últimas décadas devido os notórios benefícios conquistados em diversas aplicações. Devido à grande evolução que esta tecnologia (RSSF) vem sofrendo, estão sendo utilizados dispositivos cada vez menores e que contam com uma capacidades de processamento e armazenamento cada vez maior. Com isso, as RSSF estão se tornando mais úteis, servindo a diversas aplicações.

Existem diversas aplicações usando RSSF, tais como nas áreas de segurança, infraestrutura, transporte, etc. Uma das utilizações mais conhecidas é na área de monitoramento, onde pode-se conseguir grandes benefícios fazendo uso das RSSF, tais como: nas indústrias (para monitoramento das máquinas), no meio ambiente (para monitoramento de fenômenos naturais) e em várias outras áreas, (ESTRIN 2001 e SRIVASTAVA *et al.* 2001). Pode-se monitorar o ar, o solo, a água, o espaço, o habitat de plantas e animais e ambientes relacionados aos serviços militares, etc., BHARATHIDASAN (2003).

Estas redes são denominadas de Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) devido seus componentes, também denominados de dispositivos sem fio, dispositivos também conhecidos como “nós sensores”, NAKAMURA (2003) e SRIVASTAVA *et al.* (2001). Esses dispositivos são classificados como um tipo específico de rede Mobile Ad hoc Networks (MANET), segundo MARTINS (2009).

Os sensores sem fio são dispositivos autônomos e compactos e contam com uma capacidade de processamento, sensoriamento e comunicação limitada devido sua estrutura física. Ciente das particularidades que compõem um dispositivos sem fio, pode-se configurar uma RSSF para resolver problemas de monitoramento de forma bastante eficiente, NAKAMURA (2003). Apesar das limitações que cada dispositivo tem individualmente, grandes tarefas podem ser executadas com a junção e colaboração entre eles, SRIVASTAVA *et al.* (2001).

As RSSF são formadas por vários nós sensores, AKYILDIZ *et al.* (2002), e trabalham coletando informações do ambiente ao qual foi implantada (como

temperatura, umidade, movimento, luminosidade, etc.), fazendo com que essas informações cheguem a uma base central, onde serão filtradas, processadas e analisadas para extração de informações.

Conforme exibido na Figura 1, em todos os ambientes de aplicação de uma RSSF, os fenômenos são monitorados por meio de coleta de informações. As informações coletadas pelos sensores formam pacotes. Esses pacotes são transmitidos pelos nós sensores vizinhos, com a finalidade de que essas informações cheguem à base de coleta central, chamada de sorvedouro (representado na figura por Sink). Após o sorvedouro receber as informações, elas serão processadas e retransmitidas para outra base de processamento, para que possam extrair conhecimentos relevantes sobre o ambiente que está sendo monitorado.

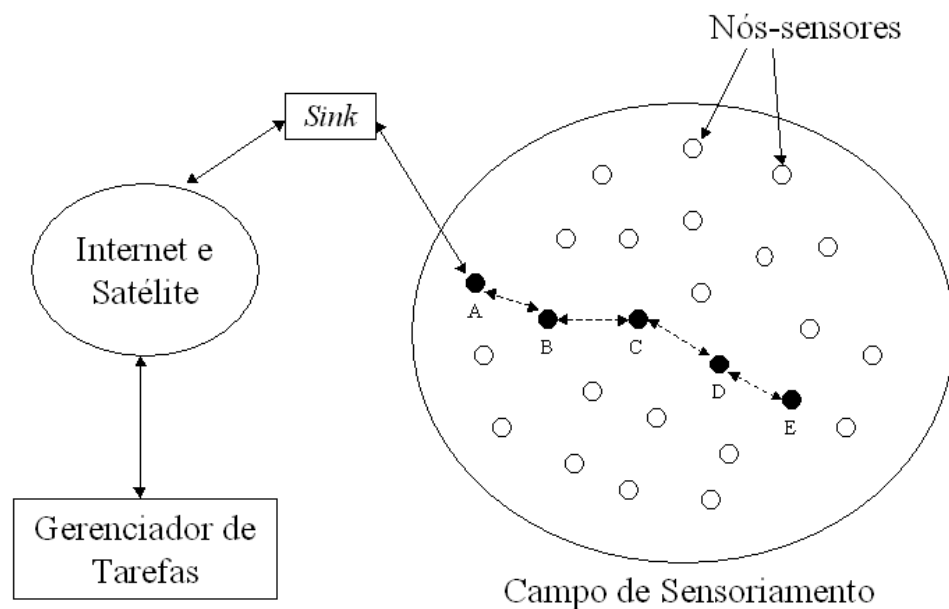


Figura 1 - Aplicação e funcionamento de uma RSSF. Fonte: TAVARES (2002).

Devido as características autônomas de cada nó sensor, torna-se possível a atividade dos mesmos sobre um ambiente a ser monitorado, dando base para várias outras implantações de RSSF serem feitas, abrangendo diversas áreas do conhecimentos.

Como mostra a Figura 2, foi desenvolvida uma aplicação utilizando RSSF com objetivo de servir à Marinha, na detecção de submarinos. O monitoramento é feito através de nós sensores distribuídos no oceano com a finalidade de captar informações que serão processadas e interpretadas com objeto de detectar objetos (conforme mostra a Figura 2).

Com esta aplicação de RSSF no monitoramento marítimo, torna-se possível uma tomada de decisão mais rápida e eficaz por parte das autoridades competentes desta área.

Submarine Detection

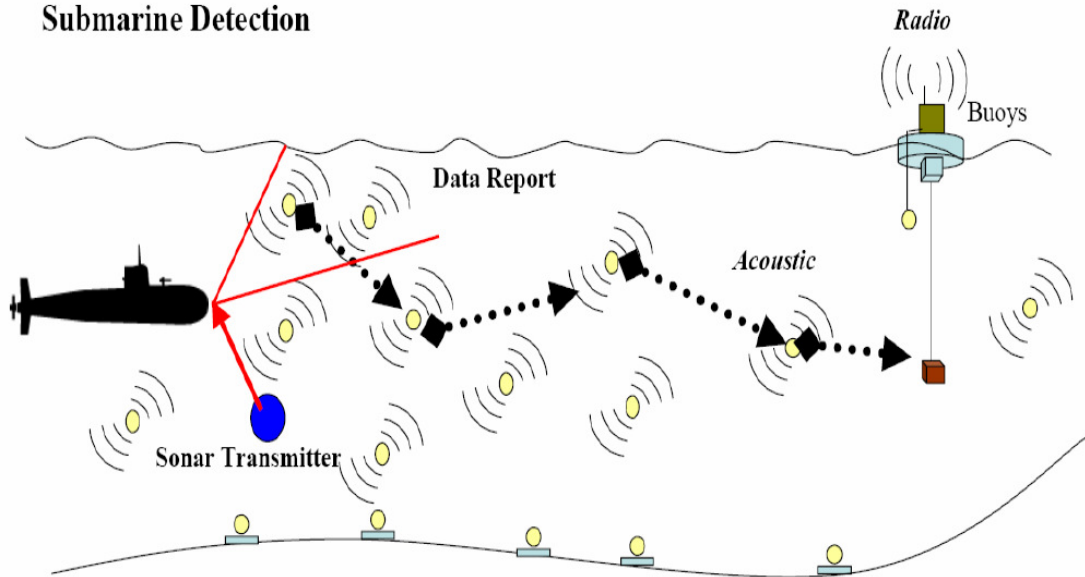


Figura 2 - Aplicação de uma RSSF marítima. Fonte: ROCA (2007).

Existem várias particularidades e restrições em uma RSSF que devem ser levadas em consideração, como por exemplo: a redundância e a alta densidade de nós, a baixa largura de banda (para transmissão de pacotes), a capacidade de energia e outras, LOUREIRO *et al.* (2002).

Segundo NAKAMURA (2003), uma das maiores dificuldades em se trabalhar com RSSF é em relação ao consumo de energia da rede, pois os nós sensores não dispõem de energias renováveis. Com isso, o consumo de energia se torna um dos maiores limitadores em aplicações envolvendo RSSF.

Outro fator de difícil manuseio em uma RSSF é em relação à dinâmica da rede durante suas atividades. Os nós sensores são dispositivos físicos sujeitos a falhas (por energia ou por problemas do próprio dispositivo físico). Desta forma, outra grande dificuldade é fazer com que uma RSSF esteja conectada e garantir a comunicação e o roteamento entre os nós sensores que estejam em atividade.

1.1 Motivação

Um grande motivador deste trabalho se dá devido à grande concorrência existente em todas as áreas, tanto da agricultura, nas indústrias, na segurança e etc. Exigindo-se cada vez mais precisão e rapidez nos processos de cultivo e

principalmente nas linhas de produções. Com isso, as RSSF tornam-se uma grande aliada aos processos de produção, dando-os mais agilidade, segurança e eficácia.

Outra grande motivação é em relação às particularidades das RSSF, que vão dos dispositivos usados para construção de uma rede até a implantação dos mesmos no ambiente a ser monitorado. Os sensores sem fio contam com recursos limitados, como: capacidade de bateria, raio de alcance para transmissão, tamanho físico (dependendo da aplicação, pode ser um empecilho), capacidade de processamento, limite de banda para transmissão, etc.

Alem das particularidades dos sensores, existem alguns parâmetros externos que não contribuem para a implantação de uma RSSF, tais como: relevo do terreno, obstáculos (como montanhas, vales e outros), clima (às vezes muito quente no caso de um vulcão ou um deserto, as vezes muito frio, no caso de aplicações em geleiras, ou muito úmido em cachoeiras, etc.), exposição à chuva ou sol, terreno de difícil acesso para possíveis manutenções nos sensores (nem sempre é possível fazer uma manutenção) e vários outros fatores que tornam ainda mais desafiador a aplicação de RSSF.

Manter a rede sempre configurada de forma a garantir o roteamento e a conexão entre os sensores com a maior cobertura possível do ambiente monitorado (mesmo considerando possíveis falhas físicas nos dispositivos ou por falta de energia) são grandes desafios que se transformam em motivadores.

Outro desafio é garantir o maior tempo de funcionamento da rede, fazendo divisões em períodos de tempo, fazendo um revezamento entre os nós sensores ativos e os inativos a cada intervalos de tempo, para que dessa forma os nós sensores possam reduzir esforços (poupando energia).

Todos os pontos apresentados suscita uma enorme motivação nos trabalhos relacionados com o auxílio das RSSF.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo buscar a implementação de um método multiobjetivo para resolver o problema de cobertura, conectividade e roteamento em redes de sensores sem fio (RSSF). Através deste método, procura-se obter boas configurações destas redes em um baixo tempo computacional e fazendo com que os resultados encontrados sejam o mais próximo possível ou até mesmo iguais as soluções obtidas pelo modelo matemático proposto por NAKAMURA (2003).

A partir dos nós sensores distribuídos em uma área a ser monitorada, procurando garantir a maior cobertura desta área com a menor quantidade possível de nós sensores, reduzindo assim o consumo de energia. Procura-se garantir a conexão entre os nós ativos da rede com a base de processamento (sorvedouro). Com o intuito de maximizar o tempo de funcionamento da rede, será feito o planejamento para distribuir a rede em intervalos de tempo. Desta forma os nós sensores pouparão esforços, contribuindo assim para uma maior economia de energia.

1.3 Metodologia utilizada e resultados

Os métodos utilizados para resolver o problema de cobertura, conectividade e roteamento em RSSF foram:

A metaheurística ILS, proposta por LOURENÇO *et al.* (2002) com objetivo de se obter a configuração da topologia da rede e fazer o gerenciamento da mesma durante os períodos de tempo propostos. Para essa realização, foi feito uso de uma função multiobjetivo para se obter a configuração da rede, atendendo todas as particularidades da mesma.

O programa comercial CPLEX 12.1 IBM (2010) foi utilizado para executar o modelo matemático, proposto por NAKAMURA (2003) e com ele obter a solução ótima dos problemas testados pelo método heurístico.

Os resultados foram obtidos mediante testes realizados em 12 instâncias que foram geradas para 6 diferentes tamanhos de problemas, com 20, 31, 42, 53, 60 e 85 nós sensores, distribuídos em uma área de 100m².

1.4 Organização do documento

Este documento está organizado da seguinte forma: No primeiro capítulo é apresentada uma introdução abrangente e genérica sobre o que é e como funciona uma rede de sensores sem fio (RSSF). Foram expostas as motivações que suscitaram e conduziram este trabalho, os objetivos pelos quais o mesmo foi desenvolvido e a metodologia utilizada para que fosse possível realiza-lo.

No capítulo 2 é feita uma abordagem aprofundada sobre as RSSF, os trabalhos relacionados da área, um detalhamento sobre a estrutura e o funcionamento dos nós sensores (que são os dispositivos principais da rede). Estão classificados os tipos e as

características de uma RSSF e suas composições; é feita uma abordagem voltada para o consumo de energia, a cobertura que os sensores exercem sobre o ambiente monitorado e a conectividade entre os sensores.

No capítulo 3, o problema de cobertura, conectividade e roteamento em RSSF é definido formalmente, seguido da exibição do modelo matemático proposto por NAKAMURA (2003).

No capítulo 4, é exibida a parte relacionada à otimização multiobjetivo, iniciando-se com a descrição do método ILS (*Iterated Local Search*), os parâmetros de entrada utilizados para o problema, os tipos de arquivos e a configuração do mesmo. É feita a definição de uma solução e a exposição do cálculo utilizado para se obter a função objetivo (FO).

As implementações são exibidas detalhadamente, sendo elas: a construção de uma solução inicial, a busca local, as perturbações e o critério de aceitação. Todos estes passos da implementação são particulares da metaheurística utilizada.

No capítulo 5, é exposto o ambiente utilizado para realização dos testes e simulações e os resultados que foram encontrados.

No capítulo 6, o trabalho é concluído e se propõe novas abordagens a serem realizadas para continuação e melhora do mesmo.

Por último são expostas as referências bibliográficas utilizadas como base para o desenvolvimento deste trabalho.

2 REDES DE SENSORES SEM FIO

As redes de sensores sem fio (RSSF) estão desempenhando um papel importante para o mundo globalizado do século XXI com aplicações cada vez mais interessantes.

Aplicações voltadas para a área de monitoramento podem ser implantadas utilizando esta tecnologia de RSSF, conforme apresentado em REZENDE (2004) e ESTRIN (2001). Isso é percebido devido às grandes necessidade de se monitorar ambientes onde a presença humana não é viável (ou até mesmo inadequada) devido a questões de acessibilidade, custos e riscos.

Segundo NAKAMURA (2003), as redes de sensores sem fio podem ser usadas para monitoramento florestais, visando ter um controle sobre os possíveis incêndios que venham a ocorrer ou outros destemperes da natureza. Para isso, os sensores (também chamados de sensores fontes) que formam esta rede devem ser capazes de monitorar alguns parâmetros estratégicos, como: temperatura, pressão barométrica (pressão exercida pela atmosfera sobre um determinado ponto), umidade, luz, velocidade do vento; requisitos estes que, quando combinados com a topologia e a vegetação do local, poderia prever, com grande precisão, o avanço de um possível incêndio e os danos causados pelo mesmo conforme a demora no seu combate.

Várias outras aplicações podem ser feitas com o apoio das RSSF. Ainda segundo NAKAMURA (2003), outra aplicação seria na agricultura de precisão. Uma técnica que é usada para aumentar a produtividade do que está sendo cultivado, suprimindo no tempo certo as necessidades exigidas pelo solo (área de colheita) para aumentar o potencial de produção. Para que essas necessidades sejam conhecidas é preciso monitorar várias informações da área de colheita, como: temperatura, luz e umidade que serão obtidas através dos sensores espalhados em toda a área que está sendo cultivada, no intuito de maximizar o poder de produção e evitar ou diminuir as perdas.

2.1 Trabalhos Relacionados

Alguns trabalhos que estão relacionados com o problema que envolve a cobertura, a conectividade e o roteamento nas RSSF estão referenciados a seguir.

NAKAMURA (2003) – propõe dois modelos denominados como: “Problema Dinâmico de Cobertura e Conectividade (PDCC)”, fazendo uso dos modelos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM). Esses modelos garantem a cobertura, conectividade e o roteamento em uma RSSF com pré-definição de intervalos de tempo no intuito de minimizar o consumo de energia total da rede. Fornece uma solução onde se obtêm, para cada intervalo de tempo, qual é a melhor topologia da rede, definindo quais nós serão ativos e quais serão desativados e a rota entre esses nós ativos e o sorvedouro (que é responsável pelo processamento dos dados coletados dos sensores).

ANDRADE (2008) – propõe uma Heurística Gulosa para solução do problema de cobertura, conectividade e roteamento em RSSF multiperíodo, de forma a encontrar resultados eficientes na geração de soluções aproximadas quando comparadas ao modelo matemático proposto por NAKAMURA 2003.

Em ANDRADE (2009), é proposta uma metaheurística GRASP para o mesmo problema de cobertura, conectividade e roteamento multiperíodo em RSSF planas onde os resultados são comparados com o mesmo modelo matemático executado no software comercial CPLEX e mostra excelentes resultados com relação à qualidade de serviço, nesse caso fornecendo soluções próximas e até iguais à solução ótima do modelo matemático.

QUINTÃO (2005) – o problema de cobertura e conectividade em RSSF é resolvido utilizando uma abordagem híbrida, tendo como base dois algoritmos: Algoritmos Genéticos e Busca Local. Os resultados foram satisfatórios onde o algoritmo é executado de forma rápida e obtêm bons resultados comparados ao modelo matemático proposto por NAKAMURA (2003).

MARTINS (2009) – aborda o problema de conectividade, cobertura em RSSF de diferentes maneiras, utilizando uma otimização Mono-Objetivo e MultiObjetivo. É adotada uma reconfiguração da topologia da rede durante os períodos de tempo e com relação às falhas dos nós sensores em função do esgotamento da bateria ou do próprio dispositivo. O problema é resolvido utilizando um Algoritmos Genéticos, que é baseado na evolução dos seres vivos. É feita uma comparação com o modelo

matemático proposto por NAKAMURA (2003). Essa comparação gera uma diferença de tempo positivo muito grande, sendo assim, obtêm-se uma solução boa em um baixo tempo computacional e aumenta o tempo de vida da rede consideravelmente.

ANDRADE (2010) – faz uma abordagem utilizando um Algoritmo Evolucionário (AE) para o problema de Cobertura, Conectividade e Roteamento Multi-Períodos em RSSF. Os resultados obtido com o AE são comparados com os do modelo de PLIM proposto por NAKAMURA (2003) e os resultados da heurística GRASP apresentada por ANDRADE (2009). O AE obteve um melhor desempenho com relação ao tempo computacional gasto comparados ao PLIM e GRASP. O AE também demonstrou uma pequena melhora nas soluções encontradas pela heurística GRASP.

2.2 Nós Sensores

Os sensores sem fio são dispositivos que têm uma arquitetura simplificada, devido suas limitações físicas (tamanho). Estes dispositivos são autônomos que trabalham individualmente, mas colaborando um com os outros para realização de uma tarefa de sensoriamento. Cada nó sensor é composto por uma unidade de transmissão, uma unidade de processamento, uma unidade de sensoriamento e uma bateria de alimentação, segundo IAN (2002) e CUGNASCA (2008). A Figura 3 representa um nó sensor sem fio e suas interligações.

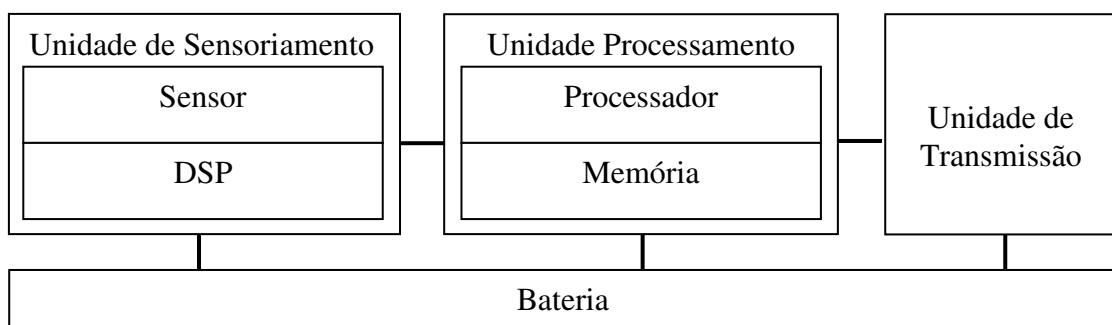


Figura 3 - Componentes de um nó sensor, baseado em IAN (2002).

Cada um desses componentes que compõem um dispositivo sem fio têm uma função específica e fundamental para o funcionamento do nó sensor e da rede como um todo. Dependendo do tipo do sensor, a capacidade dos componentes que o compõem podem sofrer algumas variações.

A Unidade de Sensoriamento tem operação em ciclo contínuo e ocupa aproximadamente 66% do consumo total, como será apresentado no tópico 2.4.

A Unidade de Processamento possui uma baixa capacidade de processamento, opera em baixo ciclo de trabalho (10MHz e com 8bit) e conta com uma memória limitada que varia de 128KB a 1MB.

A Unidade de Transmissão pode variar de 1Kbps – 10Mbps com alcance máximo respectivamente de 3 a 100 metros, podendo haver perda na transmissão e operação em baixo ciclo de trabalho.

A Bateria tem um tempo de vida limitado e varia de acordo com a fonte provedora. Quanto mais esforço for empenhado por parte do nó sensor nas realizações das tarefas, mais energia será gasta.

2.3 Caracterização e Composição de uma RSSF

Uma RSSF possui várias características específicas, com particularidades que competem somente a ela. Conforme descrito por LOUREIRO *et al.* (2002) e NAKAMURA (2003), existem algumas fases ou alguns procedimentos para constituir o ciclo de vida de uma rede de sensores sem fio, que são: configuração (estabelecimento), manutenção, sensoriamento, processamento e comunicação. São fases que podem ser executadas simultaneamente ou podem ser ativadas durante todo o tempo de vida da rede. Cada uma dessas fases tem uma função crucial para a sobrevivência e o funcionamento da rede. Para melhor visualizar o envolvimento e as ligações entre as fases, um fluxograma é apresentado na Figura 4.

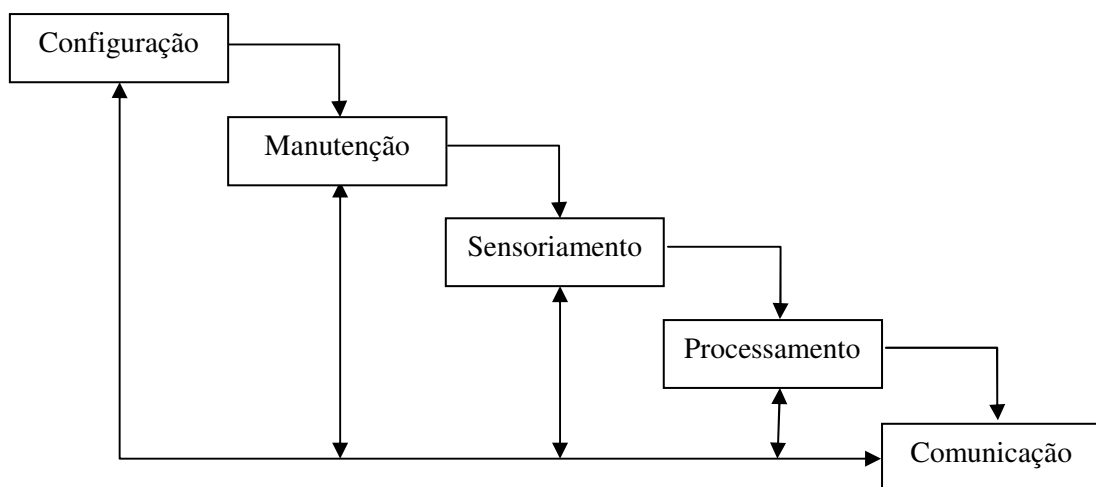


Figura 4 - Fases do tempo de vida da rede, baseado em LOUREIRO *et al.* (2002).

A fase de **configuração** da rede é identificada a partir do momento que os nós são estabelecidos na área que se pretende monitorar (podendo ser sensores homogêneos – onde todos são iguais; ou heterogêneos – onde os mesmos podem ser diferentes). Essa configuração procura fazer com que a rede cubra (monitore) todos os pontos de demanda do ambiente. Pode ocorrer de mais de um nó sensor cobrir a mesma área que outro nós sensor já esteja cobrindo.

A **manutenção** da rede é a fase que possibilita que ela fique ativa e operante durante todo o seu tempo de vida, alimentando o sensor e fornecendo condições necessárias para o seu funcionamento. Essa fase é responsável por fazer, se possível, uma reconexão dos nós, caso ocorram falhas em alguns sensores.

O **sensoriamento** é a fase pela qual se torna possível monitorar o ambiente e observam os possíveis eventos que venham a surgir. O objetivo desta fase é coletar dados que foram extraídos do ambiente monitorado e transmiti-los à uma central base (chamada de sorvedouro ou de estação base). Este sensoriamento pode ser feito de várias maneiras: periodicamente – com intervalos de tempo regulares pré-definidos (essa maneira de sensoriamento pode ser econômica dependendo do espaço de tempo estabelecido e do tempo de vida da rede); continuamente – onde se faz a coleta dos dados a todo o momento durante todo o tempo de vida da rede; reativamente – só é efetuada a coleta dos dados quando se observa algum possível evento no local (é semelhante à forma periodicamente; esta forma de sensoriamento é mais econômico, dependendo do que se está monitorando) e tempo real – onde o objetivo principal é obter volume de informação por períodos de tempo, totalmente voltada a obter o máximo de dados possível do ambiente.

O **processamento** é a fase onde se trabalha com os dados que foram extraídos do ambiente por meio da fase de sensoriamento. Essa fase é responsável por manipular e preparar esses dados para transmiti-los, seja para o sorvedouro ou para o próximo nó sensor vizinho, que por sua vez irá executar os mesmos procedimentos. Podem ser feitos vários processamentos sobre as informações coletadas, como: criptografia – para maior segurança sobre a informação transmitida; compressão – para diminuir o tamanho dos pacotes; e outros. Outros processamentos feitos pelos sensores são com relação a funções específicas de sensoriamento (tais como: processamento de temperatura, umidade e etc.). Todas as outras atividades do nó sensor: a configuração, o sensoriamento, a manutenção e a comunicação utilizam a fase de processamento.

A fase de **comunicação** do sensor tem algumas semelhanças com a de sensoriamento, com a diferença de que, ao invés de extrair os dados do ambiente, ela transmite-os a outros sensores. A transmissão para outros sensores pode ser feita de várias maneiras: intervalos programados – onde os dados são enviados ao próximo nó da rede de tempos em tempos; dados disseminados continuamente – as informações são transmitidas sem intervalos; sob demanda – quando os nós enviam informações uma vez que lhe é solicitado; e dirigida a evento ou orientada a evento – a informação só é enviada quando algum evento é detectado.

A Figura 5 mostra uma tabela com uma classificação dos tipos de sensores, seu ano de criação e várias informações como: processador, tipo do rádio de comunicação, memória e a sua interface, segundo SENSORS (2010).

Na Figura 6 é ilustrado o nó sensor MICA2, que está catalogado na terceira posição dentre os item exibidos na Figura 5 cujas características são consideradas nas simulações deste trabalho. Esse nó sensor foi desenvolvido pela Universidade de Berkeley onde também foram desenvolvidos outros sensores da mesma família.

Platform	Year	Microcontroller	Radio	Flash	Sensor Interface
Rene2	2000	Atmel Atmega163, 8 KB prog, 1 KB RAM	RFM TR1000, 916 MHz, ASK, 40 Kbps, GPIO	24LC256, 32 KB, EEPROM, I ² C	51-pin Expansion; UART, I ² C, SPI, GPIO
Mica	2001	Atmel Atmega128, 128 KB Prog, 4 KB RAM	RFM TR1000, 916 MHz, ASK, 40 Kbps, UART	AT45DB041B, 512 KB, SPI	same
Mica2	2002	Atmega128	ChipCon CC1000, 916 MHz, FSK, 38 Kbps, SPI	AT45DB041B	same
MicaZ	2004	Atmega128	ChipCon CC2420, 2.4 GHz, QPSK, 250 Kbps, SPI	AT45DB041B	same
iMOTE	2004	Zeevo ZV4002 with ARM 7, 64 KB SRAM, 512 KB Flash	ZV4002, Bluetooth		
BTnode	2004	Atmega128	CC1000 & ZV4002, Bluetooth	SST39	
TelosB	2004	TI MSP 430, 60 KB program, 10 KB RAM	ChipCon CC2420	STM25P	10-pin header; Integrated temperature, light, and humidity
EyesIFX	2005	TI MSP 430	Infineon TDA5250	AT45DB041B	
Fleck	2005	Atmega128	Nordic nRF903, 433 MHz, GFSK, 76 Kbps,	512 KB	31-pin
Schockfish	2006	TI MSP430	Xemics XE1205 868 MHz 153 kbps	512 KB Flash	30-pin Molex
Mote2	2006	Intel PXA271, 256 KB SRAM, 32 MB DRAM	ChipCon CC2420	Intel Strata, 32 MB direct	31+21-pin top; UART, SPI, I ² C, SDIO; 40+20-pin bottom; GPIO, USB, JTAG, MSL, CIF

> **FIGURE 1.** Comparison of TinyOS platforms

Figura 5 - Comparação entre plataformas dos sensores sem fio. Fonte: SENSORS (2010)

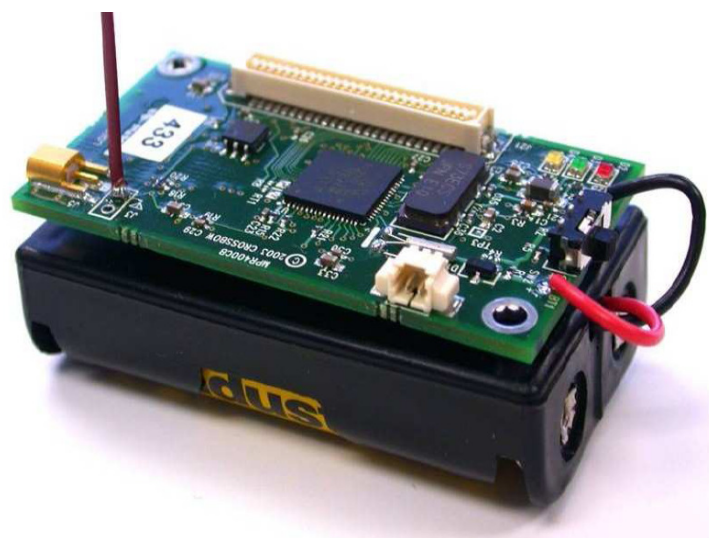


Figura 6 - Nó sensor MICA2. Fonte: ROCA (2007).

2.4 Energia Consumida por um Nó Sensor

O consumo de energia de uma rede de sensores sem fio (RSSF) tem sido uma das grandes limitações para utilizações destas redes. Esses dispositivos sem fio (sensores) têm uma carga de bateria limitada e podem ser distribuídos em áreas remotas ou até inacessíveis. Uma vez lançados no ambiente a ser monitorado, a troca de suas baterias ou a manutenção nos mesmos torna-se inviável, conforme descrito em TAVARES (2002) e LOUREIRO (2002). Devido a energia dos sensores ser limitada, os nós sensores colaboram entre si para transportar os dados extraídos do ambiente, para que isso não seja uma atividade exaustiva para os sensores. Esses dados, também chamados de pacotes, precisam ser levados à base sorvedouro para que sejam processados e analisados. Segundo REZENDE (2004), a fase de comunicação é a atividade mais custosa em uma rede de sensores sem fio, sendo o principal consumidor de energia se comparada a todas as outras fases. Assim a comunicação necessita de um cuidado especial e um gerenciamento cuidadoso para não haver gasto de energia desnecessário durante a atividade da rede.

Todas as fases necessárias para a existência e o funcionamento de uma rede de sensores sem fio requerem um consumo de energia, pelo menor que seja; sendo assim, torna-se necessária uma otimização sobre a rede de forma a consumir o mínimo de energia possível, garantindo que a mesma continue funcionando sem perda da qualidade e do desempenho.

Na fase de comunicação, as atividades que fazem com que os nós sensores consumam energia são: ativação (quando o nó é ligado, uma vez que se encontrava desligado), recepção (quando o nó recebe um pacote de dados), manutenção (quando o nó se encontra ativo na rede) e transmissão (quando o nó envia um pacote de dados). Cada uma dessas funcionalidades características de um nó sensor consome uma quantidade de energia para ser executada.

Conforme relatado em NAKAMURA (2003), os gastos apresentados na fase de comunicação são divididos em apenas três, sendo eles: raio, dispositivo e processador.

O **raio** no geral, ele é o que mais consome energia de um nó sensor em uma rede. O raio de transmissão pode ser de vários tipos, dependendo do sensor que se está utilizando, podendo ser de: radiofrequência, micro-ondas, infravermelho e laser (para espaços livres de obstáculos), conforme UTZIG (2007). A Tabela 1 mostra

algumas referências de consumo de energia de um nó sensor CC1000 da Chipcon na frequência de 868MHz. A corrente consumida em cada atividade executada pelo sensor é exibida na tabela. Especificamente nesta tabela, a energia gasta na transmissão corresponde a uma transmissão feita com a potência máxima do dispositivo CC1000 da Chipcon, que é de 5dBm. Esse valor de energia gasta na transmissão pode variar dependendo da distância.

Tabela 1 - Consumo de corrente do Rádio CC1000 da Chipcon na frequência de 868MHz. Fonte: NAKAMURA (2003).

Operação	Corrente (mA)
Transmissão	25,4
Recepção	12,5
Dormindo	0.001

Os **dispositivos** são os sensores responsáveis pelo monitoramento dos ambientes. Eles podem monitorar várias ações sobre o ambiente, como citado anteriormente. A Tabela 2 a seguir mostra uma listagem de vários tipos de dispositivos sensores, o consumo de corrente de energia dos mesmos e a sua precisão, conforme apresentado em HOLLAR (1996) e NAKAMURA (2003).

Tabela 2 - Tipos de Dispositivos sensores. Fonte: NAKAMURA (2003).

Sensor	Corrente	Precisão
Magnetômetro	650 μ A	2mGauss
Acelerômetro	650 μ A	25mg
Luz	200 μ A	6mW/m ²
Temperatura	600 μ A	0,25°C
Pressão	650 μ A	2,4mPSI
Umidade Relativa	200 μ A	+/- 2%UR

O **processador** possui recursos bem limitados, devido a sua estrutura física e a necessidade de economizar energia. Os processamentos que são feitos em um nó sensor não podem ser muito complexos e nem dispendiosos de muitos recursos, pois deve-se considerar que, quanto mais processamento um nó sensor for obrigado a fazer, mais energia o mesmo irá consumir. A Tabela 3 a seguir mostra a energia

gasta em algumas funcionalidades de um processador Atmel ATmega 128L utilizado em sensores sem fio, conforme PROCESSADOR ATMEL (2001).

Tabela 3 – Capacidade e Consumo de energia do Processador Atmel ATmega 128L. Fonte: NAKAMURA (2003).

Memória Flash de Programação	128K bytes
EEPROM de Configuração	4K bytes
Corrente no Modo Ativo	8 mA
Corrente no Modo Dormindo	< 15 μ A

2.5 Cobertura do Sensor Sem Fio

A cobertura de uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) é uma das características mais importantes entre as atividades exercidas pela mesma. Cada nó sensor tem a função de monitorar uma área do ambiente (como visto anteriormente), essa área monitorada é o espaço que está envolto ao nó sensor. Esse espaço pode ser maior ou menor, dependendo da potência de alcance do raio do sensor.

O sensor possui dois raios com alcances diferentes: o primeiro é o Raio de Cobertura (R_C), associado a capacidade do sensor de se comunicar com os outros sensores que estejam em sua vizinhança (ao seu alcance), dentro da circunferência monitorado pelo mesmo. O outro raio é o Raio de Sensoriamento (R_S) – que está relacionado a atividade de monitoramento do ambiente. Ele tem a função de sondar ou escutar tudo que esteja dentro de sua circunferência para detectar possíveis eventos, conforme HUANG e TSENG (2003).

Para considerar que um ambiente monitorado foi todo coberto, é necessário que toda a sua área esteja dentro dos limites do R_S de pelo menos x nó sensor ativo e operante na rede. Quanto maior for a quantidade x de sensores para cobrir uma determinada área, maior será a densidade de cobertura sobre a mesma.

A Figura 7 ilustra os dois raios existentes em um dispositivo sensor. No centro dos raios encontram-se dispositivos sensores e, ao seu redor, são exibidos seus dois raios, o R_C e o R_S . O alcance de cada um desses raios é demarcado a partir do dispositivo sensor, que está ao centro.

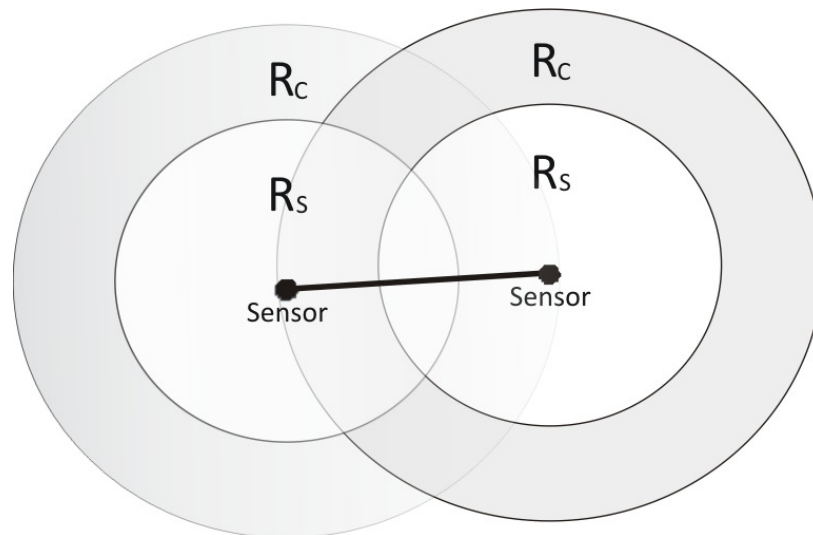


Figura 7 - Raios R_C e R_S de um nó sensor, baseado em MARTINS (2009).

2.6 Conexão em RSSF

A restrição de conectividade de uma RSSF procura garantir que existirá um caminho conexo (sem interrupção) por onde os pacotes de dados irão passar, até chegar ao destino final, que é uma estação base ou sorvedouro.

A conexão precisa ser garantida de tal forma que esse caminho não seja interrompido por alguma falha em um nó sensor que seja responsável pela transmissão das informações dos outros nós sensores que se ligaram a ele. Caso alguma dessas falhas aconteça, o caminho deve ser reconfigurado para que esse caminho não seja interrompido, fazendo com que a conectividade entre os nós sensores seja violada.

Para fazer a conexão da rede é preciso primeiro determinar a vizinhança dos nós sensores. É preciso analisar quais são os sensores que estão dentro do R_C de cada sensor analisado, dessa forma, todos os sensores que tiveram a uma distância menor que o R_C do sensor analisado pode ser considerado como vizinho deste sensor. A partir desta vizinhança é que se torna possível estabelecer a conexão entre os nós sensores.

A Figura 8 mostra uma análise feita para determinar a vizinhança de um nó sensor. Os nós que fazem parte da vizinhança do sensor analisado são representados por uma pequena circunferência preenchida de cor preta. O círculo externo representa os limites impostos pelo R_C do nó sensor que está no centro; todos os nós que estiverem dentro do R_C do nó central pertencem à sua vizinhança. Por outro lado,

as pequenas circunferências sem preenchimento representam os nós que não fazem parte da vizinhança do nó central, pois estão fora do círculo R_C . A conexão é feita somente entre os nós ativos que são vizinhos ao nó central analisado.

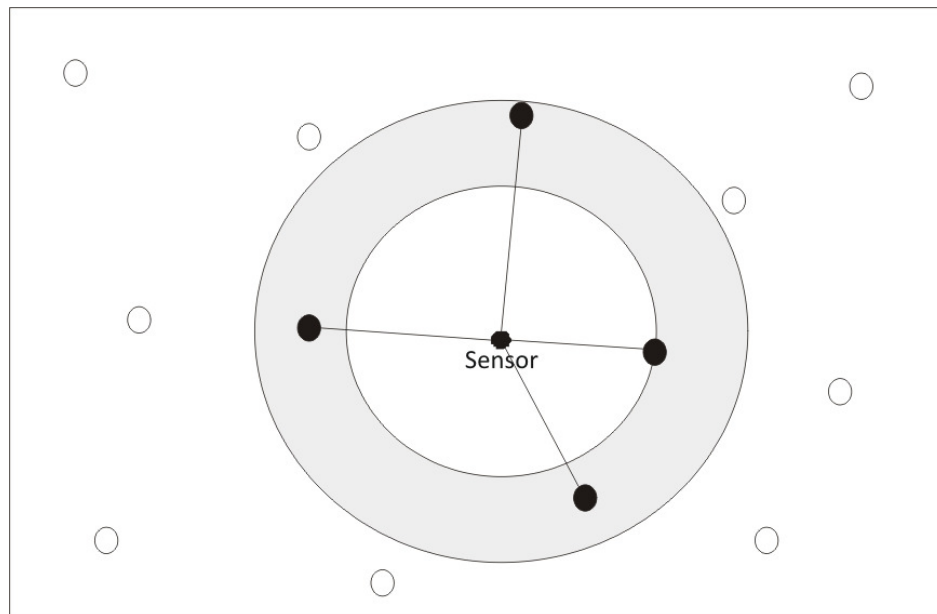


Figura 8 - Conexão entre os nós que estão dentro do limite do R_C .

É preciso estabelecer a conexão entre os nós sensores que fazem parte da vizinhança do nó central analisado e estabelecer um caminho que leve ao sorvedouro. Para isso, é preciso primeiro escolher um sensor na vizinhança para ser o próximo nó analisado. Posteriormente, outro nó será escolhido dentre aqueles da vizinhança do novo nó sensor escolhido. Seguindo esse procedimento, será possível estabelecer um caminho de ligação do primeiro nós sensor analisado ao último, sempre estabelecendo uma conexão com a vizinhança do nó sensor analisado.

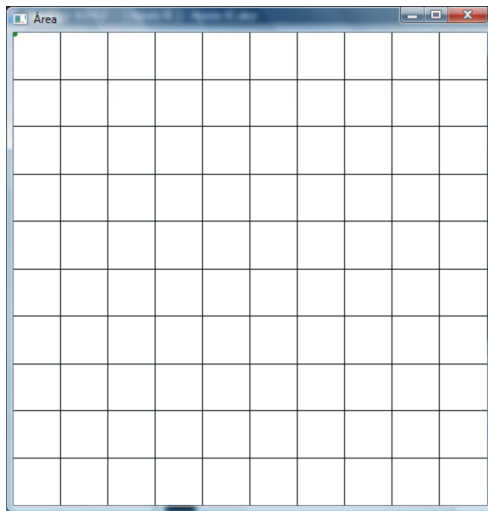
3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E MODELO

O problema de cobertura, conectividade e roteamento em RSSF é muito desafiador devido os recursos limitados disponíveis pelos sensores e as divergências que se encontram entre os objetivos a serem alcançados. É preciso cobrir uma área utilizando uma configuração da rede de forma a garantir que os nós continuem conectados, para que possa haver um roteamento entre os mesmo. Este trabalho abordar este desafio propondo a utilização de uma metaheurística para garantir que os objetivos sejam alcançados, com isso, procurando maximizar o tempo de vida da rede.

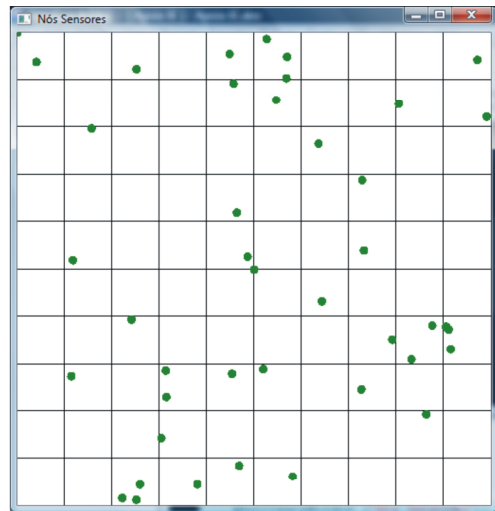
3.1 Definição do Problema

Formalmente este problema pode ser definido como: *Dada uma área de monitoramento A , um conjunto de nós sensores S , um conjunto de nós sorvedouro M , um conjunto de pontos de demanda D e T períodos de tempo. O objetivo é garantir que cada ponto de demanda $d \in D$, que são distribuídos sobre a área de monitoramento A , sejam cobertos por pelo menos m nós sensores ativos $s \in S$ e que exista um caminho entre esses nós ativos $s \in S$ e um sorvedouro $m \in M$ durante cara período de tempo $t \in T$.*

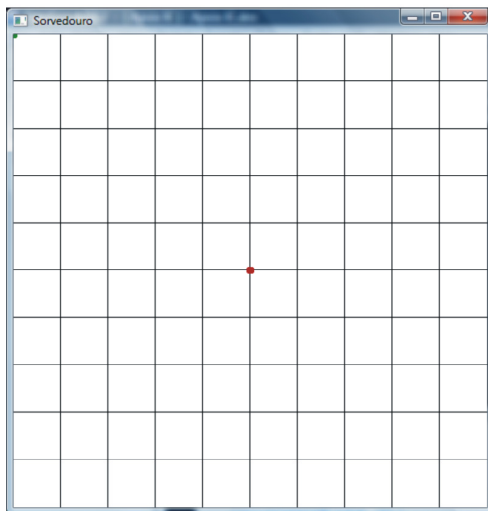
Para ilustrar graficamente a definição formal deste problema, a Figura 9 (dividida em 6 ilustrações de (a) a (f)) mostra cada elemento do problema da seguinte forma: a ilustração (a) representa uma área a ser monitorada; a ilustração (b) mostra os sensores distribuídos de forma aleatória sobre a área; a ilustração (c) mostra um nó sorvedouro no centro da área; a ilustração (d) exhibe os pontos de demanda que precisam ser cobertos por pelo menos m nós sensores; a ilustração (e) mostra uma configuração para a rede que abrange o primeiro e o segundo períodos; e a ilustração (f) exhibe nova configuração para a mesma rede, mas com abrangência para o terceiro e o quarto período. Durante as configurações feitas na rede, alguns nós podem estar ativos (participantes do roteamento) e outros nós podem estar desativados (fora do roteamento da rede).



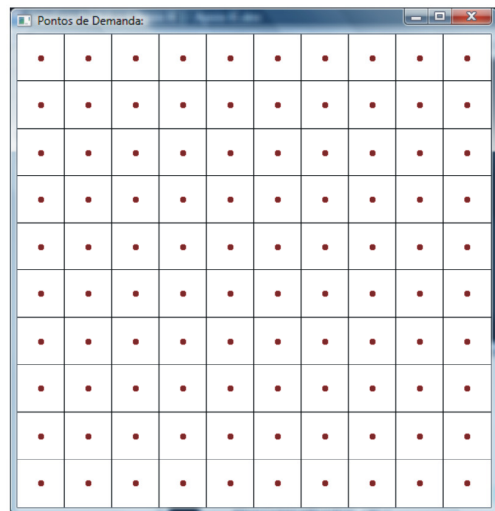
(a) Área de monitoramento.



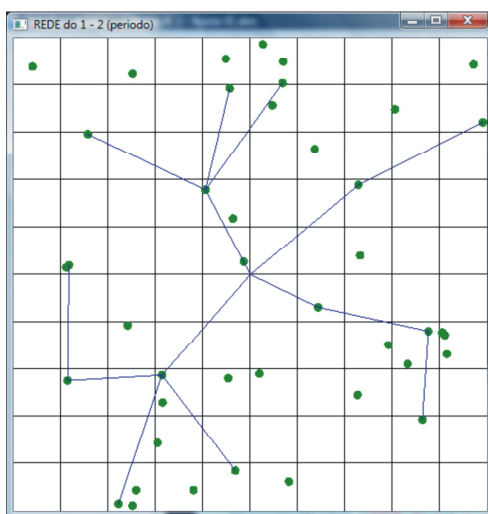
(b) Conjunto de nós sensores.



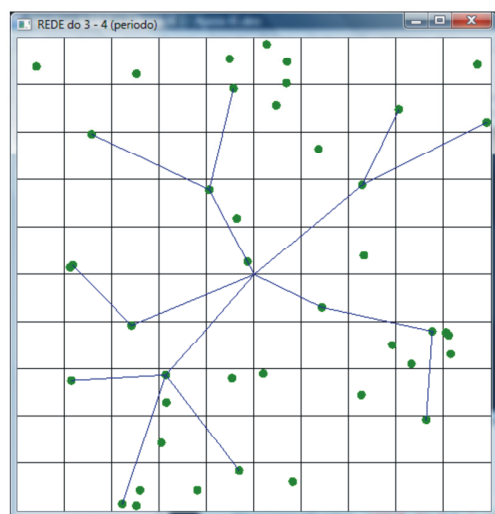
(c) Nó sorvedouro.



(d) Pontos de demanda.



(e) Configuração da rede para o 1º e 2º período.



(f) Configuração da rede para o 3º e 4º período.

Figura 9 - Definição gráfica do problema.

Esse problema foi proposto por NAKAMURA (2003) como o “Problema Dinâmico de Cobertura e Conectividade (PDCC)”, que utilizou modelos de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) que resolve este problema de forma ótima.

3.2 Modelo Matemático

O modelo matemático do Problema Dinâmico de Cobertura e Conectividade (PDCC) foi proposto por NAKAMURA (2003) considerando que os raios de comunicação dos nós sensores são fixos durante toda a sua existência. Da mesma forma, a localização dos sensores é fixa e se encontram em um endereço único.

O modelo considera que os nós que estiverem ativos na rede irão consumir energia, denominada como energia de manutenção, que envolve o sensoriamento feito, a escuta do canal de comunicação e o processamento que o mesmo realiza. Os outros tipos de consumo de energia feito pelos sensores são: ativação, transmissão e recepção de pacotes. Esses consumos são tratados individualmente no modelo para casa sensor.

O modelo proposto por NAKAMURA (2003) é apresentado a seguir. As seguintes notações são usadas:

S é conjunto de nós sensores,

D é conjunto de pontos de demanda,

M é conjunto de nós sorvedouro,

T é número de períodos,

A^d é conjunto de arcos que conectam nós sensores e pontos de demanda,

A^s é conjunto de arcos que conectam os nós sensores entre si,

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

$E^d(A)$ é conjunto de arcos que entram (chegam) no ponto de demanda $d \in D$ e que pertence ao conjunto A ,

$E^s(A)$ é conjunto de arcos que entram (chegam) no nó sensor $s \in S$ e que pertence ao conjunto A ,

$S^s(A)$ é conjunto de arcos que saem do nó sensor $s \in S$ e que pertence ao conjunto A ,

m é a precisão na cobertura que indica o número mínimo de nós sensores que devem cobrir um ponto de demanda,

EB é a capacidade da bateria do nó, representa a quantidade de energia armazenada na bateria,

EA é a energia de ativação do nó, representa o custo de energia na transição do estado inativo para o estado ativo,

EM é a energia de manutenção do nó em cada período, representa o consumo de energia do nó com sensoriamento, processamento e escuta do canal em cada intervalo de tempo T,

ET é a energia consumida pelo nó para transmissão dos pacotes gerados por um nó fonte em cada período,

ER é a energia consumida pelo nó com a recepção dos pacotes gerados por um nó fonte em cada período,

EH é o custo de energia pela não cobertura de um ponto de demanda que simboliza uma penalidade pela falha de cobertura.

As variáveis do modelo são:

x_{ij}^t - variável que indica se o nó sensor i cobre o ponto de demanda j no período de tempo t ,

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

w_i^t - variável de decisão que possui valor 1 se o nó i foi ativado no período de tempo t e valor 0 caso contrário,

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

h_j^t - variável que indica a não cobertura do ponto de demanda j no período de tempo t , sendo falha de cobertura no ponto de demanda j ,

e_i - variável que indica o consumo de energia do nó i durante todo o tempo de vida da rede, durante todos os períodos de tempo $\in T$,

A função objetivo procura minimizar o consumo de energia de toda a rede dividindo-a em períodos, que somados, representam o tempo de vida da mesma, procurando garantir a cobertura dos pontos de demanda durante todos os períodos de tempo.

A função objetivo do modelo:

$$\min \sum_{i \in S} e_i + \sum_{j \in D} \sum_{t \in T} EH_j^t \times h_j^t \quad 3.1$$

Restrição que garante a cobertura dos pontos de demanda:

$$\sum_{ij \in E_j^d(A^d)} x_{ij}^t + h_j^t \geq m, \forall j \in D, \forall t \in T \quad 3.2$$

$$x_{ij}^t \leq y_i^t, \forall i \in S, \forall ij \in A^d, \forall t \in T \quad 3.3$$

$$0 \leq x_{ij}^t \leq 1, \forall ij \in A^d, \forall t \in T \quad 3.4$$

$$h_j^t \geq 0, \forall j \in D, \forall t \in T \quad 3.5$$

Restrição de conectividade entre os nós sensores:

$$\sum_{ij \in E_j^s(A^s)} z_{lij}^t - \sum_{jk \in S_j^s(A^s \cup A^m)} z_{ljk}^t = 0, \forall j \in (S \cup M - l), \forall l \in S, \forall t \in T \quad 3.6$$

$$- \sum_{jk \in S_j^s(A^s \cup A^m)} z_{ljk}^t = -y_l^t, j = l, \forall l \in S, \forall t \in T \quad 3.7$$

$$z_{lij}^t \leq y_i^t, \forall i \in S, \forall l \in (S - j), \forall ij \in (A^s \cup A^m), \forall t \in T \quad 3.8$$

$$z_{lij}^t \leq y_j^t, \forall j \in S, \forall l \in (S - j), \forall ij \in (A^s \cup A^m), \forall t \in T \quad 3.9$$

Restrição de energia dos nós sensores:

$$\sum_{i \in T} (EM_i \times y_i^t + EA_i \times w_i^t) + \sum_{i \in T} (\sum_{l \in (S-i)} \sum_{ki \in E_i^s(A^s \cup A^m)} ER_i \times z_{lki}^t) + \quad 3.10$$

$$\sum_{i \in T} (\sum_{l \in S} \sum_{ij \in S_i^s(A^s \cup A^m)} ET_{ij} \times z_{lij}^t) \leq e_i, \forall i \in S$$

$$e_i \leq EB_i, \forall i \in S \quad 3.11$$

$$e_i \geq 0, \forall i \in S \quad 3.12$$

$$w_i^0 - y_i^0 \geq 0, \forall i \in S \quad 3.13$$

$$w_i^t - y_i^t + y_i^{t-1} \geq 0, \forall i \in S, \forall t \in T, t > 0 \quad 3.14$$

$$y, z, w \in \{0,1\} \quad 3.15$$

$$x, h, e \in \mathfrak{R} \quad 3.16$$

A **função objetivo** (3.1) é responsável por minimizar o consumo de energia de cada nó ativo na rede durante todo o tempo de vida da mesma (se o nó não estiver ativo o mesmo não consumirá energia). A energia consumida é somada ao acúmulo da energia da penalidade pela falha de cobertura dos pontos de demanda em cada período de tempo $t \in T$. Caso exista um ponto de demanda que não está sendo coberto em algum período de tempo, será contabilizada a energia de penalidade pela não cobertura do mesmo.

A função objetivo do modelo está sujeita a várias restrições, são elas: a cobertura dos pontos de demanda, a conectividade entre os sensores, o consumo de energia, a ativação dos nós e os tipos das variáveis. Conforme modelo apresentado, cada restrição será comentada em sequência.

As restrições de **cobertura dos pontos de demanda** (3.2) tem como base a variável x_{ij}^t que indica que o nó i cobre o ponto de demanda j em um tempo t , somado com a variável h_j^t que indica se esse nó está coberto ou não nesse período de tempo. Esse valor deve ser maior ou igual ao m , que é a quantidade mínima de nós sensores que devem cobrir um ponto de demanda. As restrições (3.3), (3.4) e (3.5) reforçam e completam a cobertura dos pontos de demanda, garantindo que um sensor só deve cobrir um ponto de demanda que esteja no seu raio de sensoriamento (R_S) e para cobrir um ponto de demanda, obrigatoriamente o sensor deve estar ativo na rede durante o período de tempo corrente.

Outra restrição do modelo refere-se à conectividade entre os nós sensores, onde, para um nó sensor fazer o sensoriamento dos pontos de demanda, é necessário que exista uma rota que o ligue a um nó sorvedouro.

As restrições de **conectividade** (3.6) são propostas para juntamente com (3.7), (3.8) e (3.9) garantir a conectividade entre os nós sensores da rede. Dessa forma é possível garantir que a ligação entre os sensores ij serve de caminho de ligação entre o nó l e um sorvedouro em cada período de tempo, pois, a quantidade de arco de ligação que chega ao nó i da primeira variável é igual à quantidade de arcos de ligação que sai do j da segunda variável. As restrições (3.7) garantem que o arco de ligação jk é um caminho entre o l e um sorvedouro (onde l é igual a j), dessa forma, o nó j precisa ser igual à variável y_l^t nesse período, garantindo que o nó esteja ativo. Com as restrições (3.8) e (3.9) se completa a parte de conectividade entre os nós

sensores proposta pelo modelo que garante que todos os arcos de ligação não irão formar ciclos e só existirá uma rota que ligue um nó sensor ao sorvedouro.

A parte do consumo de energia procura garantir que os sensores só poderão estar ativos para exercer suas atividades na rede se eles possuírem energia residual suficiente para tal atividade.

As restrições de **energia** (3.10) contabilizam toda a energia consumida pelos nós sensores durante todos os períodos de tempo $t \in T$ da rede. A variável EM (energia de manutenção) é multiplicada pela variável de decisão y_i^t (que informa quando o nó está: 1 – ativo ou 0 – desativo), dessa forma, o primeiro cálculo de consumo de energias é feito para obter a energia gasta na manutenção do nó sensor i em cada período de tempo. O cálculo da energia de ativação é feito através da variável de decisão w_i^t (que diz se o nó sensor se encontrava: 1 – desligado e foi ativado para operar nesse período ou 0 – não foi ativado para este período) multiplicada pela variável EA (energia de ativação), dessa forma, se o nó foi ativado para entrar em atividade nesse período, o valor de ativação será calculado. A energia de recepção do nó sensor é obtida através do calculo feito entre a variável de decisão z_{lki}^t (que indica todos os arcos de ligação que chega ao nó sensor i) multiplicada pela variável ER (energia de recepção pacotes). Por último é calculada a energia de transmissão, onde a variável de decisão z_{lij}^t (que é responsável por conter todos os arcos que entram no nó sensor i) é multiplicada pela variável ET (energia de transmissão de pacote).

As restrições (3.11) e (3.12) complementam a parte de consumo de energia mostrando os limites da bateria, garantindo que: a energia consumida pelo nó sensor i tem que ser menor que a variável EB (capacidade da bateria), e que essa energia não pode ficar abaixo de zero.

As restrições (3.13) e (3.14) indicam em quais períodos de tempo os nós sensores foram ativados.

A definição do tipo das variáveis é realizada nas restrições (3.15) e (3.16), onde mostram quais variáveis serão binárias e quais variáveis são pertencentes aos PLIM.

4 ILS (Iterated Local Search)

O *Iterated Local Search* (ILS) é uma metaheurística que foi proposta por LOURENÇO *et al.* (2002). Conforme BLUM e ROLI (2001), o ILS está entre uma das metaheurísticas mais generalizadas de todas devido a sua estrutura. Esta é uma metaheurística simples, mas com um eficiente algoritmo.

Sua filosofia se baseia em aplicar uma Busca Local (BL) sobre uma solução inicial com o objetivo de encontrar um resultado que seja considerado como um ótimo local (quando esta solução estabiliza); posteriormente é feita uma perturbação sobre esta solução que está estagnada em um ótimo local e aplica-se novamente a BL. Esta perturbação deve ser bem planejada pois:

- a perturbação não pode ser de **baixa intensidade**, ou seja, não pode ser uma mudança insignificante para a solução, pois, após aplicar a BL a solução não conseguirá sair do seu ótimo local, mesmo que a solução gerada seja diferente. Após aplicar a BL ela retornará ao mesmo ótimo local que estava anteriormente.
- a perturbação não pode ser de **grande intensidade**, pois isso pode fazer com que a solução sofra um reinício aleatório forçado, dessa forma o algoritmo estaria se comportando como um algoritmo aleatório, segundo BLUM e ROLI (2001).

A Figura 10 irá demonstrar um pseudocódigo do funcionamento da metaheurística ILS.

A metaheurística inicia-se com a geração de uma solução (podendo ser aleatória ou totalmente gulosa), que está sendo representada pela letra s , essa solução é construída levando em consideração todos os parâmetros, estruturas e restrições do problema a que estiver sendo abordado. Após obter uma solução inicial s , o próximo passo é a aplicação da BL sobre esta solução s para se obter uma nova solução s^* , que é uma solução que já alcançou ao seu ótimo local (devida a aplicação da BL). É feita a atribuição da solução s para o s^* (linha 3) pois, a solução s^* armazenará a melhor solução que será retornada ao final do algoritmo.

```

Meta-Heurística_ILS ( nILS )
1   s = ObtemSolucaoInicial( );
2   s* = BuscaLocal( s );
3   s = s*;
4   Para i = 1 até nILS faça
5       s1 = Perturbação( s );
6       s2 = BuscaLocal( s1 );
7       Se  $f( s2 ) < f( s^* )$  então
8           s* = s2;
9       s = CritérioAceitação( s2 );
10  Fim para.
11  Retorne s*;
Fim ILS

```

Figura 10 - Algoritmo da metaheurística ILS.

Em continuidade, inicia-se (linha 4) um laço de repetição da metaheurística ILS com uma condição de parada gerenciada por uma variável que indica quantas iterações, (representada pela variável *nILS*). Uma perturbação é aplicada sobre a solução *s* com objetivo de obter uma nova solução *s1*, esta solução é identificada como sendo uma nova solução perturbada. É feita uma nova aplicação da BL sobre o *s1* para se chegar a um novo ótimo local *s2*. Uma verificação da melhor solução encontrada até o momento é feita (linha 7) para identificar se a solução *s2* é melhor que a solução de retorno *s**, caso seja melhor, a solução *s2* é atribuída à solução de retorno *s**.

Quando todos esses passos foram efetuados, inicia-se a parte de aceitação da solução que está em operação dentro do laço da metaheurística. Neste ponto é verificado se a solução *s2* será aceita para servir como base para a próxima iteração do laço da metaheurística ou se continuará a perturbar a partir da solução *s*. Existe uma probabilidade para se aceitar soluções piores. caso seja aceita a solução *s2* (que sofreu a perturbação e a mesma foi melhorada após a BI) a variável *s* receberá essa nova solução *s2* para se tentar encontrar uma melhor solução para a metaheurística ils. caso não seja aceita, a variável *s* continuará sendo submetida à perturbação e BL.

Após completar o ciclo de iterações (*nILS*), o algoritmo para e retorna a solução *s**, que foi a melhor solução encontrada em toda a execução do algoritmo.

Um gráfico com o funcionamento da metaheurística é exibido a seguir na Figura 11, onde se consideram algumas possíveis soluções a serem encontradas pela função objetivo (FO) da solução $f(x)$ do algoritmo.

ILS para o problema de Cobertura, Conectividade e Roteamento em RSSF

```
1 p - quantidade de períodos da rede
2 tHeur - quantidade de vezes que irá repetir a meta-heurística
3  $\alpha$  - o quanto aleatório será uma construção
4 s - solução corrente //configuração da rede para um período
5 s* - melhor solução
6 sP - solução perturbada
7 sB - solução melhorada pela busca local
8 nILS – quantidade de repetições da metaheurística ILS
9
10 Início
11 leituraDeParametros( );
12 while para cada período p do
13     s = construtivaSemiAleatoria(  $\alpha$  );
14     sB = buscaLocal( s );
15     if f( sB ) < f( s ) then
16         s = sB; // atualiza a solução corrente
17     end
18     s* = s; // guarda a melhor solução
19     while nILS do
20         sP = perturbacoes( s );
21         sB = buscaLoca( sP );
22         if f( sB ) < f( s* ) then
23             s* = sB; //atualiza a melhor solução
24         end
25         if f( sB ) < f( s ) then
26             s = sB; //atualiza a solução corrente
27         end
28         else
29             s = criterioAceitacao( sB );
30         end
31     end //Fim do while do ILS
32     guardaConfiguracaoDoPeriodo( s*, p ); //melhor solução e o período
33     p ++; //próximo período
34 end
35 exibiConfiguracaoFinalDaRede( ); //para todos os períodos
36 Fim
```

Figura 12 - Algoritmo do ILS para o problema de Cobertura, Conectividade e Roteamento em RSSF.

O laço de repetição na linha 12 é utilizado para se obter uma configuração da rede para cada período de tempo. Desta forma, a variável p controla estes períodos.

Após a construção de uma solução inicial (linha 13), aplica-se a BL (linha 14) e, em sequência são controladas as iterações do método ILS (linha 19) onde serão aplicadas as perturbações e BL novamente.

Essa implementação está dividida em partes (4.1.1 a 4.1.7), conforme a estrutura da metaheurística, e cada passo será detalhado a seguir.

4.1.1 Fase construtiva

Para aplicar a fase construtiva da metaheurística ILS, assume-se que os nós já estão distribuídos sobre a área a ser monitorada, (endereçados pelas coordenadas X e

Y). Assume-se que todos os nós estão ativos, sem conexão entre si e com a carga total de suas baterias; dessa forma eles poderão ser configurados para entrarem em atividade, conforme ANDRADE (2009).

A fase inicial é responsável por construir uma solução, para que, a partir desta solução, possam-se iniciar os outros passos da metaheurística e assim buscar melhorar esta solução inicial, conforme mostra a Figura 10 na sessão 264.

A construção da solução inicial é iniciada pelo nó sorvedouro. A partir do sorvedouro são escolhidos os outros nós que farão parte do roteamento da rede. A escolha é feita através da aplicação da formula “Função de avaliação” apresentada na sessão 4.1.7 (equação 4.1.3). Com essa formula é feita a análise de todos os nós vizinhos ao sorvedouro para se decidir qual nó fará parte do roteamento da rede e quais nós serão desligados, segundo ANDRADE (2009).

Para determinar se um nó será desligado é preciso verificar a redundância do mesmo com relação a toda a rede; esse valor determina a utilidade, ou melhor, o benefício que cada nó vizinho ao nó analisado (iniciando pelo sorvedouro) traz para a rede. Quanto menor for o valor, menor será a utilidade do nó para a rede; isso significa que, quanto menor for o valor, menor é a área própria de cobertura do nó sensor, ou seja, o nó é muito redundante com relação a toda configuração da rede.

O limite máximo para que um nó seja redundante na rede é determinado pelo β , que varia de $[0 - 1]$, onde 0 significa que o nó não tem nenhum ponto de demanda redundante com nenhum outro sensor em toda a rede e 1 significa que o mesmo é totalmente redundante na rede. Através do β , é limitada a escolha dos nós que darão continuidade à configuração da rede inicial. Se o nó ficar com a sua área redundante com um valor maior ou igual ao permitido pelo β ele é desligado, caso contrario, se essa redundância for menor que o limite, segue a avaliação do nó e a configuração da rede.

A Figura 13 exhibe o algoritmo da fase construtiva da metaheurística ILS, baseado em ANDRADE (2009).

Fase Construtiva

```
1  i - Nó atual; // inicia com o sorvedouro
2  j - Nó vizinho de i (que será analisado);
3  f(j) - Função de avaliação (do vizinho j);
4  i* = Sorvedouro; //1º nó a ser inserido na rede
5  Sol = {}; // solução resultante
6  while Não analisar todos os nós do
7      f(i*) = ∞;
8      i = i*;
9      while Não analisar todos os vizinhos j de i do
10         r = AreaRedundante(j); // redundância do j na rede
11         if (r >= β) then // alcançou o limite máximo de redundância
12             Desliga o nó j;
13         else //marca o j como analisado
14             f(j) = FuncaoAvaliacao(j); // benefício do nó. Equação 4.3.3
15             if f(j) > f(i*) then
16                 c = Circulo(j); // verifica se a rede forma circulo com o j
17                 if c == 0 then // não forma círculo
18                     f(i*) = f(j);
19                     i* = j; // melhor nó a ser inserido na rede
20                 end
21             end
22         end
23     end
24     if(i != i*)
25         Sol = Sol + i*; // insere o i* na configuração da rede
26     else
27         if(i = i* & i != Sorvedouro) then //não encontrou nenhum vizinho para a rede;
28             i = Sol -1; //o nó corrente será o nó anterior ao que esta sendo analisado;
29             Procedimento_da_linha9(i); //passa o nó i (corrente) para ser analisado;
30         end
31     end
32 return Sol // configuração inicial da rede
```

Figura 13 - Algoritmo da construção gulosa.

Como mostra o algoritmo da construção inicial do ILS, iniciando-se do sorvedouro, cada nó é analisado para que se possa determinar quem será seu descendente (filho). O caminho em forma de árvore é construído da base (raiz) para os sensores (folhas), pois todos os nós sensores irão enviar informações para o sorvedouro. Dessa forma, o sorvedouro torna-se o pai de todos os outros nós sensores.

Fazendo uma analogia com relação à paternidade para construção da rede. A rede inicia-se com o sorvedouro sendo o pai; todos os seus vizinhos são possíveis filhos de primeiro grau (os nós que estiverem dentro do R_C do sorvedouro), dentre todos os nós que estão sob o R_C do sorvedouro, é preciso escolher um que será adotado com seu filho. A escolha é feita de forma totalmente gulosa, ou seja, o melhor nó, o que tiver o maior valor da *FunçãoAvaliação* (linha 14) do algoritmo e

não formar círculo na rede (linha 17), será escolhido como sendo o melhor nó vizinho.

Após executar o laço de repetição *while* (linha 9), o algoritmo terá o melhor vizinho a ser inserido como sendo filho do nó sorvedouro. Nesse ponto, a solução resultante é incrementada com o nó escolhido (linha 25) se o i (nó analisado) for diferente do i^* (melhor vizinho). Caso o $i = i^*$ (nó inicial igual ao melhor vizinho) significa que não houve nenhum vizinho a ser adicionado na sequência do caminho. Neste ponto inicia-se o procedimento recursivo para procurar um vizinho a partir do nó corrente anterior a i atual. Volta-se um nível da estrutura de árvore e refaz os procedimentos para tentar encontrar mais um nó sensor a ser incrementado à rede (linha 6).

Todos os vizinhos do nó (corrente) são analisados, podendo desligar alguns que ultrapassem o limite imposto pelo β , e os que não forem desligados serão avaliados e, dentre eles, será escolhido o melhor nó a ser adotado como filho do nó atual (corrente). Dessa forma prossegue o algoritmo até que todos os nós tenham sido analisados.

É ilustrado graficamente na Figura 14, o exemplo de uma rede com 20 nós sensores, onde é aplicado o algoritmo de construção gulosa mostrado acima. É exibida uma sequência dos passos executados na fase de construção gulosa. O círculo que está envolto de cada nó sensor analisado representa seu R_C , responsável por delimitar a comunicação com os nós sensores existentes na área de monitoramento.

A configuração da solução inicial começa tendo o nó sorvedouro como nó atual e segue escolhendo um filho entre seus vizinhos. Esta escolha é exibida passo a passo (linha 6 do algoritmo). Dessa forma, a cada vez que o laço de repetição da linha 6 terminar, já é possível identificar o nó escolhido que será incrementado à configuração da rede, que está em formação.

Quando não se é possível encontrar mais nenhum nó a ser incluso na rede, o algoritmo termina, tendo como resultado uma configuração da rede.

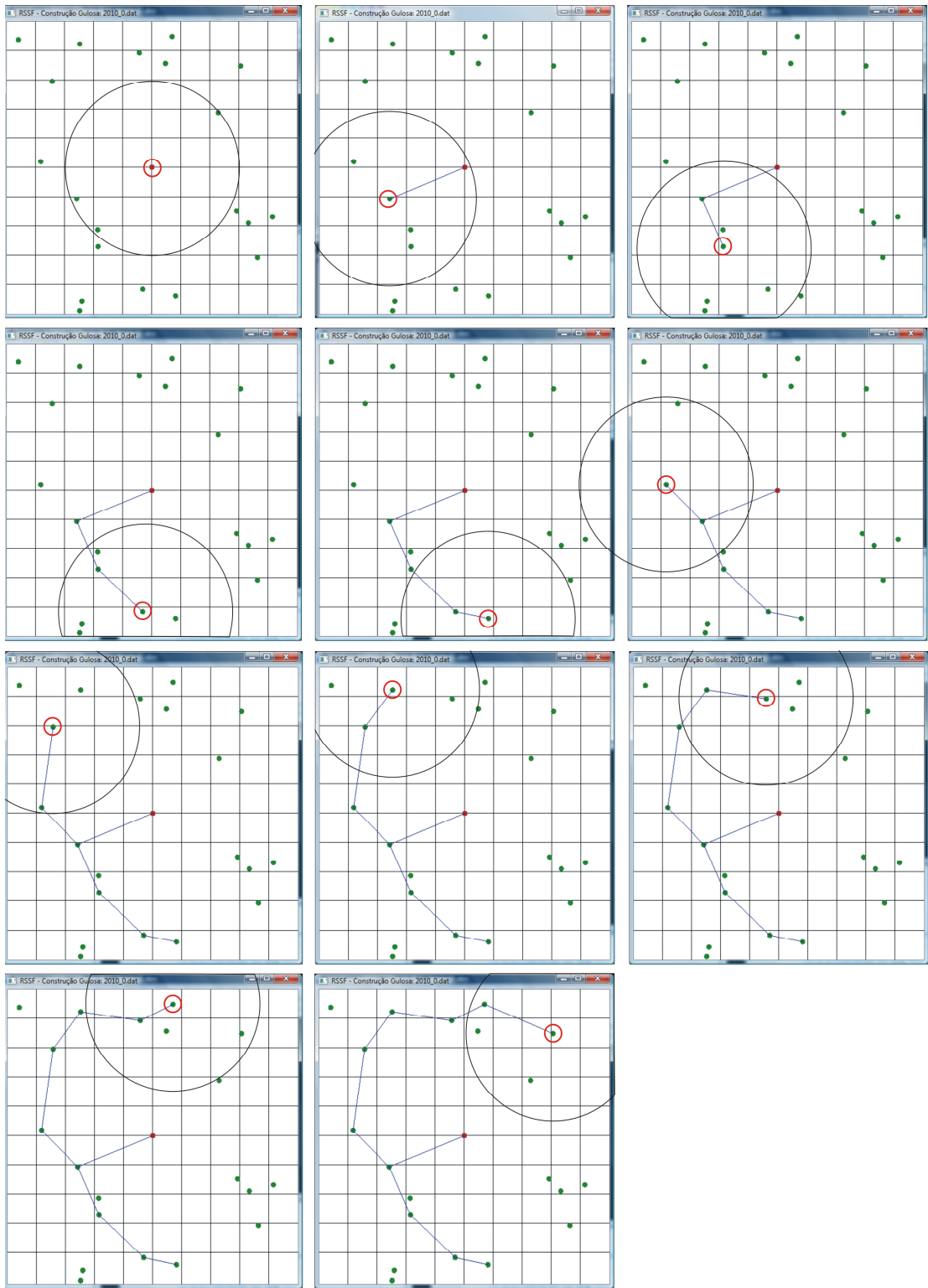


Figura 14 - Gráfico da construção gulosa com 20 nós sensores.

4.1.2 Função de avaliação da Fase construtiva

A função que é utilizada na fase construtiva é a função de avaliação. Esta função é usada para que o ILS possa, a partir desta solução inicial, executar os procedimentos padrões da metaheurística ILS.

Para que a metaheurística possa utilizar a função objetivo que será apresentada na equação 4.1.7, é necessário que se tenha uma configuração de rede a ser avaliada. A solução inicial é construída a partir do nó sorvedouro. A vizinhança do nó é avaliada pela *função de avaliação* onde é escolhido o melhor vizinho dentre todos, a partir deste novo nó escolhido, é feita uma nova avaliação dentre sua vizinhança. Esse procedimento é seguido a cada nova escolha, fazendo uso da *função de avaliação*, que será exibida a seguir.

Modelo da **Função de avaliação**, baseado em ANDRADE (2009):

P_A^t é a porcentagem da *área própria de cobertura** do sensor analisado no período $t \in T$ com relação a toda área coberta por este.

P_{EB}^t é a porcentagem de energia residual do sensor analisado no período $t \in T$ em relação à capacidade total da bateria do dispositivo

Função de avaliação:

$$\min \frac{P_A^t}{P_{EB}^t} \quad 4.3.1$$

* A área de cobertura pode ser denominada como sendo, todos os pontos de demanda que são cobertos pelo nó analisado e a *área própria de cobertura* são os pontos de demanda que o nó sensor analisado cobre e que mais nenhum outro nó ativo até o momento os cubram também; esses pontos de demanda são cobertos exclusivamente pelo nó sensor que está sendo analisado.

4.1.3 Busca Local

A busca local (BL) é um algoritmo que tem a função de melhorar uma solução existente fazendo movimento entre soluções de sua vizinhança; muito utilizado em problemas de otimização. Ela procura encontrar o melhor estado para o problema de acordo com uma função objetivo, segundo RUSSEL e NORVING, (2007).

Os possíveis estados que uma solução pode se encontrar ao se aplicar uma BL são representados por: solução corrente, máximo local, mínimo local,

máximo global e mínimo global. A BL encontra um resultado que se caracteriza como sendo o valor ótimo para a região onde a solução se encontra, com relação a todos seus vizinhos. Estes resultado encontrado pela BL pode até ser o valor ótimo de todo o problema, mas não se tem garantia disso; esse valor é denominado ótimo local.

Um exemplo gráfico da aplicação da BL para um problema de maximização é exibido na Figura 15.

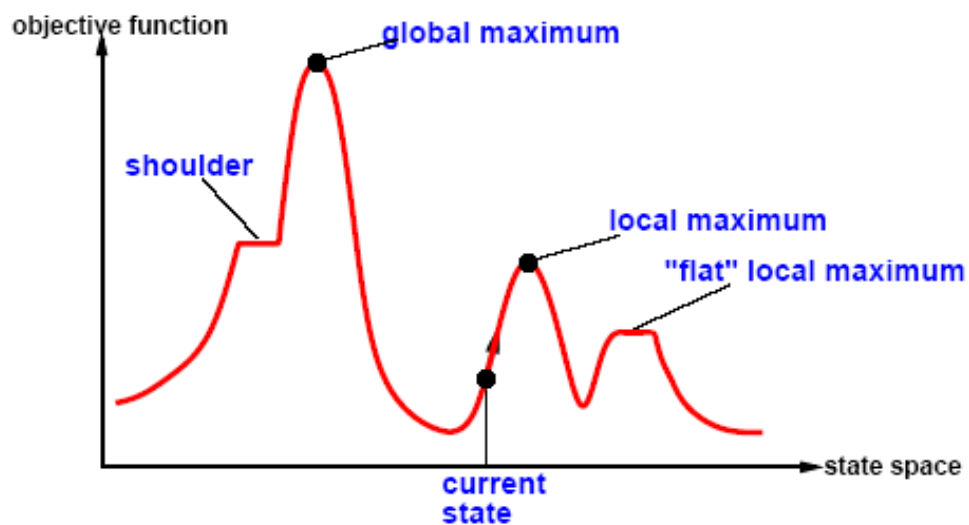


Figura 15 - Estados de uma busca local. Fonte: RUSSEL e NORVING (2007).

A BL aplicada na metaheurística ILS é executada inicialmente sobre a construção gulosa que foi encontrada conforme mostrado na sessão 4.1.1.

Como se está trabalhando em uma estrutura em formato de árvore, os movimentos que serão feitos pela BL não podem ferir as regras desta estrutura. Devido a essa particularidade, a BL é aplicada em três passos, da seguinte forma: inserção de um nó na árvore, reconexão entre os nós na área perturbada (nós que estiverem dentro do R_C do nó inserido) e remoção dos nós que se tornaram inúteis para a árvore, segundo ANDRADE (2009).

Um pseudocódigo da Busca Local é exibido na Figura 16.

Busca Local

```
maxBL //número máximo de vezes que a Busca Local irá executar
nãoMelhorou //contabiliza as repetições que não melhoram
Perturbados[ ] // Lista de nós vizinhos ao nó inserido na Busca Local
insereNo //Nó inserido à rede;
Sol* = { }; //solução corrente
Sol = { }; //melhor solução da BL
SolBL = { }; // solução resultante após a BL
Faça
  insereNo ← escolheUmNó()//escolhido aleatório dentre os nós desligados
  Perturbados[ ] ← listaVizinhos (insereNo, Sol) //busca os nós vizinhos ao inseridoNo
  pai ← procuraPai(insereNo, Perturbados[ ]) // escolhe o melhor pai para insereNo
  Se (conseguiu achar um pai)
    nãoFormaCirculo(insereNo, pai) //garante a estrutura de arvore (sem circulo)
    Se (não formar circulo)
      SolBL ← reConexão(insereNo, Perturbados[ ])//reconexão de caminhos com o insereNo
      SolBL ← remoção(insereNo, Perturbados[ ])//remove nós redundantes
      Se  $f(\text{SolBL}) < f(\text{Sol})$ 
        Sol ← SolBL
      fim_Se
    Senão
      nãoMelhorou ++
    fim
  fim_Se
  Senão
    nãoMelhorou ++
  fim
fim_Se
Senão
  nãoMelhorou ++
fim
Enquanto (nãoMelhorou <= maxBL)
```

Figura 16 - Pseudocódigo Busca Local

Conforme foram apresentados os três passos de aplicação da BL, cada um deles serão detalhados:

Inserção - Para inserir um nó à rede, é preciso garantir que esse nó sensor esteja desligado, ou seja, esteja fora da rede e com energia residual. A escolha desse nó sensor é aleatória, feita dentre todo o conjunto de nós desligados. Após selecionar o nó a ser inserido é feita uma busca na vizinhança do mesmo para identificar quais nós sensores que estão ligados e fazem parte da vizinhança do nó inserido. Essa verificação é feita com base no R_C do nó sensor inserido, que é o meio pelo qual ele se comunica com os outros nós sensores da rede. O R_C do nó inserido passa a ser chamado de raio de perturbação e os nós que estão dentro deste raio são chamados de nós perturbados (as nomenclaturas “nós perturbados e raio de perturbação” não têm relação com a fase de perturbação da metaheurística ILS, que será vista posteriormente).

Todo sensor que estiver ao alcance do raio de perturbação (R_C) do nó inserido fazem parte da sua vizinhança. Dentre essa vizinhança é preciso encontrar um nó sensor (pai) que faça parte do roteamento da rede, ou seja, que esteja ativo na rede, para que o nó inserido possa se conectar a ele (adotado como filho) e para que os seus pacotes possam ser transmitidos pela rede através dele, sem falha de conectividade. O nó escolhido como “Pai” pelo sensor inserido deve proporcionar o menor acréscimo de consumo de energia à rede e deve dispor de energia residual suficiente para suportar o recebimento dos pacotes do novo filho. Desta forma, a continuidade do caminho também deve suportar a inclusão de mais um nó que o utilizará para transmitir seus pacotes até o sorvedouro.

Ao escolher o nó a ser inserido e, dentro da área perturbada (R_C) deste nó não há nenhum nó ativo que faça parte do roteamento da rede, ao qual ele possa se conectar (ser adotado como filho), esse nó é desligado e não pode ser sorteado novamente até que haja uma melhora na configuração de toda a rede. Dessa forma ele entra em uma lista de “nós proibidos” até que possa haver alguma melhora na configuração da rede para que o mesmo seja tirado desta lista e tenha a oportunidade de ser sorteado novamente. Caso um nó consiga encontrar, dentro de sua área de perturbação (R_C), um nó ativo da rede que o possa adotar como filho, mas, o caminho pelo qual seus pacotes irão ser transmitidos não dispõe de energia residual suficiente, esse nó não poderá permanecer conectado à rede, sendo assim, esse nó inserido será desligado e entrará para a lista de “nós proibidos”.

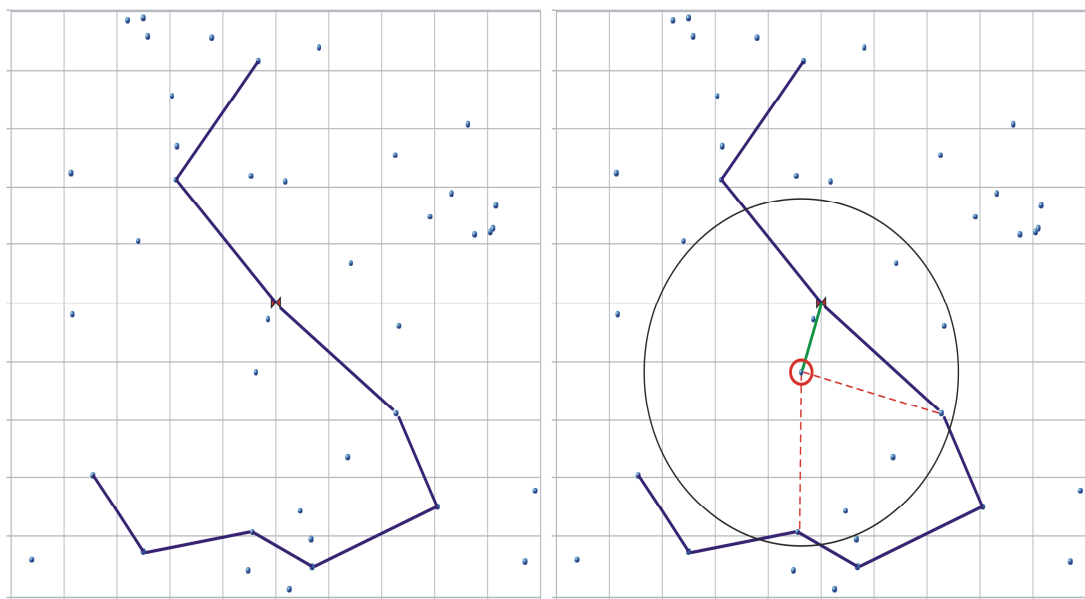


Figura 17 - Inserção em uma configuração de rede.

Conforme exemplificado na Figura 17, um nó que não esteja conectado à rede é selecionado (representado por um círculo de marcação), e dentro da sua área perturbada (R_C , representado por um círculo maior) é escolhido um nó ativo para ser seu pai de forma a minimizar o incremento no custo de energia de toda a rede. Para isso se verifica a distância que todos os possíveis pais estão do sorvedouro; com base nessas distâncias se escolhe quem será o pai do nó inserido.

Reconexão - A parte de reconexão entre os nós sensores na rede é o segundo passo que compõe a BL sobre uma configuração inicial da rede. Nesse passo é feita a troca de paternidade, uma reconexão de caminhos entre os nós, no intuito de reduzir o consumo de energia da rede, permanecendo com a mesma quantidade de nós utilizados.

A área perturbada (R_C) do nó inserido, como mostrado na parte de “inserção”, servirá como base para a reconexão. Todos os nós que estiverem dentro desta área de perturbação são considerados nós perturbado. Esses nós entram em uma lista para que, através de um método exaustivo, possam ser testadas todas as possíveis conexões entre eles, para que dessa forma se possa obter a melhor configuração entre eles.

Uma especificação feita em ANDRADE (2009) demonstra formalmente essa configuração: considerando C o conjunto dos nós ativos que fazem parte da região perturbada (R_C do nó inserido), para cada $c \in C$ é testado todas as possíveis conexões com os outros $c' \in C$ sendo que $c' \neq c$.

Na Figura 18 será exibida uma exemplificação gráfica dos passos realizados na reconexão entre os nós.

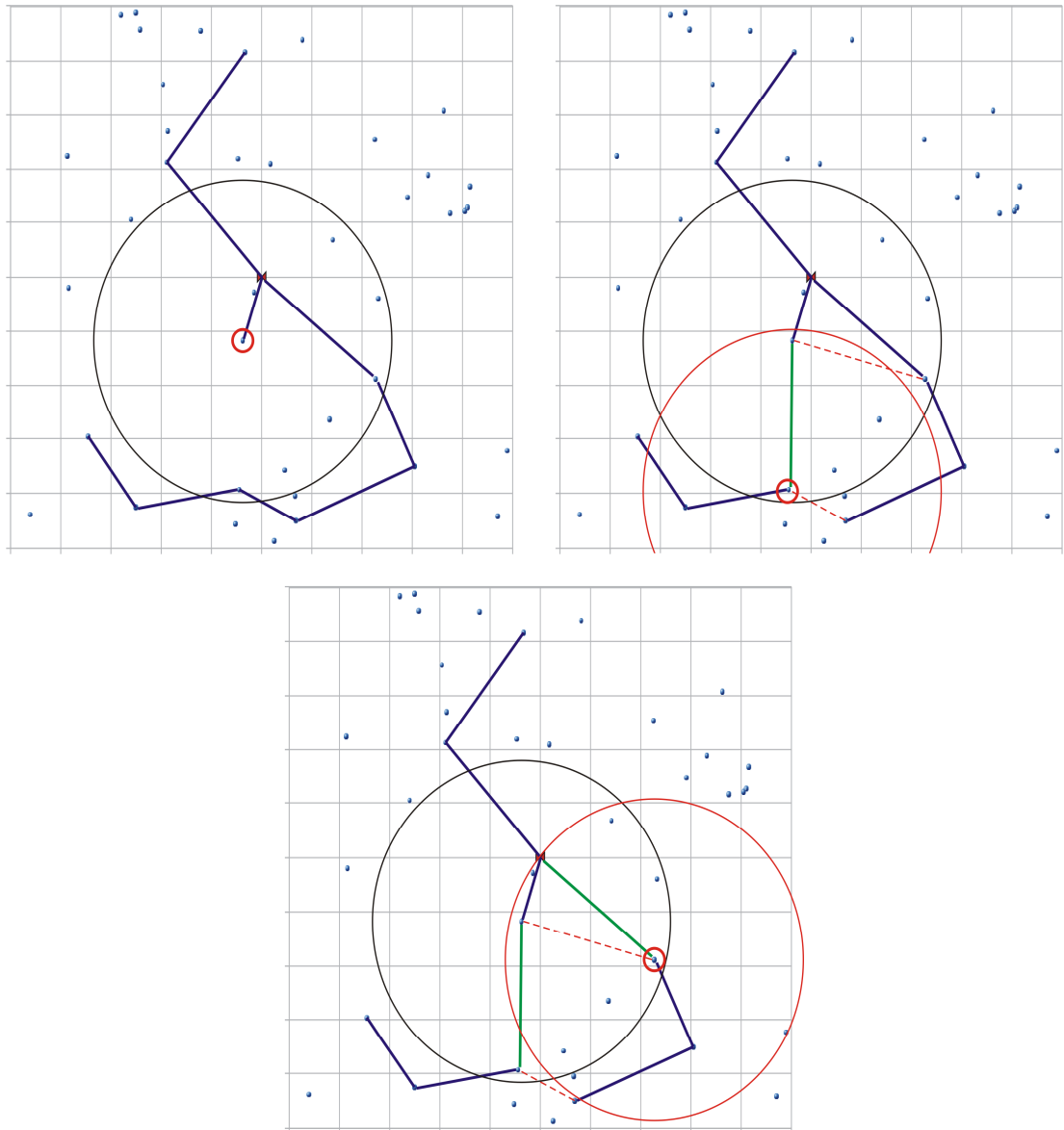


Figura 18 - Re-conexão ente os nós dentro da área de perturbada.

A reconexão é feita sobre todos os nós que estão dentro do R_C do nó inserido (área de perturbação, aqui representada pelo círculo maior). Quando os nós perturbados que estão dentro dessa área não conseguem encontrar outros nós “Pai” que os adotem como “Filho” a um custo de energia menor que o atual, eles continuam com seus pais atuais (mantendo assim a conexão).

Remoção - O objetivo a ser alcançado na fase de remoção é diminuir a quantidade de nós ativos na rede para economizar energia, sem interferir na cobertura da área e na conectividade entre os sensores. A remoção é feita quando se desliga um nó que esteja ligado na rede, mas que não está contribuindo para a mesma. A inutilidade dos

nós se dá devido às duas fases anteriores, onde, se inseriu um nó (podendo causar redundância de cobertura da área) e reconectou as ligações da rede dentro da região perturbada pelo nó inserido. Dessa forma, a rede pode ter sofrido alterações que a tornou propícia a execução desta fase.

Consideração os passos anteriores (inserção e reconexão), podem existir nós que estejam conectados à rede, mas que não estão contribuindo com a cobertura da área a ser monitorada e que não tenham nenhum “Filho” em suas dependências para que seus pacotes sejam roteados por meio dele. Esses nós inúteis estão contribuindo apenas para o aumento no consumo de energia do caminho ao qual eles estão ligados e não estão sendo útil para a cobertura e o roteamento da rede. Tais nós podem ser desligados e desconectados, fazendo com que assim a rede venha a economizar energia.

A Figura 19 mostra uma exemplificação onde se é aplicada a remoção de nós que não estão contribuindo para a cobertura da área e não são importantes para o roteamento de outros nós “Filhos”.

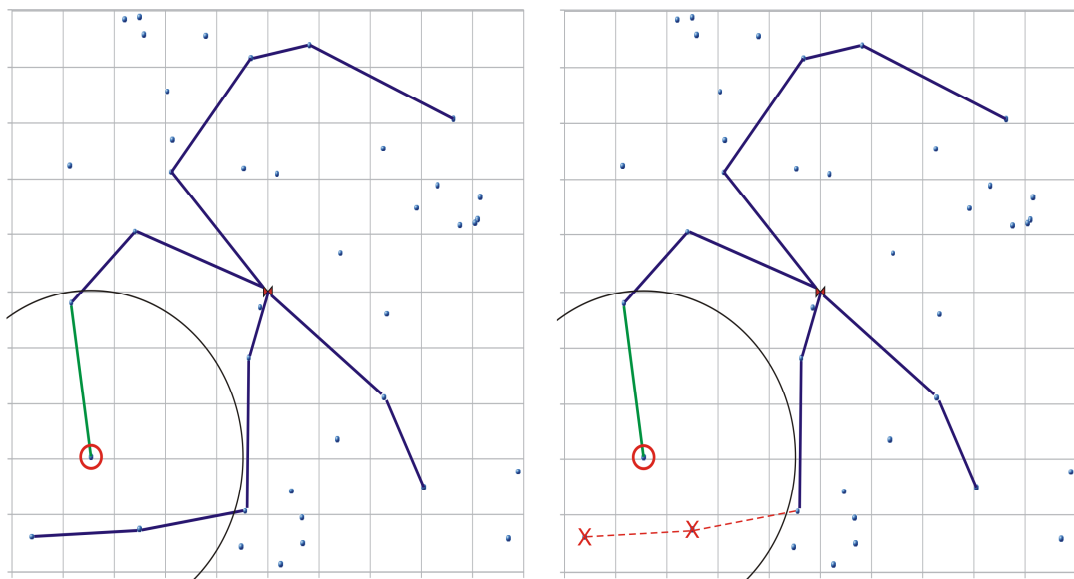


Figura 19 - Remoção de nós inúteis em uma área de perturbação.

Este exemplo é diferente dos anteriormente mostrados, pois neles (Figura 17 e Figura 18) não seria possível excluir nenhum dos nós que se encontram na área de perturbação, devido todos os nós terem alguma área própria de cobertura e, mesmo se algum deles fosse totalmente redundante, ainda assim não poderiam ser removidos, pois são importantes para o roteamento dos pacotes dos seus nós sensores “Filhos”.

Esta Figura 19 mostra uma aplicação onde é feita uma remoção de dois nós sensores que são totalmente redundantes (não cobrem nenhum ponto de demanda em particular) sobre a área de perturbação. Essa remoção é feita iniciando-se do nó que está ao final da configuração da rede, devido o mesmo não ter nenhum nós sensor como “Filho” e ser totalmente redundante, conseqüentemente o nó que era seu “Pai” também será removido, pois passou a atender às duas exigências de remoção: ser totalmente redundante e não ter dependência de filhos.

4.1.4 Perturbação

A perturbação aplicada em uma metaheurística ILS tem como objetivo principal tirar a solução de um estado de “ótimo local”. Em geral, a perturbação faz com que a solução corrente sofra algumas mudanças, para que, a partir dessas mudanças ela possa chegar a um resultado final que seja melhor que o anterior.

Conforme apresentado na sessão 4 (a apresentação da metaheurística ILS), a perturbação segue dois princípios importantes, não pode ser aplicada com uma intensidade muito grande – pois estaria fazendo um reinício aleatório da solução corrente; e não poder ter uma intensidade muito pequena – pois não estaria conseguindo tirar a solução do seu estado de “ótimo local”. Com base nessas informações, a perturbação aplicada para resolver o problema de Cobertura, Conectividade e Roteamento em RSSF foi feita em três passos. Foi aplicada uma perturbação por inserção, uma inserção em cascata e uma remoção. Cada uma dessas aplicações serão exibidas e exemplificadas a seguir.

Perturbação por inserção:

A primeira forma de perturbação aplicada sobre a RSSF foi através da inserção de nós sensores à rede. Para executar esta perturbação foram selecionados n_{Inser} nós sensores a serem inseridos na topologia atual da rede, no intuito de proporcionar mais opções de reconexão entre os sensores da mesma.

A medida que os nós sensores eram inseridos, imediatamente eles procuravam um pai que os adotassem e fizessem com que os seus pacotes pudessem ser roteados pela rede (para isso o caminho de transmissão deveria ter energia suficiente para suportar a adoção desses nós), caso não encontrasse um pai ativo na rede que estivesse dentro do seu R_C , o mesmo era desligado. Esse procedimento foi aplicado para todos os n_{Inser} nós sensores que seriam inseridos.

A Figura 20 mostra uma ilustração do funcionamento da perturbação com a inserção de três nós à rede. O sensor inserido é representado pelo círculo menor. Dentro do R_C de um sensor inserido (representado pelo círculo maior) é feita a escolha do pai que irá rotear os pacotes do nó filho. Pode acontecer de um nó ser inserido e não conseguir achar um pai que o adote por dois motivos: por não ter nenhum nó ativo ao alcance do seu R_C , ou devido o caminho escolhido não ter energia residual suficiente para rotear os pacotes de mais um nó sensor, nesse caso o nó que foi inserido é desligado.

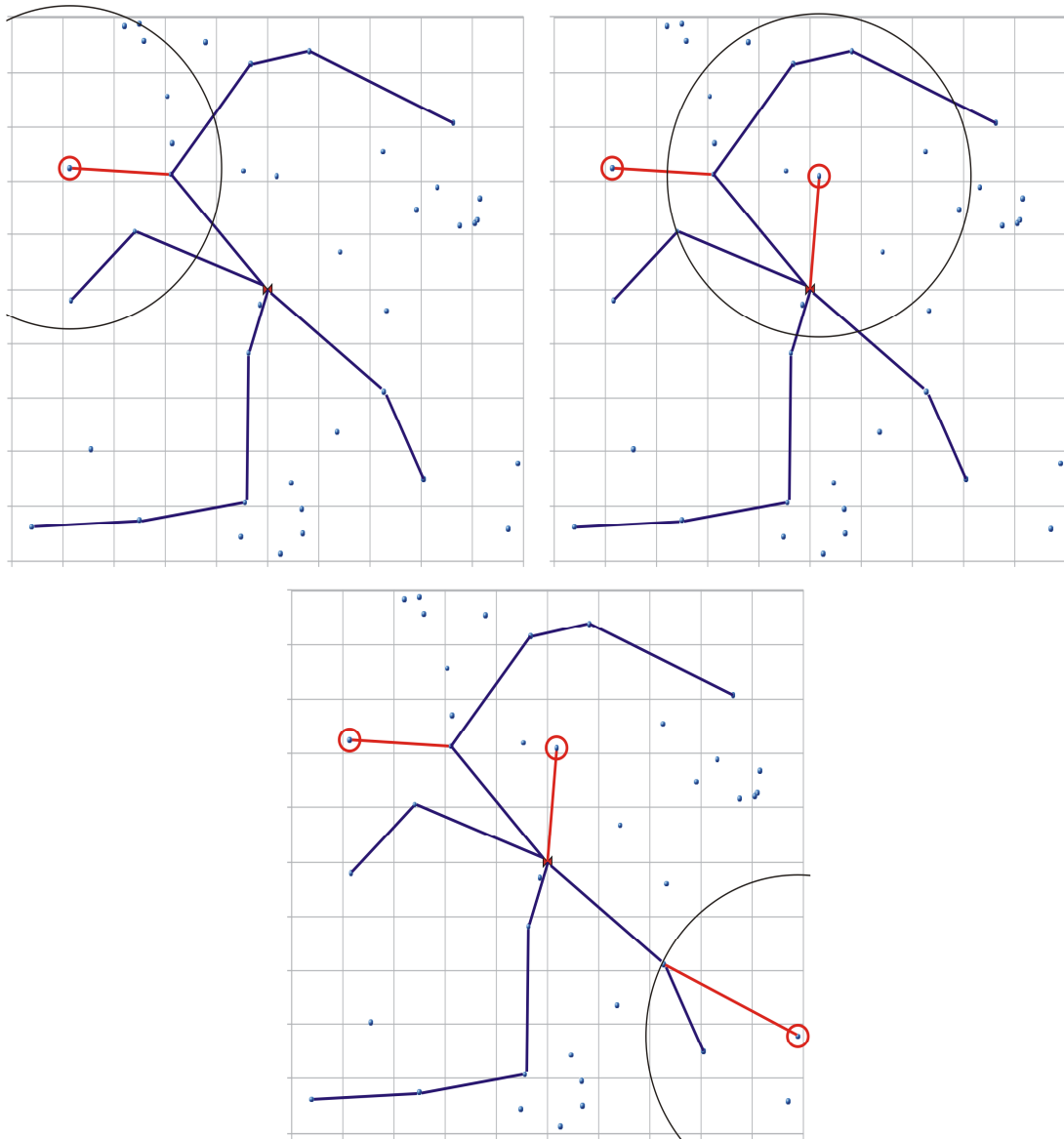


Figura 20 - Perturbação por inserção.

Perturbação por inserção em cascata:

A perturbação em cascata tem o objetivo de fazer com que seja inserido um pequeno caminho com dois nós ligados em sequência (pai e filho). Esta perturbação

em cascata segue os seguintes passos: primeiramente se escolhia um nó sensor que esteja fora da configuração da rede, posteriormente esse nó escolhido procurará um nó que esteja ativo na rede para ser seu pai (conforme a perturbação de “inserção” mostrada anteriormente). A partir desse ponto, o nó sensor que foi adotado pela rede procurará um outro nó sensor que esteja fora da rede (desligado), mas que esteja dentro do seu R_C , para ser seu filho. Ao encontrar um filho nessas condições e o caminho ao qual ele estaria utilizando suporte mais essa adoção, o mesmo será introduzido à rede como sendo filho do nó já inserido.

A Figura 21 mostra dois exemplos gráficos que mostram o resultado da perturbação de inserção em cascata. Verifica-se o R_C do nó sensor inserido e toda a área coberta por ele. Com base na cobertura do R_C se conhece todos os outros sensores que estão ao seu alcance, tanto dos que fazem parte da configuração da rede quanto os que não fazem. Com isso é possível escolher o outro nó a ser adotado como filho do nó inserido.

Caso a adoção de um novo filho não seja possível devido ao consumo de energia do caminho, a nova adoção não é feita.

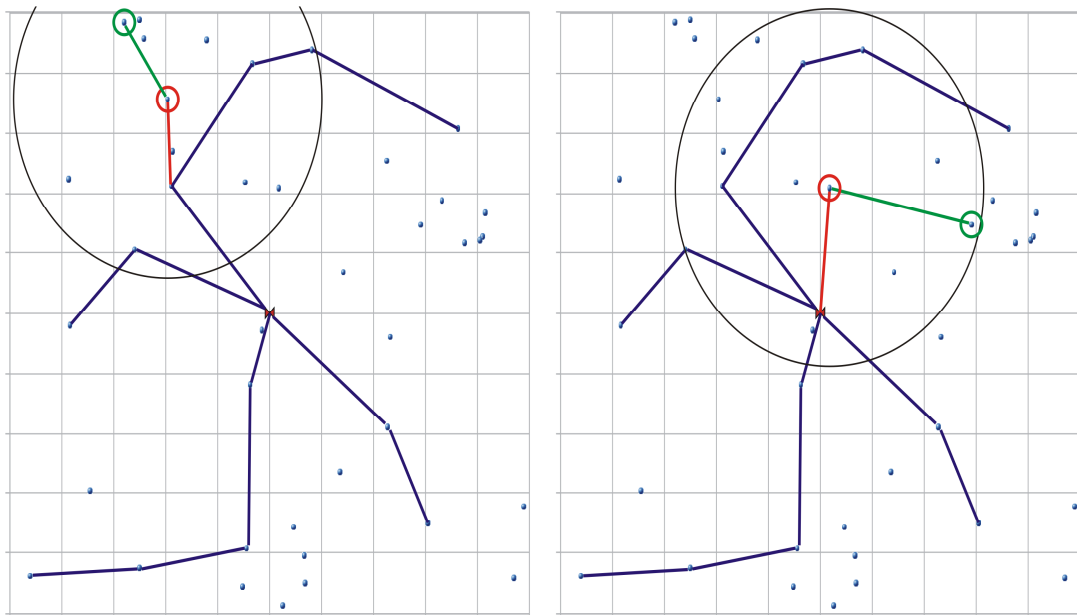


Figura 21 - Perturbação de inserção em cascata.

Perturbação por remoção:

A perturbação de uma solução baseada na remoção de nós que sejam totalmente redundantes na rede é mais uma estratégia para poder tirar a solução

inicial do seu ótimo local. Ao se aplicar a perturbação por remoção, o consumo de energia é minimizado e simultaneamente a topologia da rede sofre mudanças.

Várias restrições estão envolvidas para que essa perturbação possa ser feita. Primeiramente devem-se levar em consideração os filhos que estão ligados a estes nós redundantes e determinar o que será feito com eles, para qual nó eles serão remanejados. Para tratar essa restrição foi preciso implantar uma reconexão dos filhos ligados a esses nós redundantes, fazendo com que eles fossem adotados por outros pais vizinhos a eles. Dessa forma se estaria garantindo que os seus pacotes chegassem até o sorvedouro por outros caminhos, deixando assim os seus pais redundantes sem nenhum filho, podendo ser desligado da rede.

Nem sempre esse processo de remanejamento dos filhos é realizado com sucesso, pode ocorrer que, um dos filhos de um nó redundante não conseguisse ser adotado por nenhum outro pai ativo na rede, fazendo com que esse manejo fosse impedido e a rede volta-se a configuração anterior com relação a esse nó redundante (não sendo possível desliga-lo). Uma vez ocorrido esse impedimento, o nó redundante não pode ser desligado, pois se torna importante para o roteamento dos pacotes de seu filho.

Conforme ilustra a Figura 22, a remoção é feita nos nós que são totalmente redundantes para a rede. Nesse caso, os seus filhos precisam encontrar um novo caminho para que seus pacotes continuem sendo roteados, sendo assim, os filhos precisam escolher outro nó pai (dentro do seu R_C) que esteja ativo na rede para rotear seus pacotes. Caso consigam achar um novo pai, o nó redundante é desligado (conforme mostra os quarto passos da rede a seguir).

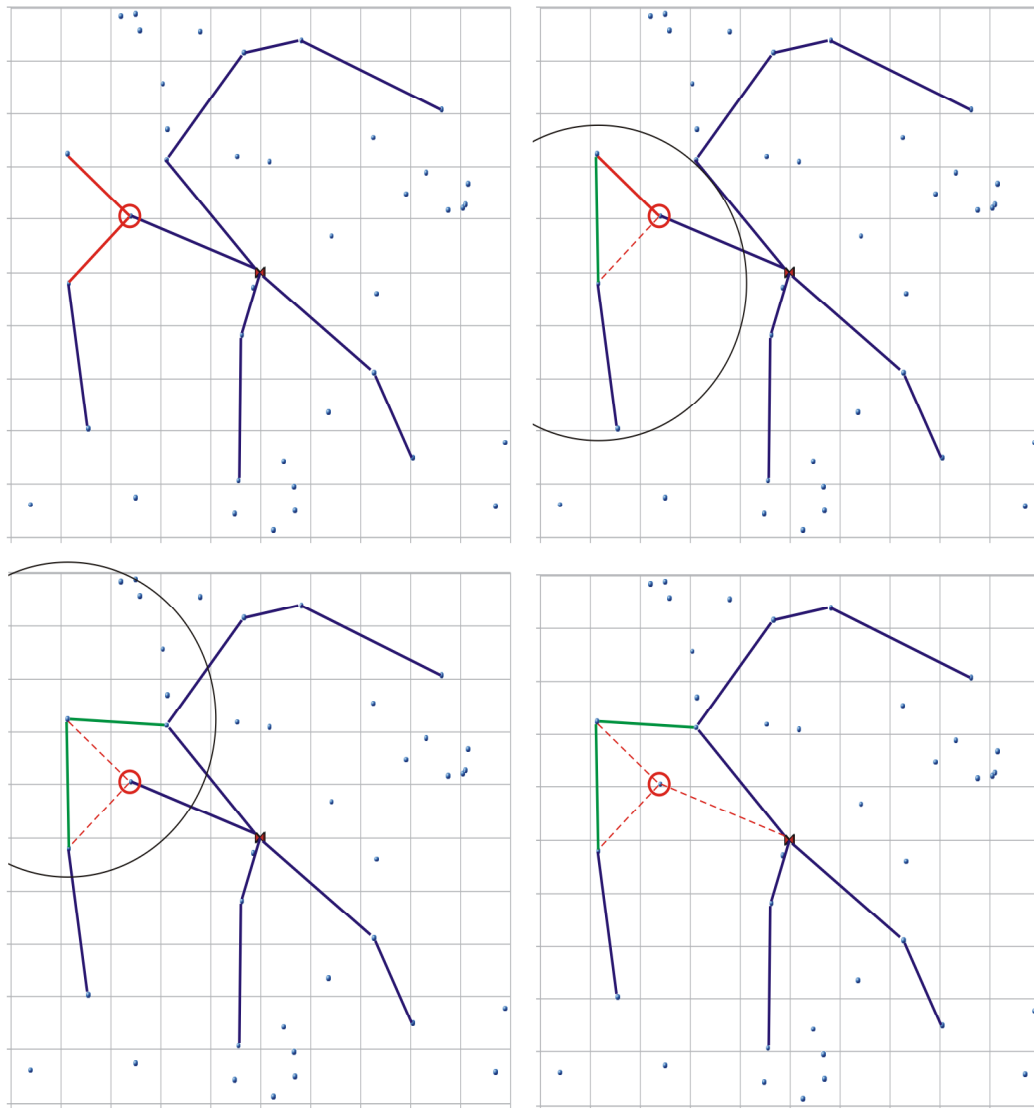


Figura 22 - Perturbação por remoção. Escolha do nó redundante, troca de paternidade dos filhos, desativação do nó redundante.

4.1.5 Critério de Aceitação

Conforme exibido no algoritmo da metaheurística ILS (Figura 10), uma solução é passiva de aceitação ou não.

Para esse trabalho, o critério para aceitação de uma solução se deu com base no consumo de energia da rede. Uma solução com menor consumo de energia será aceita se comparada a uma outra que tenha um maior consumo de energia. A solução aceita passa a ser a nova solução a ser perturbada pelo método ILS.

As configurações de rede que tenham um consumo de energia maior também são submetidas ao critério de aceitação, caso aceitas, o laço de repetição iniciaria com esta solução para ser perturbada.

4.1.6 Parâmetros de Entrada

A implementação da metaheurística ILS para resolver o problema de cobertura, conectividade e roteamento em RSSF 2D foi implementada utilizando alguns parâmetros de entrada para resolução do problema. As informações referem-se aos sensores, a configuração utilizada e, todos os outros parâmetros envolvidos para os cálculos e os testes necessários foram carregados e preparados para serem manipulados ao iniciar a execução da metaheurística.

Os sensores são representados com uma estrutura de dados onde todas as informações necessárias sobre os mesmos encontram-se nesta estrutura. Dentre as informações está o tipo de sensor (conforme exibido anteriormente no Capítulo 2, onde mostra uma classificação dos tipos de sensores). É preciso identificar esta informação para determinar todos os outros parâmetros que serão utilizados, tais como: capacidade total da carga da bateria, a taxa de transmissão dos pacotes, o alcance do raio e etc.

Os sensores são mapeados em uma área que representa o ambiente de coleta das informações. Estes sensores são configurados para uma área bidimensional (com as coordenadas X e Y) para sua localização geográfica. Esses dados estão dispostos em forma de vetores onde constam as coordenadas de cada um dos nós sensores. A Tabela 4 mostra um exemplo de valores que representam as coordenadas X e Y dos nós sensores. Esses valores variam de 0 (zero) até o limite máximo da área onde os sensores estão sendo aplicados. Neste trabalho as coordenadas foram representação para uma área de tamanho 10, assim as coordenadas variam de 0 a 10.

A Tabela 4 mostra um exemplo das coordenadas utilizadas para 10 nós sensores. A Figura 23 representa graficamente um conjunto de seis nós sensores sobre o ambiente e suas coordenadas.

A área monitorada está sendo representado como sendo uma área verde (floresta, reserva ou alguma área semelhante) onde é feita a distribuição dos nós sensores para coletar as informações do ambiente. Cada sensor está sendo representado por um ponto, onde sua localização é definida através das coordenadas X e Y.

Para efetuar a transmissão dos pacotes de dados dos sensores na rede é preciso ter a localização do nó origem e a localização do nó que destino. Os valores

correspondentes para a transmissão dos pacotes de um nós são calculados com base em uma tabela de consumos de energia do sensor MICA2, CROSSBOW (2006). Para isso é preciso obter a distância euclidiana de um nó sensor, com relação a todos os outros. Conforme a distância que um sensor apresentar com relação aos outro nós sensor, assim também será o valor correspondente ao consumo de energia para efetuar uma transmissão de pacotes para os tais sensores. Essa transmissão é feita respeitando o limite do R_C , como visto na sessão 2.5.

Tabela 4 - Coordenada X, Coordenada Y e Tipo dos nós Sensores.

Coordenada X	Coordenada Y	Tipo
4.563252	1.074974	1
7.917725	6.484058	1
1.566644	2.034349	1
4.681020	9.155029	1
8.058315	1.514950	1
3.145734	7.704125	1
9.150489	6.681143	1
2.588796	9.563980	1
5.693234	0.509349	1
2.512912	9.887452	1

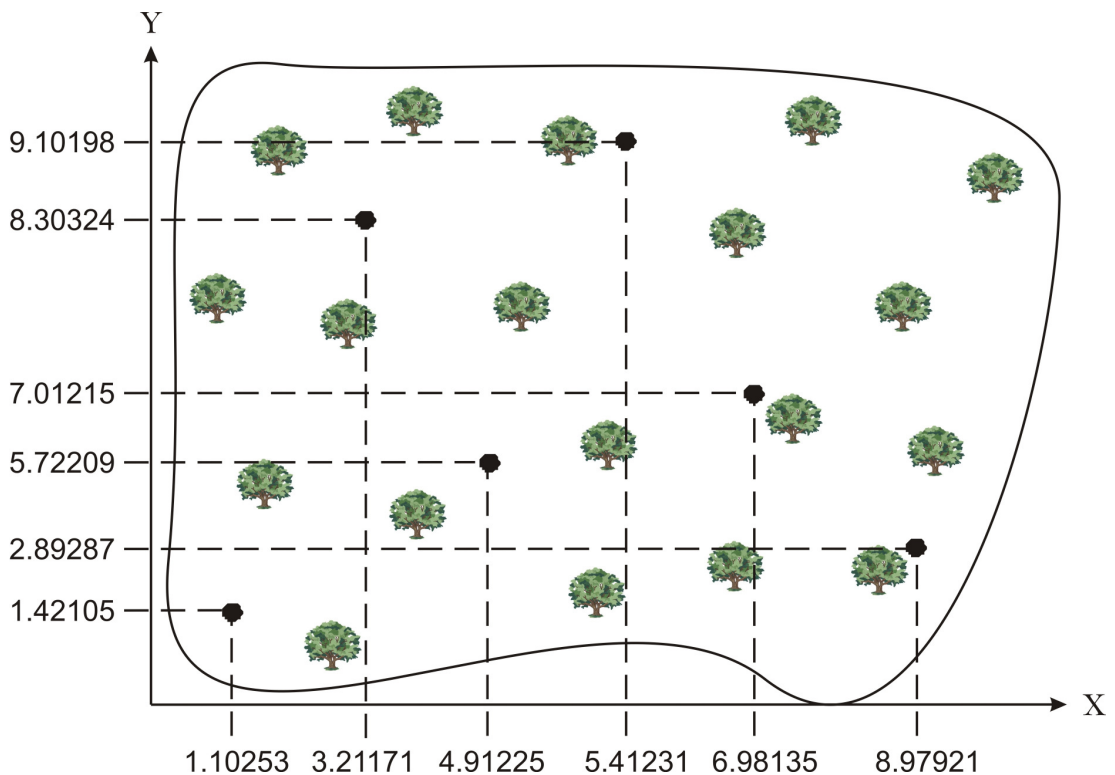


Figura 23 - Coordenadas dos nós sensores distribuídos em um ambiente 2D.

A Tabela 5 mostra uma relação entre o consumo de energia e a distância de uma transmissão entre os sensores (como visto na Tabela 1, a referência do consumo de energia do sensor com relação ao raio de transmissão).

Tabela 5 - Consumo de energia de transmissão com relação à distância entre os nós sensores, NAKAMURA (2003).

Distância (m/10)	Energia (mA)
0.5142	8.6
0.5769	8.8
0.6473	9.0
0.7263	9.0
0.8150	9.1
0.9144	9.3
1.0260	9.3
1.1512	9.5
1.2916	9.7
1.4492	9.9
1.6261	10.1
1.8245	10.4
2.0471	10.6
2.2969	10.8
2.5771	11.1
2.8916	13.8
3.2444	14.5
3.6403	14.5
4.0845	15.1
4.5829	15.8
5.1420	16.8
5.7695	17.2
6.4735	18.5
7.2633	19.2
8.1496	21.3
9.1440	25.4

Além das coordenadas dos sensores para se obter sua localização, e do consumo de energia para transmissão de pacotes conforme a distância que o nó destino se encontra, é preciso atender a densidade da rede com relação à cobertura da área monitorada. Isso é exposto em forma de mapas, sendo eles: mapa da topologia da rede (onde estão presentes as informações sobre as coordenadas dos sensores), mapa da cobertura (onde se tem informações sobre o estado do nó, se está ativo ou não e, a área que o mesmo cobre) e, o mapa de energia (que são informações sobre a

energia residual dos nós sensores). Os pontos de demanda são responsáveis por demarcar os pontos a serem cobertos no ambiente; eles representam a necessidade de cobertura da área, conforme SIQUEIRA (2002).

Quando todos os pontos de demanda estão cobertos, significa que a densidade da rede foi alcançada (com relação ao mapa de cobertura) e, toda a área está sendo monitorada. Quando alguns desses pontos de demanda se encontram descoberto pelo raio de R_s dos sensores ativos da rede, significa que, se ocorrer algum evento nesta área, o mesmo não será detectado pela rede.

Os pontos de demandas da área são representados por um ponto localizado no centro de um quadrado. Para obter este quadrado, a área monitorada é dividida em partes iguais, formando pequenos quadrados. Esse quadrado representa uma área de $1m^2$ (um metro quadrado), onde, o centro é considerado como sendo um ponto de demanda (uma área a ser obrigatoriamente coberta pelo R_s de um nó sensor ativo). Sendo assim, em uma área com 10 metros quadrados, existem 100 pontos de demanda a serem cobertos pelos nós sensores.

Uma visualização gráfica dos pontos de demanda em um ambiente é vista na Figura 24, onde os pontos de demanda são distribuídos em toda a área de sensoriamento. Cada um desses pontos precisam ser cobertos por pelo menos um ($m=1$) nó sensor ativo na rede.

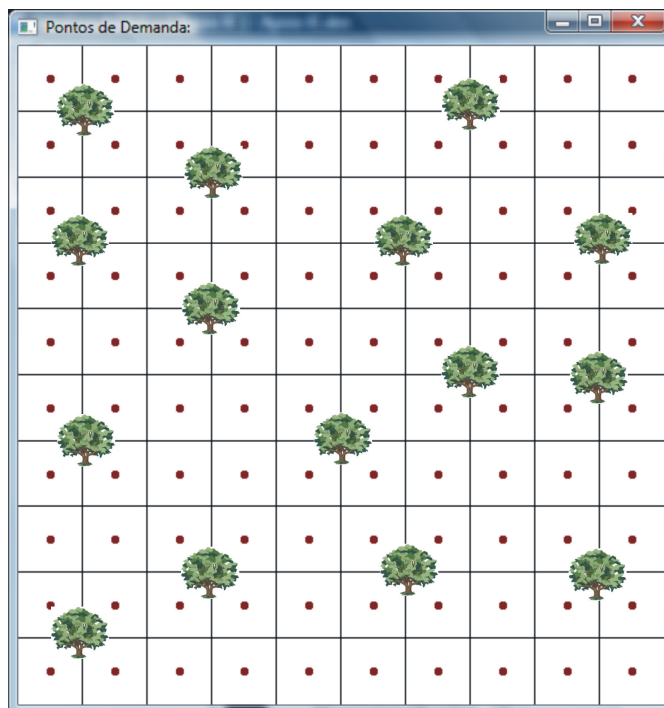


Figura 24 - Pontos de demanda em uma área 10x10.

4.1.7 Função Objetivo

Devido à grande complexidade dos problemas encontrados no mundo real, muitos modelos abordam mais de um objetivo estão sendo convertidos para modelos com somente um objetivo, segundo DEB (2001).

Ao aplicar uma função multiobjetivo para esse problema (onde os objetivos são: cobertura, conectividade e roteamento) busca-se chegar a uma configuração onde os valores estejam equilibrados, onde satisfaça todas as exigências do problema. Para isso é utilizada uma soma ponderada para equilibrar esses valores e fazer com que a função objetivo se torne um valor resultante de todos os objetivos. Dessa forma, quando um objetivo está se distanciando da solução ótima com relação aos outros, essa função irá crescer, e quando os valores estão se equilibrando, essa função irá diminuir e estabilizar.

O objetivo é economizar energia garantindo a cobertura a conectividade e o roteamento entre os nós sensores ativos da rede durante cada período de tempo.

O modelo para a função objetivo deste problema é apresentada a seguir. A função tem como preferência diminuir o número de nós ativos na rede e procurar evitar as falhas de cobertura, com isso, buscando maximizar o tempo de vida da rede garantindo a qualidade de serviço em relação a cobertura e ao roteamento.

Modelo da **função objetivo**, segundo ANDRADE (2009):

S conjunto de nós sensores

D conjunto de pontos de demanda

T quantidade de períodos de tempo

A_i área de cobertura do nó sensor $i \in S$

E_i^t energia consumida pelo nó sensor $i \in S$ no tempo $t \in T$

y_i^t variável de decisão que possui valor 1 quando o sensor $i \in S$ não consegue garantir conectividade no período de tempo $t \in T$ e 0 caso consiga

t período atual

Função Objetivo:

$$\min \sum_{i \in S} \frac{E_i^t}{A_i} + \left(1 - \sum_{i \in S} \frac{A_i}{|D|} \right) + \sum_{i \in S} y_i^t, \forall t \quad 4.3.2$$

$$y \in \{0,1\} \quad 4.3.3$$

A equação 4.3.1 tem como objetivo minimizar a energia consumida pelos nós sensores, procurando deixar ativo durante cada período de tempo somente os nós sensores que contribuem para a rede. O primeiro somatório da equação faz uma ponderação entre toda a energia gasta com os sensores ligados no período $t \in T$ dividido pela área coberta neste período. O segundo somatório é feito com base na divisão entre toda a área coberta pelo sensor $i \in S$ no período de tempo $t \in T$ pela quantidade total de pontos de demanda existente. O numeral 1 (um) no segundo somatório está servindo para inverter o resultado da divisão, exemplo: quanto menor for essa área coberta pelo sensor $i \in S$ nesse período de tempo, menor será o valor da função quando for dividida pela quantidade fixa de pontos de demanda existente, mas, quando for diminuído 1 (um) desse valor, a função inverterá, tendo a característica desejada, onde, quanto menor for a área coberta, maior será o valor desse somatório.

A equação 4.3.2 indica que o tipo da variável y_i^t é binário, assumindo somente valor 0 (zero) quando o sensor consegue garantir a conectividade no período corrente ou 1 (um) caso não consiga garantir essa conectividade durante o período de tempo corrente.

5 RESULTADOS E TESTES COMPUTACIONAIS

Neste capítulo serão expostos os resultados obtidos mediante os testes computacionais realizados com a aplicação da metaheurística ILS e será feita uma comparação entre o método exato de resolução do problema, proposto em NAKAMURA *et al.* (2005).

5.1 Ambiente de Teste e Simulação

Para validação dos resultados, os testes foram feitos utilizando um computador Intel® Core™2 Quad CPU, 2.4GHz com 3 GB de memória na plataforma 64 Bits.

A metaheurística ILS para resolver o problema em RSSF neste trabalho foi implementada utilizando a linguagem de programação C.

O modelo matemático proposto por NAKAMURA (2003) foi executado usando o programa comercial CPLEX 12.1 IBM (2010) para se obter a solução ótima de todos os problemas e assim poder comparar os resultados encontrados pela metaheurística.

Foram realizados testes com 6 (seis) tamanhos diferentes do problema: 20, 31, 42, 53, 60 e 85 nós sensores distribuídos na mesma área de simulação. Para cada tamanho foi gerada 12 instâncias diferentes, totalizando 72 instâncias. Cada instância possui uma configuração diferente com relação às coordenadas dos sensores na área a ser monitorada.

Todos os problemas foram simulados levando em consideração os seguintes parâmetros:

- Área de simulação:

Dimensão: 2D (bidimensional)

Extensão: 100m²

Pontos de demanda: 100 (1 por m²)

Períodos: 4

Duração de cada período: 1h (uma hora)

- Sensores:

Raio de comunicação: 3m/10

Raio de sensoriamento: 2m/10

Quantidade de nós: 20, 31, 42, 53, 60 e 85

Tipos dos nós sensores: MICA2

Taxa de transmissão: 0,5 pacote por vez

- Atividades dos sensores e consumo de energias:

Capacidade da Bateria: 400mA

Energia de manutenção: 30mA por período

Energia de ativação: 10mA por período

Energia de recepção: 10mA por pacote

Energia de transmissão: 26 configurações, conforme Tabela 5

- Sorvedouros:

Quantidade: 1

Localização: Centro

Fonte de energia: Ilimitada

Raio de comunicação: 3m/10

- Parâmetros do ILS para o problema de RSSF

β : 1.0 (para desligar um sensor)

Busca Local: Exaustiva (procura inserir todos os nós possíveis aleatoriamente)

n_{ILS} : (10, 30, 50, 70, 90, 110) repetições

Perturbação de inserção: (1, 3, 5, 7 e 9) nós

Perturbação de inserção em cascata: 2 nós (pai e filho)

Construção da solução inicial: Gulosa e α (0.2, 0.4, 0.6, 0.8 e 1.0).

Testes da Perturbação por Inserção:

Para a perturbação por inserção foram feitos experimentos com quantidades diferentes de nós inseridos na solução. As tabelas abaixo exibem o valor médio dos resultados de testes obtidos com diferentes **inserções** para todos os 6 tamanhos de

problemas. A linha em destaque na tabela identifica a melhor inserção para esse tipo de perturbação em uma rede.

Enquanto foram executados os testes de inserção, seguia-se a seguinte configuração dos parâmetros para o ILS:

β : 1.0; Busca Local: Exaustiva; ***n*ILS:** 10; **Perturbação de inserção:** (1, 3, 5, 7 e 9); **Perturbação de inserção em cascata:** 0; **Construção da solução inicial:** Gulosa.

Tabela 6 - Perturbação por inserção para 20 nós.

Nº de Inserções	Média Função Objetivo	Média Consumo de Energia	Média Falha de Cobertura	Média Nós utilizados	Média Tempo
1	46,34021	2432,525	23,875	10,1875	0,083
3	46,31467	2768,825	21,687	11,4375	0,060
5	45,21940	2404,013	22,687	11,6875	0,052
7	45,26207	2842,775	22,500	11,6875	0,051
9	46,59877	2606,038	23,500	11,0000	0,053

Tabela 7 - Perturbação por inserção para 31 nós.

Nº de Inserções	Média Função Objetivo	Média Consumo de Energia	Média Falha de Cobertura	Média Nós utilizados	Média Tempo
1	53,90230	2887,600	6,00	13,87	0,160
3	52,37432	3060,861	3,12	15,62	0,165
5	51,91637	2707,050	3,00	15,62	0,174
7	52,29821	3272,970	3,00	15,87	0,176
9	51,64954	3283,750	3,00	15,75	0,176

Tabela 8 - Perturbação por inserção para 42 nós.

Nº de Inserções	Média Função Objetivo	Média Consumo de Energia	Média Falha de Cobertura	Média Nós utilizados	Média Tempo
1	53,81325	3041,188	3,50	14,37	0,286
3	53,09421	3241,963	1,75	15,56	0,292
5	53,88162	3245,438	1,75	15,50	0,300
7	54,47268	3293,475	1,75	15,68	0,300
9	53,03949	3231,225	1,75	15,50	0,301
12	53,78872	3268,213	1,75	15,68	0,304

Tabela 9 - Perturbação por inserção para 53 nós.

Nº de Inserções	Média Função Objetivo	Média Consumo de Energia	Média Falha de Cobertura	Média Nós utilizados	Média Tempo
1	52,45228	2815,588	4,1875	14	0,021
3	50,55725	3159,438	0,25	16	0,103
5	50,60923	2717,541	0,25	16,50	0,202
7	50,00585	3141,200	0,25	15,93	0,258
9	51,11844	3207,788	0,25	16,18	0,305

Tabela 10 - Perturbação por inserção para 60 nós.

Nº de Inserções	Média Função Objetivo	Média Consumo de Energia	Média Falha de Cobertura	Média Nós utilizados	Média Tempo
1	49,7045	2937,838	0,25	14,50	0,326
3	49,3844	2958,538	0	14,50	0,337
5	49,6021	2455,375	0	14,68	0,342
7	49,7624	2991,513	0	14,68	0,352
9	51,4021	3013,175	0	14,81	0,339

Tabela 11 - Perturbação por inserção para 85 nós.

Nº de Inserções	Média Função Objetivo	Média Consumo de Energia	Média Falha de Cobertura	Média Nós utilizados	Média Tempo
1	48,5759	2717,213	1,50	13,62	0,373
3	49,3558	3536,988	0,37	17,68	0,287
5	47,5753	2275,656	0,25	14	0,305
7	49,0040	2881,838	0,25	14,43	0,311
9	48,8233	2880,625	0,25	14,43	0,397

Mediante a apresentação das Tabela 6 à Tabela 11, pode-se concluir que a perturbação por inserção na rede teve uma pequena variação conforme o número de inserção que eram feitas, conforme aumentava a quantidade de sensores disponíveis no ambiente. Pode-se configurar a perturbação por inserção com os valores médios dos testes realizados, ou seja, 5 inserções.

Testes de combinação de diferentes perturbações:

Conforme apresentado na fase de perturbações da metaheurística ILS, foram feitas combinações entre as três perturbações existentes (inserção, inserção em cascata e remoção) no intuito de responder à pergunta: qual a melhor perturbação a

se utilizar na metaheurística ILS, ou melhor, qual a melhor combinação entre as perturbações de forma a obter os melhores resultados?

Para medir o desempenho de cada perturbação, foram testadas as possíveis combinações existentes entre elas.

Os tipos de perturbações aplicadas foram:

1 – inserção, 2 – inserção em cascata e 3 – remoção.

Conforme a combinação proposta, da Tabela 12 à Tabela 17 foram exibidos os resultados médios com relação à falha de cobertura e à quantidade de nós utilizados para configurar a rede – que implica diretamente no consumo de energia da mesma.

Os valores dos parâmetros utilizados para compor as tabelas foram extraídos de uma média realizada com o resultado de todas as 12 instâncias dos 6 problemas.

Enquanto foram executados os testes de combinações de inserções, foi seguida a seguinte configuração dos parâmetros do ILS:

β : 1.0; **Busca Local**: Exaustiva; **nILS**: 10; **Perturbação de inserção**: 5; **Perturbação de inserção em cascata**: todas as combinações entre 1, 2 e 3; **Construção da solução inicial**: Gulosa.

Tabela 12 - Combinação entre as perturbações para rede com 20 nós.

Combinação das perturbações	Média Função Objetivo	Média Consumo de Energia	Média Falha de Cobertura	Média Nós utilizados
(1)	46,6151	2873,150	21,68	12,062
(1+2)	46,2171	2867,610	20,87	12,062
(1+2+3)	45,7367	1777,350	35,50	7,500
(1+3)	45,4017	1790,000	33,68	7,750
(1+3+2)	46,2382	2059,030	32,43	8,875
(2)	45,6277	2361,210	26,18	9,937
(2+1)	46,0841	2837,730	21,50	12,000
(2+1+3)	50,6666	1531,750	41,93	6,500
(2+3)	49,4380	1950,160	31,75	8,062
(2+3+1)	45,2642	2820,000	20,68	11,937
(3)	48,7820	2144,710	28,43	8,937
(3+1)	46,7265	2860,480	20,87	12,125
(3+1+2)	46,7782	2840,710	20,87	12,062
(3+2)	46,0890	2339,200	24,00	10,000
(3+2+1)	46,3638	2787,730	21,25	11,875

Tabela 13 - Combinação entre as perturbações para rede com 31 nós.

Combinação das perturbações	Média Função Objetivo	Média Consumo de Energia	Média Falha de Cobertura	Média Nós utilizados
(1)	55,5223	3255,380	3,00	15,812
(1+2)	52,1013	3316,800	2,56	16,000
(1+2+3)	57,5287	1664,600	38,87	7,500
(1+3)	59,2432	1728,700	34,31	8,125
(1+3+2)	58,5237	2748,470	14,00	13,000
(2)	50,8684	2712,830	10,87	12,875
(2+1)	55,3510	3322,720	2,62	15,875
(2+1+3)	57,2500	1624,460	40,12	7,437
(2+3)	50,7096	2457,100	18,12	11,437
(2+3+1)	56,3242	3232,200	2,75	15,562
(3)	54,3772	2524,630	15,93	11,812
(3+1)	56,5525	3214,060	3,00	15,375
(3+1+2)	50,0500	3281,070	2,25	15,687
(3+2)	54,6245	2949,530	6,87	14,062
(3+2+1)	55,6629	3308,680	2,25	16,000

Tabela 14 - Combinação entre as perturbações para rede com 42 nós.

Combinação das perturbações	Média Função Objetivo	Média Consumo de Energia	Média Falha de Cobertura	Média Nós utilizados
(1)	56,5364	3262,888	1,81	15,562
(1+2)	58,6816	3325,888	1,25	16,000
(1+2+3)	63,5514	1153,700	47,81	15,500
(1+3)	60,3665	1432,638	43,68	14,062
(1+3+2)	59,5917	2361,150	15,93	11,187
(2)	53,5604	3083,625	6,25	14,375
(2+1)	57,7121	3286,288	1,75	15,812
(2+1+3)	19,9835	4946,087	53,93	14,687
(2+3)	48,9928	2727,725	10,81	12,500
(2+3+1)	55,8878	3176,750	1,87	14,875
(3)	51,1391	2494,363	11,62	12,062
(3+1)	55,0222	3205,850	1,75	14,875
(3+1+2)	50,4148	3305,275	1,43	15,562
(3+2)	50,8812	2909,738	4,00	13,687
(3+2+1)	52,7144	3234,438	1,50	15,062

Tabela 15 - Combinação entre as perturbações para rede com 53 nós.

Combinação das perturbações	Média Função Objetivo	Média Consumo de Energia	Média Falha de Cobertura	Média Nós utilizados
(1)	48,9219	3131,250	1,87	15,625
(1+2)	52,5265	3367,850	0,50	16,625
(1+2+3)	23,3658	1092,030	48,62	15,437
(1+3)	27,0353	1305,700	40,56	6,437
(1+3+2)	39,3424	2479,400	13,75	12,000
(2)	49,1212	3009,810	3,75	14,750
(2+1)	49,5524	3377,370	0,50	15,437
(2+1+3)	66,2071	1312,820	40,50	10,437
(2+3)	57,1914	2437,450	12,00	11,250
(2+3+1)	51,9181	3133,750	1,25	15,125
(3)	58,9080	2410,710	12,50	11,625
(3+1)	59,5752	3225,730	1,00	15,437
(3+1+2)	52,4870	3351,130	1,25	16,062
(3+2)	49,1264	2890,710	3,56	13,750
(3+2+1)	47,1994	3234,530	1	15,812

Tabela 16 - Combinação entre as perturbações para rede com 60 nós.

Combinação das perturbações	Média Função Objetivo	Média Consumo de Energia	Média Falha de Cobertura	Média Nós utilizados
(1)	50,6350	3004,500	1,31	14,687
(1+2)	51,7579	3001,650	0	14,687
(1+2+3)	53,9294	1532,950	28,25	12,562
(1+3)	53,3919	1948,813	15,06	13,562
(1+3+2)	49,3800	2632,413	4,43	12,750
(2)	51,4439	2948,850	0,12	14,125
(2+1)	52,3557	3043,288	0	14,937
(2+1+3)	52,3231	1544,575	25,56	14,687
(2+3)	50,0766	2152,550	11,68	10,625
(2+3+1)	49,3774	2761,938	1,68	13,312
(3)	49,3619	2529,863	5,06	12,125
(3+1)	49,9775	2862,125	1,50	13,750
(3+1+2)	49,2650	2931,800	0	14,312
(3+2)	49,5976	2888,863	0,50	15,062
(3+2+1)	50,4591	3017,863	0	14,500

Tabela 17 - Combinação entre as perturbações para rede com 85 nós.

Combinação das perturbações	Média Função Objetivo	Média Consumo de Energia	Média Falha de Cobertura	Média Nós utilizados
(1)	50,2564	2822,463	0,25	13,875
(1+2)	49,9039	2835,100	0,25	14,125
(1+2+3)	56,2765	3199,763	40,43	14,812
(1+3)	57,6750	2753,188	24,68	13,750
(1+3+2)	53,5994	2385,375	7,75	13,812
(2)	49,8645	2828,525	0,37	13,875
(2+1)	50,9602	2809,413	0,25	13,937
(2+1+3)	57,0930	2365,950	37,37	12,500
(2+3)	51,0643	2922,025	12,43	14,750
(2+3+1)	49,4289	2667,050	1,06	14,250
(3)	51,0052	2705,400	7,87	12,187
(3+1)	51,0601	2856,350	1,37	14,000
(3+1+2)	48,9480	2774,663	0,25	13,687
(3+2)	50,9655	2816,163	0,87	13,750
(3+2+1)	49,9886	2891,713	0,37	14,187

Com base nos valores apresentados, observa-se que a diferença dos resultados entre as combinações das perturbações para cada um dos problemas são mínimas. Observando os resultados, optou-se por adotar a sequência da combinação (3 – remoção; 1 – inserção e 2 - inserção em cascata), ou seja, os três métodos de perturbações nesta ordem. Esta combinação demonstrou melhor resultado na maioria dos problemas testados.

O consumo de energia está ligado diretamente à quantidade de nós sensores que estão sendo utilizados (ativos), dessa forma, quanto mais nós ativos, maior é o consumo de energia da rede.

Testes de iterações no ILS:

Para verificar a eficiência da metaheurística ILS com relação ao número de repetições da mesma foram feitos testes com números de iterações diferentes. As repetições tiveram como base os seguintes valores: 10, 30, 50, 70, 90 e 110 conforme necessário. Os resultados estão expostos da Tabela 18 à Tabela 23. A linha da tabela em destaque identifica a quantidade de repetições aplicada para o problema específico (sendo o número de repetições que obteve o melhor resultado).

Também será exposto um gráfico de comparação entre a falha de cobertura e a quantidade de nós sensores utilizados.

Tabela 18 - Repetições da metaheurística ILS para 20 nós.

Repetições	Média Função Objetivo	Média Consumo de Energia	Média Falha de Cobertura	Média Nós utilizados	Média Tempo em segundos
10	45,5825	2832,925	21,750	12,12	0,0075
30	44,1353	2750,013	20,312	11,68	0,0232
50	44,1725	2787,375	20,875	11,87	0,0385

Tabela 19 - Repetições da metaheurística ILS para 31 nós.

Repetições	Média Função Objetivo	Média Consumo de Energia	Média Falha de Cobertura	Média Nós utilizados	Média Tempo em segundos
10	55,8263	3169,125	2,750	15,12	0,0232
30	55,7962	3244,475	2,687	15,62	0,0702
50	55,7131	3298,600	2,250	15,75	0,1202
70	54,3027	3256,813	2,250	15,43	0,1597
90	54,3199	3262,213	2,430	15,68	0,2060

Tabela 20 - Repetições da metaheurística ILS para 42 nós.

Repetições	Média Função Objetivo	Média Consumo de Energia	Média Falha de Cobertura	Média Nós utilizados	Média Tempo em segundos
10	58,0307	3213,325	2,187	15,37	0,0385
30	56,3798	3283,888	1,750	15,81	0,1127
50	56,8581	3205,225	1,500	15,25	0,1830
70	54,7184	3284,138	1,125	15,56	0,2532
90	54,5856	3297,463	1,000	15,87	0,3195
110	54,5892	3299,075	1,000	15,87	0,3385

Tabela 21 - Repetições da metaheurística ILS para 53 nós.

Repetições	Média Função Objetivo	Média Consumo de Energia	Média Falha de Cobertura	Média Nós utilizados	Média Tempo em segundos
10	52,8090	3141,613	0,250	15,37	0,0507
30	52,5211	3177,088	0,250	15,31	0,1560
50	51,7007	3082,150	0,250	15,37	0,2610
70	51,5080	3140,588	0	15,62	0,3507
90	51,5999	3168,225	0	16	0,4562

Tabela 22 - Repetições da metaheurística ILS para 60 nós.

Repetições	Média Função Objetivo	Média Consumo de Energia	Média Falha de Cobertura	Média Nós utilizados	Média Tempo em segundos
10	47,5506	2688,863	4,187	13	0,0622
30	47,0251	2913,088	0,625	14,12	0,1715
50	47,3839	2907,525	0,187	14,06	0,2845
70	46,5168	2871,088	0,812	13,81	0,3977
90	44,1041	2891,900	0	14,06	0,5067
110	44,1356	2899,075	0	14,81	0,5112

Tabela 23 - Repetições da metaheurística ILS para 85 nós.

Repetições	Média Função Objetivo	Média Consumo de Energia	Média Falha de Cobertura	Média Nós utilizados	Média Tempo em segundos
10	48,4656	2758,650	0,75	13,68	0,1130
30	45,4218	2704,462	0,25	14	0,3120
50	45,6180	2753,675	0,25	13,87	0,5147
70	45,3219	2736,263	0,25	13,62	0,7097
90	45,3169	2696,213	0,25	13,50	0,9005
110	45,3265	2940,663	0,25	14,75	1,1555

Observa-se que conforme a quantidade de repetições da metaheurística ILS aumentam para cada instância, a diferença de tempo também aumenta. Um fator importante a se observar é que conforme aumenta a quantidade de nós sensores disponíveis para a configuração da rede, torna-se necessário uma maior quantidade de iterações para se encontrar uma melhora configuração.

Testes da construção inicial da solução (de Gulosa a Aleatória):

Para avaliar a influência da construção inicial de uma solução na metaheurística ILS, é feita uma construção baseada nos métodos guloso e semialeatório. Através desta aplicação, torna-se possível identificar o quanto a construção inicial exerce influência no desempenho da metaheurística ILS.

O procedimento para variação da construção inicial é baseado na heurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) proposta por FEO and RESENDE (1995). Esta heurística é composta por uma construção inicial e uma busca local. A construção inicial é considerada como semialeatória, conforme a variação do parâmetro α fornecido.

O método aplicado para verificar a influência da construção inicial para a metaheurística ILS pode ser considerado como GRASP + ILS. A heurística GRASP constrói diferentes soluções iniciais e a busca local do método GRASP é formada pela própria metaheurística ILS.

A construção da solução inicial é feita utilizando o parâmetro α , que determina o quanto aleatório o algoritmo de construção será. O α varia de 0 até 1 onde 0.0 – totalmente gulosa e 1.0 – totalmente aleatório. Dentre a vizinhança do nó selecionado é criada uma lista de possíveis candidatos LC a serem escolhidos como seu filho. Mediante esta lista de candidatos (LC) é criada uma nova lista de candidatos restrita LCR através do parâmetro α e a partir desta LCR, é feito um sorteio para escolher um dos nós para ser o filho do nó selecionado que será o próximo nó analisado e assim sucessivamente.

Os resultados que foram encontrados através dos testes realizados, utilizaram os parâmetros de construção da variável $\alpha = (0.2, 0.4, 0.6, 0.8 \text{ e } 1.0)$. Estes resultados foram obtidos mediante resolução do problema com 42 nós e estão disponíveis na Tabela 24.

Para cada parâmetro α , foram feitos testes com números diferentes de iterações controladas pela variável $tHeur$. Este procedimento foi realizado para não prejudicar o desempenho da heurística GRASP.

Tabela 24 - Influencia na construção da solução inicial (GRASP + ILS).

Construção α	Iterações $tHeur$	Média Consumo de Energia	Média Falha de Cobertura	Média Nós utilizados	Média Tempo
0.2	05	3149,025	1,00	14,93	0,5100
	10	3147,963	1,12	14,75	1,0885
	20	3197,563	1,25	14,93	4,5530
0.4	05	3211,663	1,00	15,00	0,5315
	10	3157,850	1,00	14,62	1,3350
	20	3226,338	1,00	15,12	5,0360
0.6	05	3138,400	1,62	14,87	0,5380
	10	3167,213	1,00	14,93	1,0672
	20	3162,913	1,00	14,81	5,0562
0.8	05	3207,813	1,37	14,93	0,4952
	10	3188,275	1,00	14,93	1,1167
	20	3197,938	1,00	15,31	4,9540
1.0	05	3236,850	1,00	15,00	0,4925
	10	3159,650	1,25	14,18	1,1167
	20	3154,813	1,00	14,87	4,9837

Tabela 25 – Comparação ente os métodos (GRASP $\alpha = 0.1$ e ILS Gulosa).

Métodos	Construção α	Média Energia	Média Falha de Cobertura	Média Qtd de Nós	Média Tempos (seg.)
GRASP + ILS	1.0	3154,813	1,00	14,87	4,9837
ILS	(Guloso)	3154,238	1,00	14,60	1,3830

Como mostram os resultados encontrados na Tabela 24, observa-se que independentemente da construção da solução inicial, as soluções sempre chegaram a valores bem equivalentes. A Tabela 25 mostra uma comparação entre o método GRASP com aleatoriedade 1.0 (por ter um bom desempenho nos testes realizados) e o ILS com apenas uma construção gulosa. Observa-se que o ILS (guloso) quando comparado ao GRASP (semialeatório), teve um consumo de energia semelhante, a mesma falha de cobertura e uma quantidade média de nós sensores utilizados menor. Pode-se considerar que a fase de construção de uma solução não influencia no desempenho da metaheurística ILS. Partindo de uma construção totalmente gulosa, ou de uma construção totalmente aleatória, a metaheurística ILS encontra bons resultados através dos métodos de perturbação e busca local. Com isso, adotou-se a metaheurística ILS, utilizando uma construção inicial totalmente gulosa para execução dos demais testes.

5.2 Resultados

Os resultados computacionais de todos os 6 problemas e suas 12 instâncias geradas são exibidos nesta sessão.

A comparação dos resultados será feita entre o modelo matemático PLIM proposto por NAKAMURA (2003) que será executado no programa comercial CPLEX 12.1, que obtêm a solução ótima de cada problema; a metaheurística ILS desenvolvida neste trabalho e com a heurística GRASP, segundo ANDRADE (2009).

As comparações estão expostas em forma de topologia da rede (entre o PLIM e o ILS), em tabelas contendo os valores médios dos problema (incluindo o método GRASP) e em gráficos para melhor visualização e análise dos resultados.

Conforme apresentado na sessão 5.1, os resultados giram em torno das 12 (doze) instâncias que foram gerados, provindas dos 6 (seis) tamanhos de problemas diferentes (20, 31, 42, 53, 60 e 85 nós sensores). Os resultados finais que serão

expostos e comparados foram obtidos de uma média aritmética realizada entre as 12 instâncias dos 6 tamanhos de problemas.

Serão comparados os seguintes parâmetros de cada problema: energia consumida durante toda a configuração da rede (essa energia refere-se as topologias da rede em todos os períodos); total de nós utilizados para cobrir os pontos de demanda (será uma média de nós utilizados, podendo apresentar valores fracionados); o tempo gasto para configuração de toda a rede e seus períodos (o tempo é representado na unidade de segundos) e a falha de cobertura dos pontos de demanda (os pontos de demandas que não foram cobertos por nenhum nó sensor ativo em cada um dos períodos de configuração da rede);

É feita uma comparação da diferença percentual entre as soluções obtidas pelo dois métodos (GRASP e ILS) com base no modelo PLIM. A formula aplicada para calcular a variabilidade é (gap_i^{prob}). A variável i representa cada uma das 12 instância dos 6 problemas, representados pela variável $prob$. Essa relação é feita entre o resultado do método GRASP ou ILS (representado por f_i^{Alg}) em relação ao modelo PLIM (representado por f_i^*) para cada instância i do problema $prob$. Desta forma, pode-se obter a variação de cada solução com base na solução ótima encontrada pelo modelo PLIM.

$$gap_i^{prob} = \frac{f_i^{Alg} - f_i^*}{f_i^*} \quad (5.2.1)$$

Testes com 20 nós:

Pode-se visualizar na Figura 25 a configuração da topologia da rede para a instância 20_0 (primeira instância) do problema com 20 nós sensores. A configuração apresentada é utilizada para os 4 períodos. Para esta instância, a metaheurística ILS conseguiu encontra o mesmo resultado do modelo matemático PLIM. Para este caso o ILS conseguiu chegar à solução ótima do problema, com a mesma quantidade de nós sensores utilizados, o mesmo consumo de energia, a mesma cobertura e com um tempo computacional inferior ao do modelo PLIM.

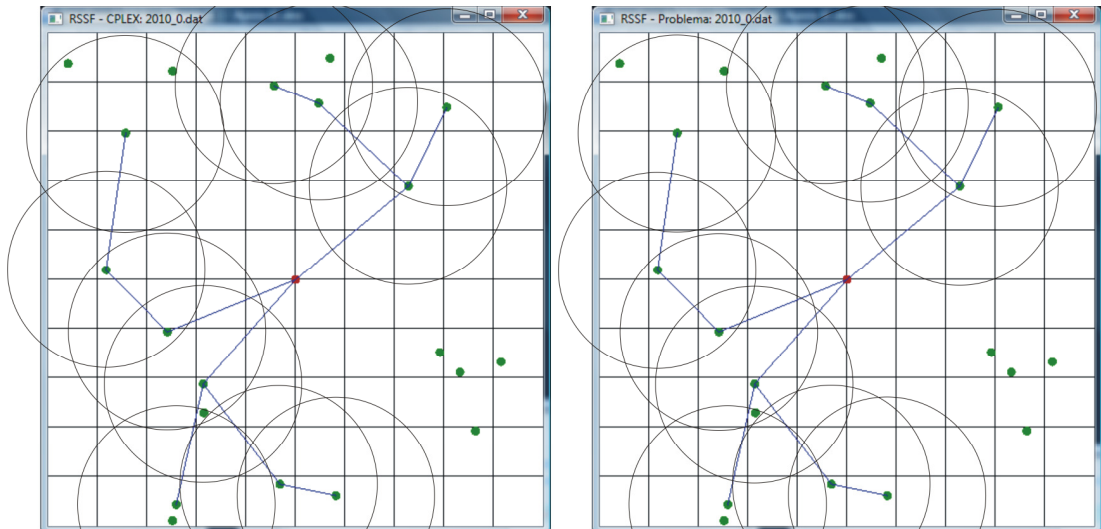


Figura 25 - Topologia da instância 20_0 para os 4 períodos, PLIM e ILS.

A Tabela 26 mostra a média final de cada uma dos métodos testados sobre o problema com 20 nós sensores, seguido dos gráficos de demonstração dos seus valores.

Tabela 26- Média dos valores com 20 nós.

Métodos	Média Energia	Média Falha de Cobertura	Média Qtd de Nós	Média Tempos (seg.)
PLIM	2577,571	24,3541	11,5208	30,26
ILS	2507,075	26,7083	10,8750	0,04
GRASP	2765,088	28,6450	11,7291	0,35

É exibida na Tabela 27 uma porcentagem de instancias que tiveram suas soluções iguais à configuração ótima da rede para os problemas com 20 nós sensores. Observa-se que o ILS conseguiu um número médio maior que o GRASP, que não conseguiu encontrar em nenhuma instância a solução ótima do modelo PLIM.

Tabela 27- Resultados iguais à solução ótima, com 20 nós.

Métodos	Solução Ótima
ILS	8,33 %
GRASP	0,00 %

A Tabela 28 mostra a diferença percentual do consumo de energia obtido pelo modelo PLIM em relação aos outros métodos propostos, ILS e GRASP. Os campos que estão marcados nas linhas representativas de cada método, indicam que nesta instância ele superou o outro método.

Tabela 28 – Diferença Percentual do consumo de energia em relação ao PLIM.

Variabilidade das Instâncias com relação ao modelo PLIM													
Métodos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
% ILS	0	0,010	0,325	0,066	-0,042	0,082	-0,172	-0,216	-0,217	0,016	-0,045	-0,171	0,030
% GRASP	0,370	0,120	0,292	0,098	-0,233	0,031	0,322	-0,199	0,013	0,054	0,094	0,013	0,081

Da mesma forma, a variabilidade da falha de cobertura exibida na Tabela 29.

Tabela 29 – Diferença Percentual da falha de cobertura em relação ao PLIM.

Percentual das Instâncias com relação ao modelo PLIM													
Métodos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
% ILS	0	0	0,012	0,086	0,255	0	0,077	0,067	5	0	0,086	0,085	0,472
% GRASP	0,035	0	0,582	0	2,021	0,288	0	0,185	0	0	0	0	0,259

Observa-se que as diferenças percentuais dos métodos ILS e o GRASP com relação ao modelo ótimo ficaram próximas. Para algumas instâncias, a variabilidade ficou próximo de zero, em outras ficaram abaixo de zero, isso indica que houve uma menor utilização dos nós sensores, proporcionando um menor consumo de energia. Para o consumo de energia o ILS conseguiu se manter mais próximo das soluções ótimas do modelo ótimo, já em relação à falha de cobertura o GRASP teve uma maior aproximação média da solução ótima.

Testes com 31 nós:

Nos testes realizados com 31 nós sensores, as topologias das redes para todos os problemas executados pelo modelo PLIM e pelo ILS ficaram equivalentes, tanto em consumo de energia quanto em quantidade de nós sensores utilizados, e com a mesma falha de cobertura. A Figura 26 exibe a topologia para os quatro períodos de tempo da rede encontrada pelo modelo matemático PLIM e pelo ILS para a primeira instância do problema com 31 nós. Pode-se observar que as configurações das redes ficaram idênticas, garantindo o mesmo roteamento, quantidade de nós utilizados e cobertura.

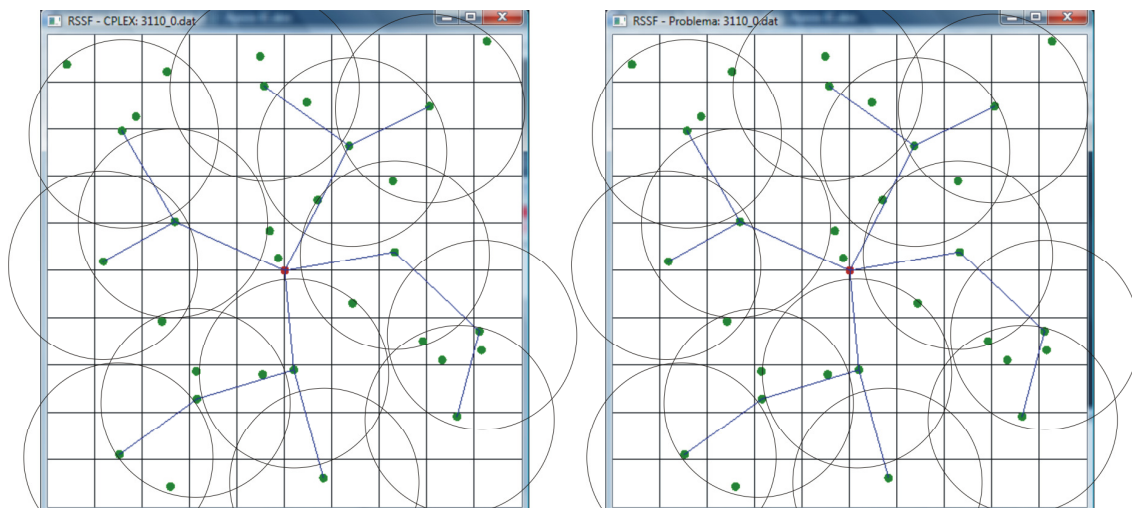


Figura 26 - Topologia da instância 31_0 para os 4 períodos, PLIM e ILS.

Se comparados ao método ILS, para esse problema o GRASP conseguiu um número médio maior em soluções ótimas. Mesmo com essa diferença, observa-se que o ILS conseguiu soluções bem similares ao modelo PLIM, como mostra a Tabela 30.

Tabela 30- Média dos valores com 31 nós.

Métodos	Média Energia	Média Falha de Cobertura	Média Qtd de Nós	Média Tempos (seg.)
PLIM	3150,675	2,41	14,64	18,33
ILS	3238,700	2,41	15,10	0,15
GRASP	3233,588	2,41	14,60	2,50

A Tabela 31 mostra a porcentagem de soluções que conseguiram encontrar a mesma solução ótima do modelo PLIM. Entre as 12 instâncias, o ILS conseguiu um número menor de resultados iguais ao do modelo ótimo.

Tabela 31- Resultados iguais à soluções ótimas, com 31 nós.

Métodos	Solução Ótima
ILS	16,66 %
GRASP	25,00 %

A diferença percentual do consumo de energia de todas as instâncias para este problema com 31 nós está exibida na Tabela 32. Houve uma pequena variação com relação à solução ótima. Para esse problema o ILS teve uma menor variação média de energia em relação à solução ótima.

Tabela 32 – Diferença Percentual do consumo de energia em relação ao PLIM.

Percentual das Instâncias com relação ao modelo PLIM													
Métodos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
% ILS	0	0,044	1,519	0,047	0,013	0,008	0,006	0,071	0,069	0,035	0,015	0,001	0,152
% GRASP	0	0,066	1,519	0,046	0,014	0,003	-0,001	0,032	2,659	0,003	0,106	0,032	0,373

A diferença em relação à falha de cobertura para este problema com 31 nós sensores foi zero para todas as instâncias. Todas as instâncias não tiveram falha de cobertura, alcançando assim a solução ótima.

Testes com 42 nós:

Com o problema com 42 nós sensores, as soluções encontrada pelo ILS em comparação com às soluções encontradas pelo modelo matemático PLIM ficaram similares, conseguindo encontrar até mesmo soluções iguais. Os métodos tiveram valores bem próximos entre si, chegando a uma mesma cobertura e utilizando uma média de nós sensores bem próxima. O tempo foi o fator que mais distancia os resultados dos métodos.

As diferenças na configuração da rede são comprovadas pelas médias de todas as instâncias testadas. Como mostra a Figura 27, o método ILS também encontrou solução igual ao modelo ótimo (conferir na Tabela 34).

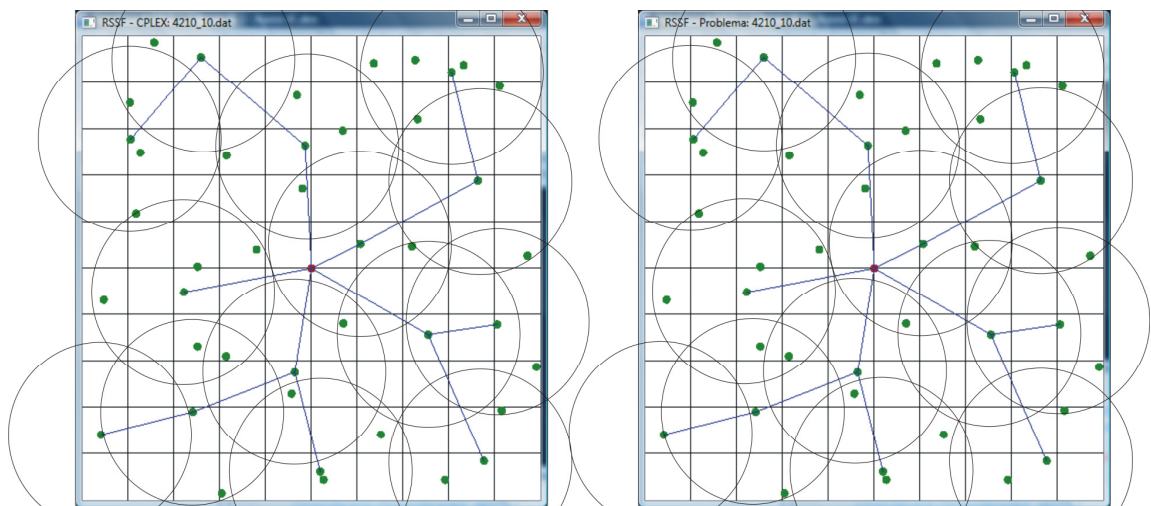


Figura 27 - Topologia da instância 4210_10 para os 4 perídos, PLIM e ILS.

A média dos resultados das 12 instâncias do problema com 42 nós sensores estão expostos na Tabela 33.

Tabela 33 - Média dos valores com 42 nós.

Métodos	Média Energia	Média Falha de Cobertura	Média Qtd de Nós	Média Tempos (seg.)
PLIM	3084,179	0,75	14,20	287,56
ILS	3213,625	0,75	14,95	0,26
GRASP	3186,000	0,75	14,43	4,98

A Tabela 34 mostra a porcentagem de soluções que ficaram iguais à solução ótima encontrada pelo PLIM para esse problema com 42 nós, onde o ILS consegue um número médio maior sobre o método GRASP.

Tabela 34- % de soluções ótimas, com 42 nós.

Métodos	Solução Ótima
ILS	8,33 %
GRASP	0,00 %

A diferença percentual do consumo de energia para o problema com 42 nós sensores foi melhor com o método ILS em quase todas as instâncias. Observa-se que em apenas duas instâncias o GRASP conseguiu obter um consumo de energia inferior ao método ILS (mais próximo do modelo ótimo).

Tabela 35 – Diferença Percentual do consumo de energia em relação ao PLIM.

Percentual das Instâncias com relação ao modelo PLIM													
Métodos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
% ILS	0,031	0,086	0,039	0,015	0,028	0,014	0,031	0,086	0,039	0,015	0,028	0,014	0,035
% GRASP	0,052	0,068	0,044	0,019	0,081	0,026	0,052	0,068	0,044	0,019	0,081	0,026	0,048

A diferença percentual da falha de cobertura dos métodos ILS e GRASP com o modelo ótimo ficaram iguais, todos não tiveram nenhuma falha de cobertura.

Com pode ser observado, a variabilidade dos métodos ILS e GRASP com relação ao modelo PLIM ficaram bem equivalentes. O ILS, para este problema, conseguiu resultados melhores se comparados ao GRASP, ficando mais próximo da solução ótima.

Testes com 53 nós:

Os testes feitos com uma rede de 53 nós obteve resultados favoráveis principalmente com relação à cobertura dos pontos de demanda. Conforme a

quantidade de nós disponíveis para se configurar uma rede aumenta, torna-se mais penoso para o modelo matemático encontrar a solução ótima com um baixo tempo computacional. O esforço computacional empenhado pelo modelo matemático para se chegar ao resultado ótimo começa a torna-lo menos viável, mesmo encontrando a solução ótima. Por outro lado, em relação à cobertura, quanto mais nós disponíveis para se configurar uma rede, aumenta-se a perspectiva de uma total cobertura da área.

A Figura 28 exibe a configuração da rede para uma instância do problema com 53 nós sensores disponíveis. Observa-se que as configurações geradas pelo método ILS tiveram, em uma grande parte, configuração idêntica à encontrada pelo modelo matemático. Pode-se dizer que o ILS chegou bem próximo da solução ótima.

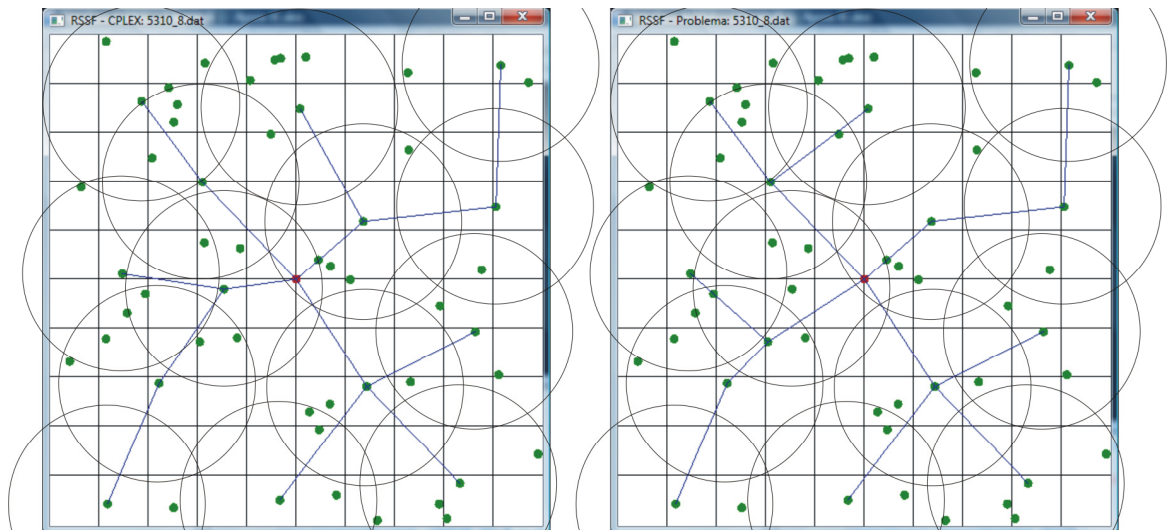


Figura 28 - Topologia da instância 5310_0 para os 4 períodos, PLIM e ILS.

Foram feiras as médias entre todos os problemas com 53 nós sensores. Pode-se observar uma grande similaridade dos resultados, principalmente com relação à falha de cobertura, que foi zero. O tempo médio empenhado para resolver todas as instâncias deste problema com 53 nós começa a diferenciar de forma mais acentuada. O ILS resolve todas as instâncias do problema em um tempo médio inferior aos outros dois métodos apresentados (GRASP e PLIM).

Tabela 36 - Média dos valores com 53 nós.

Métodos	Média Energia	Média Falha de Cobertura	Média Qtd de Nós	Média Tempos (seg.)
PLIM	2948,467	0	14,08	1907,679
ILS	3056,779	0	14,72	0,409
GRASP	3132,550	0	14,35	8,435

A porcentagem de soluções que conseguiram chegar à mesma solução ótima encontrada pelo modelo PLIM é igual a zero. Dentre todas as instâncias do problema com 53 nós executadas pelo ILS ou pelo GRASP, em nenhuma delas foi possível encontrar a solução ótima, apesar de que em algumas instâncias a diferença da solução ótima foi mínima.

A diferença percentual do consumo de energia de todas as instâncias com relação à solução ótima está exposta na Tabela 37. Observa-se que em sua maioria o ILS superou o GRASP, conseguindo valores mais próximos da solução ótima.

Tabela 37 – Diferença Percentual do consumo de energia em relação ao PLIM.

Percentual das Instâncias com relação ao modelo PLIM													
Métodos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
% ILS	0,072	0,023	0,042	0,042	0,003	0,011	0,020	0,046	0,001	0,074	0,022	0,081	0,036
% GRASP	0,128	0,047	0,058	0,064	0,059	0,025	0,087	0,057	0,050	0,099	0,033	0,042	0,062

A diferença percentual em relação à falha de cobertura se encontra estabilizada devido uma quantidade maior de nós sensores disponíveis a cobrir toda a área. Neste ponto os métodos ILS e GRASP ficam iguais.

Testes com 60 nós:

Nos testes feitos para o problema com 60 nós sensores, foram adotados os mesmos procedimentos anteriores. Para esse problema pode-se observar uma maior similaridade entre resultados, onde a falha de cobertura ficou igual a zero, a quantidade de nós utilizados ficaram equivalentes e houve uma grande diferença com relação ao tempo computacional gasto pelo ILS, em relação ao modelo PLIM e ao GRASP.

Devido o grande esforço computacional empenhado pelo modelo PLIM em executar os problemas maiores de forma completa, foi estipulado o limite de 2 horas e 30 minutos para se obter a solução ótima, caso não concluísse a execução o mesmo era interrompido. Para a terceira instância deste problema com 60 nós o modelo PLIM não conseguiu obter a solução ótima durante o prazo estabelecido e foi interrompida manualmente (de forma abrupta), obtendo assim uma solução viável. Para as outras instâncias foi possível chegar à solução ótima.

Conforme observado na Figura 29, as configurações da rede entre o modelo PLIM e o ILS para todos os períodos ficaram semelhantes.

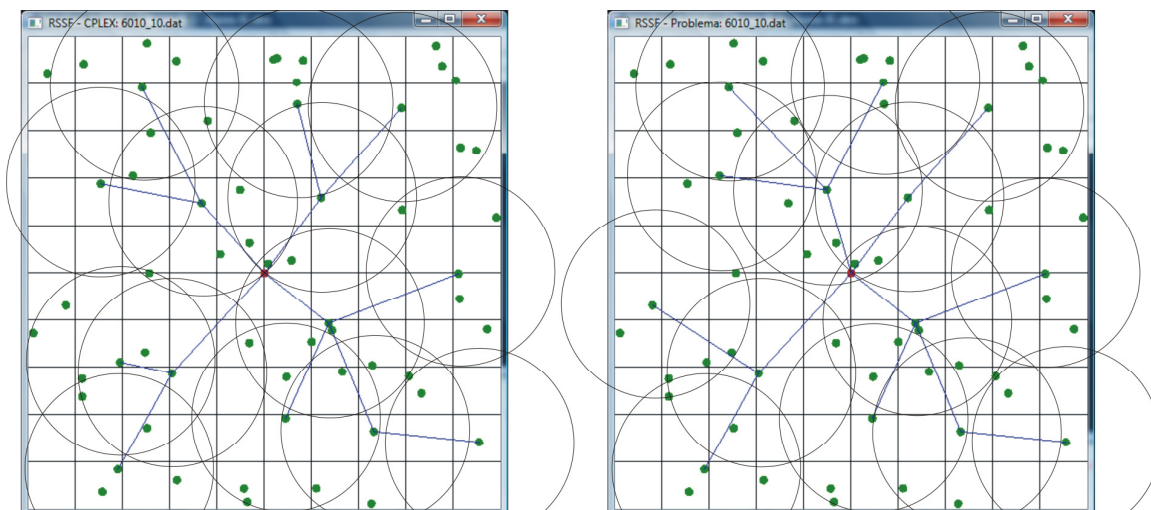


Figura 29 - Topologia da instância 6010_10 para os 4 períodos, PLIM e ILS.

Tabela 38- Média dos valores com 60 nós.

Métodos	Média Energia	Média Falha de Cobertura	Média Qtd de Nós	Média Tempos (seg.)
PLIM	2834,467	0,16	13,5	4745,103
ILS	2952,558	0,16	14,18	0,489
GRASP	3058,942	0	13,85	11,333

Como no problema anterior, a porcentagem de instâncias onde foi possível encontraram a solução ótima foi zero.

A diferença percentual do consumo de energia do problema com 60 nós em relação ao modelo PLIM teve um diferencial. Todas as soluções encontradas pelo ILS ficaram mais próximas das soluções ótima.

Tabela 39 – Diferença Percentual do consumo de energia em relação ao PLIM.

Percentual das Instâncias com relação ao modelo PLIM													
Métodos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
% ILS	0,046	0,018	0,081	0,114	0,073	0,034	0,003	0,031	0,036	0,041	0,017	0,003	0,041
% GRASP	0,086	0,052	0,091	0,123	0,080	0,095	0,089	0,071	0,095	0,044	0,104	0,022	0,079

Com relação ao percentual da falha de cobertura deste problema, houve uma diferença com relação ao método GRASP, uma vez que o mesmo teve melhor cobertura em relação ao modelo PLIM em uma instância.

Tabela 40 – Diferença Percentual da falha de cobertura em relação ao PLIM.

Métodos	Percentual das Instâncias com relação ao modelo PLIM											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
% ILS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
% GRASP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1

Testes com 85 nós:

Os testes com 85 nós sensores foram executados semelhantes aos anteriores. Devido o grande esforço computacional empenhado para se encontrar solução ótima pelo modelo matemático PLIM, algumas instâncias não conseguiram chegar a esse valor em um baixo tempo computacional, sendo interrompidas manualmente (de forma abrupta). Devido esse fator, foi estipulado um limite de 5 horas para cada instância deste problema encontrar a solução ótima, após esse prazo, a mesma era interrompida. A sexta e a décima instância não conseguiu encontrar o valor ótimo no prazo de execução estabelecido, sendo interrompida e analisados seus resultados.

A Figura 30 exibe a configuração da segunda instância deste problema com 85 nós sensores. Observa-se que a topologia da redes do ILS ficou bem próxima à do modelo matemático PLIM. Apesar do roteamento ter ficado levemente diferente, toda a área foi coberta sem nenhuma falha de cobertura para todos os períodos de tempo.

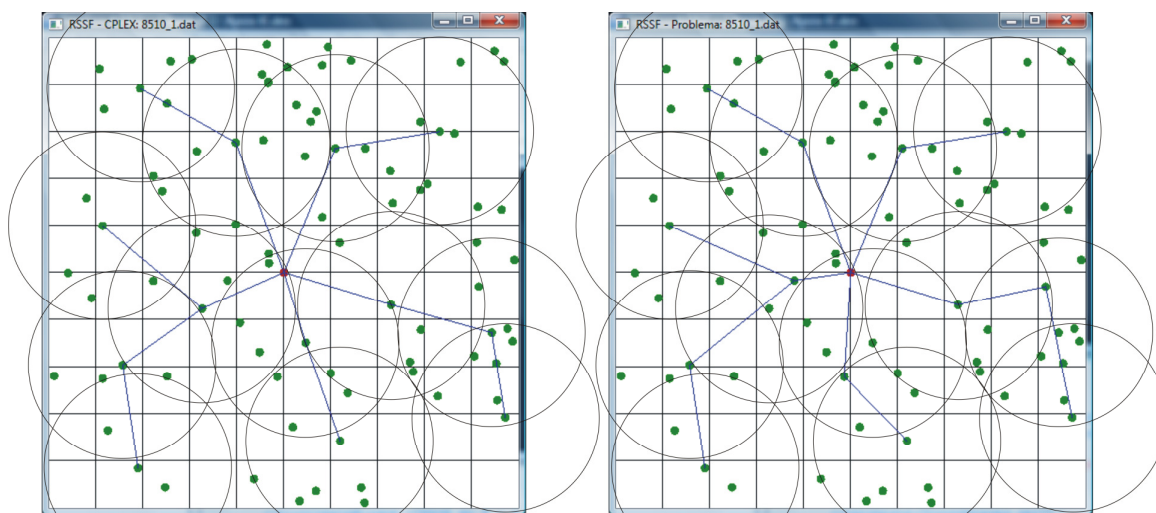


Figura 30 - Topologia da instância 8510_1 para os 4 períodos, PLIM e ILS.

Os valores médios de cada parâmetro do problema com 85 nós estão expostos na

Tabela 41. O consumo de energia dos nós sensores e a quantidade média de nós utilizados ficaram equivalentes. A falha de cobertura do GRASP superou os métodos ILS e PLIM, mas, o tempo computacional do ILS consegue alcançar uma diferença cada vez maior.

Tabela 41- Média dos valores com 85 nós.

Métodos	Média Energia	Média Falha de Cobertura	Média Qtd de Nós	Média Tempos (seg.)
PLIM	2727,667	0,333	13,583	14958,66
ILS	2861,104	0,166	14,104	0,90
GRASP	3037,154	0	13,916	32,57

A porcentagem de instâncias que ficaram iguais à solução ótima foi zero. Nenhuma instância encontrou o mesmo valor do modelo matemático PLIM.

Com relação à diferença percentual do consumo de energia do ILS e do GRASP em relação ao modelo PLIM, em nenhuma foi encontrado o valor ótimo. Em apenas uma instância o GRASP conseguiu um melhor consumo de energia comparado ao ILS. Em todas as outras instâncias o ILS conseguiu chegar mais próximo da solução ótima.

Tabela 42 – Diferença Percentual do consumo de energia em relação ao PLIM.

Percentual das Instâncias com relação ao modelo PLIM													
Métodos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Média
% ILS	0,026	0,005	0,048	0,023	0,085	0,038	0,095	0,020	0,014	0,141	0,028	0,024	0,042
% GRASP	0,047	0,186	0,186	0,076	0,171	0,089	0,066	0,104	0,119	0,142	0,137	0,056	0,114

A diferença percentual da falha de cobertura para o problema com 85 nós teve uma diferença com relação aos métodos GRASP e ILS. Apesar de ter obtido um maior consumo de energia, a heurística GRASP conseguiu uma melhor cobertura da área para duas instâncias, se comparado ao modelo ótimo. O ILS e o GRASP tiveram a mesma cobertura em uma instância, ficando com uma melhor cobertura se comparada ao modelo PLIM.

Tabela 43 – Diferença Percentual da falha de cobertura em relação ao PLIM.

Percentual das Instâncias com relação ao modelo PLIM													
Métodos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
% ILS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
% GRASP	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido as redes de sensores sem fio estarem sendo utilizadas em várias situações, é necessária a utilização de heurísticas e/ou metaheurísticas que resolvam problemas de forma aproximada. Esta utilização é viável devido ao grande ganho com relação ao tempo computacional em resolver problemas. Essas abordagens podem chegar a valores bem próximos e às vezes conseguindo chegar às soluções ótimas encontradas pelos modelos matemáticos.

A partir dos resultados obtidos mediante os testes computacionais realizados sobre as instâncias do problema de cobertura, conectividade e roteamento em RSSF, verificou-se que é de grande proveito a utilização de uma metaheurística para resolver este problema. Uma vez que os resultados encontrados pela metaheurística ILS (aplicada neste trabalho) ficaram equivalentes aos resultados obtidos pelo modelo matemático PLIM, por NAKAMURA (2003), e executado pelo programa comercial CPLEX (que fornece a solução ótima), tornando-se viável a aplicação deste método para conseguir configurar redes cada vez maiores em um baixo tempo computacional.

O método proposto por ANDRADE (2009) utilizando uma heurística GRASP também foi testado com as mesmas instâncias utilizadas pelo método ILS e pelo modelo matemático PLIM. Observou-se que esse método GRASP é capaz de encontrar uma boa configuração com um tempo computacional bem inferior ao do modelo PLIM.

Como visto nos resultados obtidos no Capítulo 5, sessão 5.2, quanto mais nós sensores estavam disponíveis para configurar uma rede sobre a área a ser monitorada, maior o tempo computacional que o modelo matemático utilizava para conseguir chegar à solução ótima, senso assim, a metaheurística ILS consegue encontrar uma solução aproximada ou até mesmo igual à do modelo ótimo com um tempo bem inferior ao do modelo matemático.

Pode-se dizer que a metaheurística ILS, como método adotado para solucionar o problema proposto, teve um bom desempenho na busca de soluções próximas à solução ótima. Na média, os resultados ficaram bem próximos aos valores da solução ótima, e em algumas instâncias dos problemas conseguiu-se obter a mesma solução encontrada pelo modelo matemático PLIM. Dessa forma pode-se concluir que o ILS abordado neste trabalho consegue um bom desempenho em sua utilização se

comparada ao modelo matemático PLIM e uma melhora em relação ao tempo computacional, se comparada ao método heurístico GRASP.

6.1 Trabalhos Futuros

Devido aos resultados que foram encontrados neste trabalho, alguns outros testes podem ser realizados incluindo novos parâmetros e valores que venham a consolidar ainda mais o desempenho do método utilizado para o problema de cobertura, conectividade e roteamento em RSSF.

Outro estudo a ser feita é a abordagem deste mesmo problema na forma mono-objetivo, considerado apenas um objetivo a ser otimizado, fazendo novos testes com o algoritmo e o modelo matemático de PLIM adaptado para satisfazer apenas um objetivo.

Uma configuração da rede com diferentes nós sensores, saindo assim da configuração de uma rede homogênea também deve ser avaliada. Fazer testes com outros nós sensores que tenham consumo de energia e raio de alcance diferentes; procurando reduzir custos com os nós sensores, utilizando alguns nós que tenham uma potencia maior combinados a outros menos potentes, mas que continue atendendo as necessidades da rede.

Implementar algumas alterações na utilização da metaheurística ILS, fazer combinações com outros métodos disponíveis na literatura (tais como: VND; VNS e outros), buscando ganhos maiores com estas combinações e procurando aumentar o desempenho em relação à configuração da rede e principalmente ao consumo de energia da mesma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, I. B. D. NAKAMURA, F. G. MATEUS, G. R. Uma Abordagem Multi-período para a Solução do Problema de Cobertura e Conectividade em Redes de Sensores Sem Fio Planas. XL SBPO, Setembro 2008.
- ANDRADE, I. B. D. NAKAMURA, F. G. Uma heurística GRASP para o Controle de Densidade: Resolvendo o Problema de Cobertura e Roteamento Multi-Período em Redes de Sensores Sem Fio Plana. XLI SBPO, Setembro 2009.
- ANDRADE, I. B. D. JANUARIO, T. O. PAPA, G. L. MATEUS, G. R. An Evolutionary Algorithm to the Density Control, Coverage and Routing Multi-Period Problem in Wireless Sensor Networks, ©2010 IEEE.
- AKYILDIZ, I.F. SU, W. SANKARASUBRAMANIAM, Y. CAYIRCI, E. Wireless sensor networks: a survey. Published by Elsevier Science B.V. 2002.
- BHARATHIDASAN, A. PONDURU, V. A. S. Sensor Networks: An Overview. 2003.
- BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimisation: Overview and conceptual comparison. Technical Report 13, Université Libre de Bruxelles, 2001.
- CROSSBOW. MICA2 - Wireless Measurement System. Source. XBOW 6020-0042-04, Crossbow Technology, 2006. <http://www.xbow.com/>. Outubro 2010.
- CUGNASCA, C. E. Redes de Sensores Sem Fio. Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão (ConBAP), 2008.
- DEB K. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms, Jon Wiley e Sons, New York, July 2001. ISBN: 978-0-471-87339-6.
- ESTRIN, D. GIROD, L. POTTIE, G. e SRIVASTAVA, M. Instrumenting the world with wireless sensor networks. In ICASSP, May 2001.

- FACCIOLI R. A. Algoritmo Híbrido Multi-Objetivo para Predição de Estrutura Terciária de Proteínas. Tese de Mestrado USP, 2007.
- FEO, T. A. and RESENDE, M. G. C. (1995). Greedy randomized adaptive search procedures. In *Journal of Global Optimization*, volume 6, pages 109–133.
- GAUCH H. G. Multivariate analysis in community ecology. Cambridge: Cambridge University Press, 1982. 298p.
- HOLLAR, S. Cots dust. Master's thesis, University of California - Berkeley, 1996.
- HUANG, C. and TSENG, Y. The coverage Problem in a Wireless Sensor Network. In *Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Wireless Sensor Networks and Applications 2003*.
- IAN F. A. WEILIAN S. YOGESH S. and ERDAL C. A Survey on Sensor Networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002.
- IBM. ILOG Optimization Fonte: <http://www.ibm.com/developerworks/websphere/zones/optimization/>, Março 2010.
- LOUREIRO, A. Ruiz, L. Mini, R. Rede de Sensores Sem Fio. In *Simpósio Brasileiro de Computação – Jornada de Atualização de Informática*, 2002.
- LOURENÇO, H.R.; MARTIN, O.; STÜTZLE, T. Iterated Local Search. In F. GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G., editors, *Handbook of Metaheuristics*, p. 321–353. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 2002.
- MARTINS, F. V. C. Heurísticas Mono e Multiobjetivo Para o Problema de Cobertura e Conectividade de Redes de Sensores Sem Fio Planas. UFMG, Ago. 2009.
- NAKAMURA, F. G. Planejamento Dinâmico para Controle de Cobertura e Conectividade em Redes de Sensores Sem Fio Plana. Tese de Mestrado UFMG, 2003.
- NAKAMURA, F. G. QUINTÃO F. P. MENEZES G. C. and MATEUS G. R. An Optimal Node Scheduling for Flat Wireless Sensor Networks. In *4th International Conference on Networking - Lecture Notes in Computer Science*, volume 3420, pages 104–483, 2005.

PAPPA G. L. Seleção de Atributos Utilizando Algoritmos Genéticos Multi-Objetivos. Tese de Mestrado PUCPR, 2002.

PROCESSADOR ATMEL. Ano 2001. Fonte: <http://www.atmel.com/atmel/acrobat/doc1041.pdf>, Setembro 2010.

QUINTÃO, F. NAKAMURA, F. G. e MATEUS, G. A hybrid approach to solve the coverage and connectivity problem in wireless sensor networks. *Journal of the Operational Research Society/Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*. 2005.

REZENDE, J. F. Redes de Sensores sem Fio. Ano 2004. Fonte: <http://www.gta.ufrj.br/~rezende/cursos/eel879/trabalhos/rssf1/principal.htm>, Setembro 2010.

ROCA I. MORAES F. KOFUJI S. T. Aplicações das Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) na Engenharia Naval e Oceânica. Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo, 2007. Disponível em <http://www.ipen.org.br/downloads/XX/2G/APLICACOES.pdf>, Outubro 2010.

RUSSEL S. e NORVING P. Inteligência Artificial, 2007. Fonte: www.din.uem.br/~jmpinhei/SI/07BuscaLocal.pdf, Outubro 2010.

SENSORS. <http://www.sensorsmag.com/networking-communications/tinyos-operating-system-design-wireless-sensor-networks-918>, QUESTEX MIDIA GROUP LLC, 2010. Outubro 2010.

SRIVASTAVA, M. B., MUNTZ, R. R., e POTKONJAK, M. Wireless networks for smart developmental problem-solving environments. In *Mobile Computing and Networking*, pages 132–138. Smart kindergarden: sensor-based, 2001.

SIQUEIRA, I. G. Um Serviço de Gerenciamento para Controle de Densidade de Redes de Sensores Sem Fio, 2002.

TAVARES, P. L. Redes de Sensores Sem-fio. Ano 2002. Fonte: http://www.gta.ufrj.br/grad/02_2/Redes%20de%20sensores/Redes%20de%20Sensores%20Sem-fio.htm, Setembro 2010.

TICONA, W. G. C. Aplicação de Algoritmo Genético Multi-Objetivo para Alinhamento de Sequências Biométricas. Tese de Mestrado USP – São Paulo (2003).

UTZIG J. T. Redes de Sensores Sem Fio – Um Estudo Teórico com Experimentação via Simulação. Centro Universitário Feevale, 2007.

Zhang, H. and Hou, J. (2005). Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, 1(1-2).

APÊNDICE A

Nesta parte são apresentadas as tabelas com os resultados encontrados em cada uma das 12 instâncias de cada uma dos 6 tamanhos. Para cada período são exibidas as configurações da rede como: a quantidade de nós, a falha de cobertura e a energia gasta. Esses valores são comparados com os resultados encontrados pelo modelo do PLIM executados no CPLEX, com a metaheurística ILS e a heurística GRASP.

Os identificadores das colunas estão codificados como:

Inst. = Nome da instância de testes;

P = Qual período da configuração;

N = Número de nós sensores utilizados na configuração;

FC = Falha de cobertura da área monitorada;

Energia = energia gasta no período.

Problema com 20 Nós (área de 100m²):

Parâmetros para o ILS:

$$\beta = 1.0$$

Repetições ILS (*n*ILS): 30

Combinações de Perturbações: 3 – remoções; 1 – inserção; 2 – inserção em cascata;

Critério de aceitação: menor consumo de energia;

Parâmetros para o GRASP:

$$\beta \text{ (desligar um nó)} = 1.0$$

$$\alpha \text{ (construção semialeatória GRASP)} = 0.5$$

$$\text{BMAX (repetições da Busca Local)} = 10$$

$$\text{GMAX (repetições da heurística GRASP)} = 5$$

Tabela 44 - Resultados das 12 instâncias com 20 nós.

		PLIM			ILS			GRASP		
Inst.	P	N	FC	Energia	N	FC	Energia	N	FC	Energia
20_0	1	11	28	687,05	11	28	687,05	16	28	1156,90
	2	11	28	577,05	11	28	577,05	12	29	645,30
	3	11	28	577,05	11	28	577,05	12	29	660,50
	4	11	28	577,05	11	28	577,05	13	30	872,95
Total		-	-	2418,20	-	-	2418,20	-	-	3335,65
20_1	1	12	12	702,95	12	12	705,85	12	12	716,30
	2	12	12	582,95	12	12	585,85	12	12	599,30
	3	12	12	582,95	12	12	585,85	12	12	582,95
	4	12	12	582,95	12	12	602,05	16	12	852,00
Total		-	-	2451,80	-	-	2480,05	-	-	2750,55
20_2	1	9	31	591,05	14	11	1286,40	19	6	1597,80
	2	11	18	734,85	15	11	1146,40	19	7	1539,30
	3	13	12	920,40	15	11	1121,90	7	56	382,85
	4	11	18	714,85	7	47	369,45	6	56	306,80
Total		-	-	2961,15	-	-	3924,15	-	-	3826,75
20_3	1	11	26	620,50	10	29	577,65	13	26	832,00
	2	11	26	510,50	10	29	477,65	11	26	510,50
	3	11	26	510,50	10	29	477,65	11	26	510,50
	4	11	26	510,50	11	26	521,95	11	26	510,50
Total		-	-	2152,00	-	-	2054,90	-	-	2363,50
20_4	1	11	23	692,55	13	9	959,45	15	5	1077,65
	2	14	6	915,45	13	9	869,45	15	5	927,65
	3	14	6	875,45	13	9	869,45	5	66	241,60
	4	13	12	761,70	9	32	449,45	5	66	241,60
Total		-	-	3245,15	-	-	3107,80	-	-	2488,50
20_5	1	11	22	714,70	11	22	714,70	12	22	777,50
	2	10	25	520,50	10	25	599,75	12	22	657,50
	3	10	25	520,50	10	25	599,75	11	22	604,70
	4	10	25	520,50	10	25	550,35	6	59	308,25
Total		-	-	2276,20	-	-	2470,05	-	-	2347,95
20_6	1	9	45	622,30	8	47	541,60	11	45	839,40
	2	9	45	532,30	6	51	374,30	11	45	729,40
	3	9	45	532,30	6	51	374,30	8	45	572,20
	4	9	45	548,35	9	45	559,35	10	45	814,40
Total		-	-	2235,25	-	-	1849,55	-	-	2955,40
20_7	1	9	47	613,65	9	47	649,00	10	42	710,85
	2	11	42	757,30	9	47	569,00	12	42	733,75
	3	11	42	722,45	7	48	439,05	9	45	525,95
	4	9	47	564,20	7	48	424,75	3	82	156,85
Total		-	-	2657,60	-	-	2081,80	-	-	2127,40
20_8	1	16	2	958,00	11	12	638,25	16	2	974,05
	2	16	2	798,00	15	12	688,25	16	2	813,20
	3	16	2	798,00	13	12	608,25	16	2	798,00
	4	16	2	798,00	15	12	688,25	16	2	811,90
Total		-	-	3352,00	-	-	2623,00	-	-	3397,15

20_9	1	15	6	938,40	16	6	953,25	15	6	926,20
	2	15	6	786,20	16	6	793,25	16	6	870,85
	3	15	6	776,90	16	6	793,25	16	6	843,95
	4	15	6	776,20	16	6	793,25	15	6	815,15
Total		-	-	3277,70	-	-	3333,00	-	-	3456,15
20_10	1	11	26	620,50	10	29	577,65	11	26	620,50
	2	11	26	510,50	10	29	477,65	13	26	714,70
	3	11	26	510,50	10	29	477,65	11	26	510,50
	4	11	26	510,50	11	26	521,95	11	26	510,50
Total		-	-	2152,00	-	-	2054,90	-	-	2356,20
20_11	1	9	47	505,45	7	51	415,45	9	47	549,30
	2	9	47	415,45	7	51	345,45	9	47	430,65
	3	9	47	415,45	7	51	345,45	8	47	365,25
	4	9	47	415,45	7	51	345,45	8	47	365,25
Total		-	-	1751,80	-	-	1451,80	-	-	1710,45

Tabela 45 - Tempo das 12 instâncias com 20 nós.

Instância	PLI M	ILS	GRASP
20_0	0,64	0,03	0,16
20_1	0,65	0,06	0,62
20_2	61,31	0,04	0,31
20_3	0,56	0,06	0,34
20_4	7,18	0,04	0,47
20_5	1,14	0,06	0,40
20_6	0,31	0,03	0,10
20_7	289,09	0,03	0,15
20_8	0,44	0,04	0,52
20_9	1,04	0,04	0,69
20_10	0,56	0,06	0,34
20_11	0,2	0,03	0,11
Média	30,26	0,04	0,35

Problema com 31 Nós (área de 100m²):

Parâmetros para o ILS:

 β para desligar um nó = 1.0Repetições ILS (*n*ILS): 70

Combinações de Perturbações: 3 – remoções; 1 – inserção; 2 – inserção em cascata;

Critério de aceitação: menor consumo de energia;

Parâmetros para o GRASP:

 β (desligar um nó) = 1.0 α (construção semialeatória GRASP) = 0.5

BMAX (repetições da Busca Local) = 10

GMAX (repetições da heurística GRASP) = 5

Tabela 46 - Resultados das 12 instâncias com 31 nós.

Inst.	PLIM				ILS			GRASP		
	P	N	FC	Energia	N	FC	Energia	N	FC	Energia
31_0	1	13	1	766,00	13	1	766,00	13	1	766,00
	2	13	1	636,00	13	1	636,00	13	1	636,00
	3	13	1	636,00	13	1	636,00	13	1	636,00
	4	13	1	636,00	13	1	636,00	13	1	636,00
Total		-	-	2674,00	-	-	2674,00	-	-	2674,00
31_1	1	15	2	977,90	16	2	1020,45	16	2	1101,80
	2	15	2	826,80	16	2	858,00	16	2	904,60
	3	15	2	827,35	16	2	860,45	15	2	846,80
	4	15	2	828,85	16	2	875,00	15	2	839,45
Total		-	-	3460,90	-	-	3613,90	-	-	3692,65
31_2	1	15	3	866,55	15	3	866,55	15	3	866,55
	2	15	3	716,55	15	3	716,55	15	3	716,55
	3	15	3	716,55	15	3	716,55	15	3	716,55
	4	15	3	716,55	15	3	716,55	15	3	716,55
Total		-	-	3016,2	-	-	3016,20	-	-	3016,20
31_3	1	16	3	924,55	16	3	970,70	16	3	969,60
	2	16	3	774,55	16	3	810,70	16	3	809,60
	3	16	3	774,55	16	3	810,70	16	3	809,60
	4	16	3	774,55	16	3	811,60	16	3	809,60
Total		-	-	3248,20	-	-	3403,70	-	-	3398,40
31_4	1	16	3	995,40	15	3	969,70	15	3	969,70
	2	16	3	835,40	15	3	856,85	15	3	819,70
	3	16	3	849,95	15	3	846,85	15	3	911,20
	4	16	3	849,95	15	3	905,60	15	3	881,20
Total		-	-	3530,70	-	-	3579,00	-	-	3581,80

31_5	1	14	0	883,80	15	0	896,50	14	0	880,30
	2	14	0	740,30	15	0	746,50	14	0	743,80
	3	14	0	740,30	15	0	746,50	14	0	740,30
	4	14	0	743,80	15	0	746,50	14	0	753,30
Total		-	-	3108,20	-	-	3136,00	-	-	3117,70
31_6	1	14	5	817,45	14	5	816,55	14	5	816,55
	2	14	5	677,45	14	5	676,95	14	5	676,55
	3	14	5	677,45	14	5	686,95	14	5	676,55
	4	14	5	677,45	14	5	686,95	14	5	676,55
Total		-	-	2849,80	-	-	2867,40	-	-	2846,20
31_7	1	17	1	1047,25	18	1	1108,85	15	1	1008,50
	2	17	1	877,25	18	1	928,85	15	1	858,50
	3	17	1	877,25	18	1	928,85	16	1	895,45
	4	16	1	833,15	17	1	926,75	16	1	989,10
Total		-	-	3634,90	-	-	3893,30	-	-	3751,55
31_8	1	15	2	965,45	17	2	1044,35	15	2	965,45
	2	15	2	815,45	17	2	874,35	15	2	815,45
	3	15	2	815,45	17	2	874,35	15	2	815,45
	4	15	2	831,15	17	2	874,35	15	2	831,15
Total		-	-	3427,50	-	-	3667,40	-	-	3427,50
31_9	1	13	4	807,40	14	4	835,35	13	4	809,80
	2	13	4	677,40	14	4	695,35	13	4	679,80
	3	13	4	677,40	14	4	705,35	13	4	679,80
	4	13	4	677,40	14	4	705,35	13	4	679,80
Total		-	-	2839,60	-	-	2941,4	-	-	2849,20
31_10	1	14	0	918,85	15	0	926,70	16	0	1080,15
	2	14	0	755,55	15	0	776,30	15	0	832,05
	3	14	0	745,55	14	0	765,55	14	0	755,55
	4	14	0	745,55	14	0	745,55	15	0	835,40
Total		-	-	3165,5	-	-	3214,10	-	-	3503,15
31_11	1	14	5	818,15	14	5	819,50	14	5	818,15
	2	14	5	678,15	14	5	679,50	14	5	678,15
	3	14	5	678,15	14	5	679,50	15	5	770,25
	4	14	5	678,15	14	5	679,50	14	5	678,15
Total		-	-	2852,60	-	-	2858,00	-	-	2944,70

Tabela 47 - Tempo das 12 instâncias com 31 nós.

Instância	PLIM	ILS	GRASP
31_0	3,84	0,15	1,93
31_1	10,23	0,17	2,62
31_2	3,21	0,14	2,38
31_3	4,24	0,15	2,94
31_4	279,04	0,15	2,84
31_5	6,58	0,15	2,43
31_6	3,79	0,15	2,54
31_7	34,52	0,12	2,57
31_8	5,49	0,14	2,05
31_9	7,18	0,15	2,38
31_10	120,43	0,15	2,71
31_11	3,46	0,14	2,56
Média	40,16	0,15	2,50

Problema com 42 Nós (área de 100m²):

Parâmetros para o ILS:

 β para desligar um nó = 1.0Repetições ILS (*n*ILS): 90

Combinações de Perturbações: 3 – remoções; 1 – inserção; 2 – inserção em cascata;

Critério de aceitação: menor consumo de energia;

Parâmetros para o GRASP:

 β (desligar um nó) = 1.0 α (construção semialeatória GRASP) = 0.5

BMAX (repetições da Busca Local) = 10

GMAX (repetições da heurística GRASP) = 5

Tabela 48 - Resultados das 12 instâncias com 42 nós.

Inst.	PLIM				ILS			GRASP		
	P	N	FC	Energia	N	FC	Energia	N	FC	Energia
42_0	1	14	0	836,80	15	0	868,20	14	0	836,80
	2	14	0	698,15	15	0	718,20	14	0	758,40
	3	14	0	696,80	15	0	718,20	15	0	779,10
	4	14	0	698,15	15	0	718,20	14	0	709,90
Total		-	-	2929,00	-	-	3022,80	-	-	3084,20
42_1	1	15	2	935,45	17	2	1024,75	16	2	984,00
	2	15	2	785,45	17	2	854,75	16	2	839,35
	3	15	2	785,45	17	2	854,75	16	2	869,45
	4	15	2	796,25	17	2	854,75	15	2	836,45
Total		-	-	3302,6	-	-	3589,00	-	-	3529,25
42_2	1	14	1	811,60	14	1	847,20	14	1	811,40
	2	14	1	671,25	14	1	707,20	14	1	693,85
	3	14	1	671,25	14	1	706,50	14	1	710,15
	4	14	1	671,60	14	1	675,80	14	1	737,05
Total		-	-	2825,70	-	-	2936,70	-	-	2952,45
42_3	1	15	1	952,70	15	1	951,75	15	1	950,25
	2	15	1	802,70	15	1	801,75	15	1	809,85
	3	15	1	802,70	15	1	812,15	15	1	799,85
	4	15	1	819,65	15	1	863,45	15	1	883,15
Total		-	-	3377,75	-	-	3429,10	-	-	3443,10
42_4	1	14	1	849,00	14	1	848,35	14	1	855,60
	2	13	1	679,80	14	1	708,35	14	1	715,75
	3	13	1	679,80	14	1	708,35	14	1	749,35
	4	13	1	679,80	14	1	705,15	15	1	803,65
Total		-	-	2888,40	-	-	2970,20	-	-	3124,35

42_5	1	14	0	841,30	14	0	841,30	14	0	853,50
	2	14	0	701,30	15	0	758,55	14	0	721,30
	3	14	0	701,30	14	0	711,30	14	0	701,30
	4	14	0	734,30	14	0	711,30	15	0	782,00
Total		-	-	2978,20	-	-	3022,45	-	-	3058,10
42_6	1	14	0	890,00	15	0	920,35	14	0	890,00
	2	14	0	750,00	16	0	821,45	14	0	784,90
	3	14	0	750,00	16	0	824,95	14	0	754,90
	4	14	0	750,00	15	0	806,25	14	0	783,00
Total		-	-	3140,00	-	-	3373,00	-	-	3212,80
42_7	1	15	0	944,80	16	0	961,00	15	0	944,20
	2	15	0	794,80	16	0	801,00	15	0	794,20
	3	15	0	794,80	16	0	801,00	15	0	794,20
	4	15	0	794,80	17	0	892,40	15	0	806,40
Total		-	-	3329,20	-	-	3455,40	-	-	3339,00
42_8	1	15	0	892,65	14	0	851,00	14	0	850,20
	2	14	0	709,85	14	0	711,00	14	0	720,35
	3	14	0	709,85	15	0	826,60	14	0	710,35
	4	14	0	709,85	15	0	804,30	15	0	753,15
Total		-	-	3022,20	-	-	3192,90	-	-	3034,05
42_9	1	14	0	861,95	14	0	865,95	14	0	896,80
	2	14	0	721,95	14	0	725,95	15	0	802,40
	3	14	0	721,95	15	0	786,05	14	0	734,70
	4	14	0	721,95	15	0	776,05	14	0	722,85
Total		-	-	3027,80	-	-	3154,00	-	-	3156,75
42_10	1	14	0	839,80	14	0	839,80	14	0	841,55
	2	14	0	699,80	14	0	699,80	14	0	721,80
	3	14	0	699,80	14	0	699,80	14	0	701,80
	4	14	0	699,80	14	0	699,80	14	0	717,25
Total		-	-	2939,20	-	-	2939,20	-	-	2982,40
42_11	1	14	4	917,30	16	4	1027,80	14	4	917,30
	2	14	4	777,30	15	4	823,65	14	4	777,30
	3	14	4	777,30	15	4	813,65	15	4	833,65
	4	14	4	777,30	15	4	813,65	14	4	787,30
Total		-	-	3249,20	-	-	3478,75	-	-	3315,55

Tabela 49 - Tempo das 12 instâncias com 42 nós.

Instância	PLIM	ILS	GRASP
42_0	24,18	0,26	5,18
42_1	299,97	0,26	4,48
42_2	160,67	0,26	4,48
42_3	438,88	0,28	5,36
42_4	66,00	0,28	5,08
42_5	45,96	0,26	5,52
42_6	317,60	0,28	5,15
42_7	446,74	0,26	4,96
42_8	1257,71	0,25	4,99
42_9	108,56	0,28	5,41
42_10	268,62	0,26	4,69
42_11	15,94	0,26	4,44
Média	287,56	0,26	4,98

Problema com 53 Nós (área de 100m²):

Parâmetros para o ILS:

 β para desligar um nó = 1.0Repetições ILS (*n*ILS): 70

Combinações de Perturbações: 3 – remoções; 1 – inserção; 2 – inserção em cascata;

Critério de aceitação: menor consumo de energia;

Parâmetros para o GRASP:

 β (desligar um nó) = 1.0 α (construção semialeatória GRASP) = 0.5

BMAX (repetições da Busca Local) = 10

GMAX (repetições da heurística GRASP) = 5

Tabela 50 - Resultados das 12 instâncias com 53 nós.

Inst.	PLIM				ILS			GRASP		
	P	N	FC	Energia	N	FC	Energia	N	FC	Energia
53_0	1	13	0	791,30	14	0	803,40	14	0	843,90
	2	13	0	661,30	14	0	737,50	14	0	721,25
	3	13	0	661,30	14	0	722,95	14	0	760,65
	4	13	0	661,30	14	0	712,50	15	0	806,55
Total		-	-	2775,20	-	-	2976,35	-	-	3132,35
53_1	1	15	0	917,60	17	0	982,10	16	0	947,75
	2	15	0	767,60	16	0	760,90	16	0	797,75
	3	15	0	753,05	16	0	760,90	16	0	771,00
	4	15	0	753,05	16	0	760,90	16	0	826,30
Total		-	-	3191,30	-	-	3264,80	-	-	3342,80
53_2	1	14	0	826,10	15	0	863,95	15	0	872,75
	2	14	0	686,10	15	0	713,95	14	0	745,50
	3	14	0	686,10	15	0	713,95	14	0	738,00
	4	14	0	686,10	15	0	713,95	14	0	698,00
Total		-	-	2884,40	-	-	3005,80	-	-	3054,25
53_3	1	15	0	893,30	16	0	933,95	15	0	898,00
	2	15	0	743,30	16	0	773,95	15	0	817,65
	3	15	0	743,30	16	0	773,95	15	0	802,65
	4	15	0	743,30	16	0	773,95	15	0	807,25
Total		-	-	3123,20	-	-	3255,80	-	-	3325,55
53_4	1	15	0	888,00	15	0	895,15	15	0	895,45
	2	15	0	738,00	15	0	745,15	15	0	800,05
	3	15	0	738,00	15	0	745,15	15	0	780,40
	4	15	0	754,45	15	0	745,15	15	0	829,15
Total		-	-	3118,45	-	-	3130,60	-	-	3305,05

53_5	1	13	0	757,40	13	0	757,40	13	0	757,55
	2	13	0	627,40	13	0	627,40	13	0	627,55
	3	13	0	598,10	13	0	627,40	13	0	650,30
	4	13	0	627,40	13	0	627,40	13	0	640,30
Total		-	-	2610,30	-	-	2639,60	-	-	2675,70
53_6	1	15	0	853,70	15	0	854,50	15	0	895,95
	2	15	0	703,70	15	0	704,50	15	0	746,95
	3	15	0	667,50	15	0	704,50	15	0	797,75
	4	15	0	703,70	15	0	724,20	14	0	743,00
Total		-	-	2928,60	-	-	2987,70	-	-	3183,65
53_7	1	14	0	856,10	15	0	894,00	15	0	882,55
	2	14	0	716,10	15	0	744,00	15	0	754,40
	3	14	0	716,10	15	0	744,00	15	0	763,30
	4	14	0	714,60	15	0	761,25	15	0	776,05
Total		-	-	3002,90	-	-	3143,25	-	-	3176,30
53_8	1	14	0	838,50	14	0	839,45	14	0	839,10
	2	14	0	698,50	14	0	699,45	14	0	764,40
	3	14	0	698,50	14	0	699,45	14	0	749,35
	4	14	0	698,50	14	0	699,45	14	0	728,50
Total		-	-	2934,00	-	-	2937,80	-	-	3081,35
53_9	1	13	0	758,35	15	0	852,35	13	0	819,35
	2	13	0	628,35	13	0	669,50	13	0	678,35
	3	13	0	628,35	13	0	659,50	13	0	745,00
	4	13	0	628,35	13	0	659,50	13	0	664,15
Total		-	-	2643,40	-	-	2840,85	-	-	2906,85
53_10	1	14	0	834,25	14	0	851,05	14	0	837,25
	2	14	0	694,25	14	0	711,05	14	0	717,25
	3	14	0	694,25	14	0	711,05	14	0	708,80
	4	14	0	696,10	14	0	711,05	14	0	753,85
Total		-	-	2918,85	-	-	2984,20	-	-	3017,15
53_11	1	14	0	933,40	16	0	998,65	14	0	943,25
	2	14	0	779,20	16	0	838,65	14	0	823,60
	3	14	0	769,20	16	0	838,65	14	0	816,50
	4	14	0	769,20	16	0	838,65	14	0	806,25
Total		-	-	3251,00	-	-	3514,6	-	-	3389,60

Tabela 51 - Tempo das 12 instâncias com 53 nós.

Instância	PLIM	ILS	GRASP
53_0	1111,37	0,40	7,16
53_1	1956,58	0,40	8,81
53_2	2782,29	0,42	8,72
53_3	5678,97	0,42	8,88
53_4	2167,34	0,43	8,18
53_5	133,54	0,40	8,37
53_6	1404,73	0,39	8,04
53_7	2012,01	0,40	8,62
53_8	371,53	0,40	8,85
53_9	1516,50	0,40	7,66
53_10	1797,86	0,40	9,23
53_11	1959,43	0,40	8,66
Média	1907,67	0,40	8,43

Problema com 60 Nós (área de 100m²):

Parâmetros para o ILS:

 β para desligar um nó = 1.0Repetições ILS (*n*ILS): 90

Combinações de Perturbações: 3 – remoções; 1 – inserção; 2 – inserção em cascata;

Critério de aceitação: menor consumo de energia;

Parâmetros para o GRASP:

 β (desligar um nó) = 1.0 α (construção semialeatória GRASP) = 0.5

BMAX (repetições da Busca Local) = 10

GMAX (repetições da heurística GRASP) = 5

Tabela 52 - Resultados das 12 instâncias com 60 nós.

Inst.	PLIM				ILS			GRASP		
	P	N	FC	Energia	N	FC	Energia	N	FC	Energia
60_0	1	13	0	781,95	14	0	821,15	14	0	825,30
	2	13	0	651,95	13	0	651,95	14	0	707,00
	3	13	0	651,95	14	0	706,40	13	0	693,95
	4	13	0	651,95	14	0	686,40	14	0	749,40
Total		-	-	2737,80	-	-	2865,90	-	-	2975,65
60_1	1	13	0	793,85	14	0	808,00	14	0	837,45
	2	13	0	663,85	14	0	678,00	14	0	703,90
	3	13	0	665,55	14	0	678,00	14	0	712,05
	4	13	0	665,55	14	0	676,80	14	0	682,05
Total		-	-	2788,8	-	-	2840,80	-	-	2935,45
60_2	1	14	0	836,90	15	0	903,90	14	0	840,95
	2	14	0	696,90	15	0	753,90	15	0	761,20
	3	14	0	696,90	15	0	753,90	15	0	827,25
	4	14	0	696,90	15	0	753,90	14	0	766,70
Total		-	-	2927,60	-	-	3165,60	-	-	3196,10
60_3	1	12	0	744,70	14	0	834,40	13	0	818,15
	2	12	0	624,70	14	0	694,40	13	0	691,80
	3	12	0	624,70	14	0	694,40	13	0	746,40
	4	12	0	624,70	14	0	694,40	12	0	684,85
Total		-	-	2618,80	-	-	2917,60	-	-	2941,20
60_4	1	14	0	843,40	15	0	911,75	14	0	860,10
	2	14	0	703,40	15	0	778,90	14	0	726,95
	3	14	0	703,40	14	0	739,35	14	0	829,65
	4	14	0	703,40	14	0	739,35	14	0	775,25
Total		-	-	2953,60	-	-	3169,35	-	-	3191,95

60_5	1	13	0	833,10	14	0	865,85	14	0	892,40
	2	13	0	703,10	14	0	725,85	14	0	767,45
	3	13	0	703,10	14	0	725,85	14	0	791,65
	4	13	0	703,10	14	0	725,85	14	0	773,25
Total		-	-	2942,40	-	-	3043,40	-	-	3224,75
60_6	1	13	0	772,15	13	0	774,30	13	0	782,60
	2	13	0	642,15	13	0	644,30	13	0	722,65
	3	13	0	642,15	13	0	644,30	13	0	717,35
	4	13	0	642,15	13	0	644,30	13	0	716,60
Total		-	-	2698,60	-	-	2707,20	-	-	2939,20
60_7	1	13	0	755,20	14	0	783,25	13	0	755,20
	2	13	0	625,20	14	0	643,25	13	0	682,10
	3	13	0	625,20	14	0	643,25	14	0	700,45
	4	13	0	625,20	14	0	643,25	13	0	681,00
Total		-	-	2630,80	-	-	2713,00	-	-	2818,75
60_8	1	13	0	787,70	14	0	799,05	14	0	848,55
	2	13	0	657,70	14	0	685,20	14	0	730,75
	3	13	0	657,70	14	0	680,75	13	0	729,90
	4	13	0	657,70	14	0	695,65	14	0	715,15
Total		-	-	2760,80	-	-	2860,65	-	-	3024,35
60_9	1	16	0	912,90	16	0	945,60	16	0	940,90
	2	16	0	752,90	16	0	785,60	14	0	790,40
	3	16	0	752,90	16	0	785,60	15	0	812,35
	4	16	0	752,90	16	0	785,60	14	0	770,05
Total		-	-	3171,60	-	-	3302,40	-	-	3313,70
60_10	1	14	0	812,15	14	0	814,90	15	0	868,50
	2	14	0	672,15	14	0	694,60	14	0	729,65
	3	14	0	672,15	14	0	674,60	15	0	805,65
	4	14	0	672,15	14	0	694,90	14	0	720,95
Total		-	-	2828,60	-	-	2879,00	-	-	3124,75
60_11	1	14	2	843,55	14	2	846,45	14	0	870,05
	2	14	2	703,55	14	2	706,45	14	0	723,55
	3	14	2	703,55	14	2	706,45	14	0	713,80
	4	14	2	703,55	14	2	706,45	14	0	714,05
Total		-	-	2954,20	-	-	2965,80	-	-	3021,45

Tabela 53 - Tempo das 12 instâncias com 60 nós.

Instância	PLIM	ILS	GRASP
60_0	1638,57	0,48	12,15
60_1	8526,95	0,48	10,92
60_2	8998,98	0,51	11,50
60_3	769,91	0,49	10,22
60_4	7740,69	0,51	12,00
60_5	4464,80	0,49	12,25
60_6	5832,35	0,48	10,70
60_7	2681,16	0,48	9,76
60_8	5724,36	0,48	11,06
60_9	4455,39	0,49	12,21
60_10	922,18	0,46	11,83
60_11	579,89	0,46	11,33
Média	4745,10	0,48	11,33

Problema com 85 Nós (área de 100m²):

Parâmetros para o ILS:

 β para desligar um nó = 1.0Repetições ILS (*n*ILS): 90

Combinações de Perturbações: 3 – remoções; 1 – inserção; 2 – inserção em cascata;

Critério de aceitação: menor consumo de energia;

Parâmetros para o GRASP:

 β (desligar um nó) = 1.0 α (construção semialeatória GRASP) = 0.5

BMAX (repetições da Busca Local) = 10

GMAX (repetições da heurística GRASP) = 5

Tabela 54 - Resultado das 12 instâncias com 85 nós.

Inst.	PLIM				ILS			GRASP		
	P	N	FC	Energia	N	FC	Energia	N	FC	Energia
85_0	1	14	0	786,05	14	0	786,90	14	0	788,55
	2	14	0	646,05	14	0	660,10	14	0	720,45
	3	14	0	646,05	14	0	650,10	13	0	682,40
	4	14	0	646,05	14	0	650,10	13	0	661,55
Total		-	-	2724,20	-	-	2747,20	-	-	2852,95
85_1	1	13	0	751,70	13	0	755,35	14	0	831,90
	2	13	0	621,70	13	0	625,35	14	0	775,90
	3	13	0	621,70	13	0	625,35	14	0	761,30
	4	13	0	621,70	13	0	625,35	13	0	735,70
Total		-	-	2616,80	-	-	2631,40	-	-	3104,80
85_2	1	13	0	751,70	14	0	801,90	14	0	831,90
	2	13	0	621,70	13	0	635,35	14	0	775,90
	3	13	0	621,70	13	0	625,35	14	0	761,30
	4	13	0	621,70	14	0	681,90	13	0	735,70
Total		-	-	2616,80	-	-	2744,50	-	-	3104,80
85_3	1	14	1	784,70	14	1	802,50	14	0	787,95
	2	14	1	644,70	14	1	662,50	14	0	656,85
	3	14	1	644,70	14	1	669,30	14	0	708,25
	4	14	1	644,70	14	1	649,30	14	0	772,55
Total		-	-	2718,80	-	-	2783,60	-	-	2925,60
85_4	1	12	1	681,60	13	1	715,60	13	0	746,10
	2	11	1	507,80	13	1	618,00	13	0	660,95
	3	12	1	561,60	13	1	588,00	13	0	626,15
	4	12	1	561,60	13	1	588,00	13	0	676,00
Total		-	-	2312,60	-	-	2509,60	-	-	2709,20

85_5	1	13	0	780,75	14	0	811,75	14	0	842,25
	2	12	0	613,85	14	0	671,75	13	0	711,55
	3	13	0	650,75	14	0	671,75	13	0	673,55
	4	13	0	676,85	14	0	671,75	14	0	738,05
Total		-	-	2722,2			2827,00	-	-	2965,40
85_6	1	14	0	835,10	15	0	893,65	14	0	846,45
	2	14	0	695,10	15	0	743,65	15	0	802,40
	3	14	0	695,10	16	0	785,65	14	0	748,90
	4	14	0	695,10	16	0	775,65	14	0	718,15
Total		-	-	2920,40	-	-	3198,60	-	-	3115,90
85_7	1	15	0	875,95	15	0	878,25	15	0	911,60
	2	15	0	725,95	15	0	756,05	15	0	812,40
	3	15	0	725,95	15	0	756,75	15	0	864,00
	4	15	0	725,95	15	0	726,75	15	0	786,10
Total		-	-	3053,80	-	-	3117,80	-	-	3374,10
85_8	1	15	0	876,05	15	0	876,75	15	0	911,60
	2	15	0	726,05	15	0	726,75	15	0	812,40
	3	14	0	705,95	15	0	726,75	15	0	864,00
	4	14	0	705,95	15	0	726,75	15	0	786,10
Total		-	-	3014	-	-	3057,00	-	-	3374,10
85_9	1	13	2	771,00	15	0	876,60	14	0	847,15
	2	13	2	641,00	15	0	726,60	14	0	782,30
	3	13	2	641,00	14	0	701,10	14	0	725,10
	4	13	2	641,00	16	0	770,45	14	0	724,05
Total		-	-	2694,00	-	-	3074,75	-	-	3078,60
85_10	1	13	0	721,80	13	0	725,60	14	0	800,20
	2	13	0	591,80	13	0	614,50	14	0	732,05
	3	13	0	591,80	13	0	624,45	13	0	688,20
	4	13	0	591,80	13	0	604,45	12	0	619,40
Total		-	-	2497,20	-	-	2569,00	-	-	2839,85
85_11	1	15	0	822,80	14	0	800,25	14	0	800,00
	2	15	0	672,80	14	0	722,00	14	0	753,10
	3	15	0	672,80	14	0	671,90	14	0	710,20
	4	15	0	672,80	15	0	715,65	14	0	737,25
Total		-	-	2841,20	-	-	2909,80	-	-	3000,55

Tabela 55 - Tempo das 12 instâncias com 85 nós.

Instância	PLIM	ILS	GRASP
85_0	6068,41	0,88	34,08
85_1	6775,53	0,84	36,94
85_2	16686,07	0,85	36,94
85_3	5125,96	0,90	32,17
85_4	11305,42	0,85	27,03
85_5	23134,32	0,92	34,04
85_6	17894,75	0,88	30,23
85_7	5300,32	0,88	31,83
85_8	17922,39	0,88	31,84
85_9	18009,34	0,90	35,03
85_10	7610,28	0,82	33,65
85_11	5164,09	1,24	27,07
Média	11749,74	0,90	32,57

APÊNDICE B

Nesta sessão é apresentado o modelo matemático por extenso. Este é o exemplo ilustrativo de uma instância com 5 nós sensores pronta para ser executada pelo CPLEX:

```

\ Num Sensores..... : 5
\ Pontos de Demanda..... : 10
\ Pontos Acesso..... : 1
\ Raio de Comunicacao..... : 3.0000
\ Raio do Sensor..... : 2.0000
\ Dimensao..... : 10
\ Numero de Periodos..... : 4
\ Arquivo com Sensores..... : 0510_0.dat
\ Arquivo Energia..... : energial0
\ Bateria do Sensor..... : 400.000
\ Energia de Ativacao..... : 10.000
\ Energia de Sensoriamento... : 30.000
\ Energia de Transmissao..... : 0.50000
\ Energia de Recepcao..... : 10.0000

minimize

Obj: + e_0 + e_1 + e_2 + e_3 + e_4 + 10000 h_0_0 + 10000 h_1_0 + 10000 h_2_0 + 10000
h_3_0 + 10000 h_4_0 + 10000 h_5_0 + 10000 h_6_0 + 10000 h_7_0 + 10000 h_8_0 + 10000
h_9_0 + 10000 h_0_1 + 10000 h_1_1 + 10000 h_2_1 + 10000 h_3_1 + 10000 h_4_1 + 10000
h_5_1 + 10000 h_6_1 + 10000 h_7_1 + 10000 h_8_1 + 10000 h_9_1 + 10000 h_0_2 + 10000
h_1_2 + 10000 h_2_2 + 10000 h_3_2 + 10000 h_4_2 + 10000 h_5_2 + 10000 h_6_2 + 10000
h_7_2 + 10000 h_8_2 + 10000 h_9_2 + 10000 h_0_3 + 10000 h_1_3 + 10000 h_2_3 + 10000
h_3_3 + 10000 h_4_3 + 10000 h_5_3 + 10000 h_6_3 + 10000 h_7_3 + 10000 h_8_3 + 10000
h_9_3

subject to

+ x_2_0_0 + h_0_0 >= 1
+ h_1_0 >= 1
+ h_2_0 >= 1
+ x_0_3_0 + h_3_0 >= 1
+ h_4_0 >= 1
+ x_3_5_0 + h_5_0 >= 1
+ x_4_6_0 + h_6_0 >= 1
+ x_1_7_0 + h_7_0 >= 1
+ x_1_8_0 + h_8_0 >= 1
+ h_9_0 >= 1
+ x_2_0_1 + h_0_1 >= 1
+ h_1_1 >= 1
+ h_2_1 >= 1
+ x_0_3_1 + h_3_1 >= 1
+ h_4_1 >= 1
+ x_3_5_1 + h_5_1 >= 1
+ x_4_6_1 + h_6_1 >= 1
+ x_1_7_1 + h_7_1 >= 1
+ x_1_8_1 + h_8_1 >= 1
+ h_9_1 >= 1
+ x_2_0_2 + h_0_2 >= 1
+ h_1_2 >= 1
+ h_2_2 >= 1
+ x_0_3_2 + h_3_2 >= 1
+ h_4_2 >= 1
+ x_3_5_2 + h_5_2 >= 1
+ x_4_6_2 + h_6_2 >= 1
+ x_1_7_2 + h_7_2 >= 1

+ x_1_8_2 + h_8_2 >= 1
+ h_9_2 >= 1
+ x_2_0_3 + h_0_3 >= 1
+ h_1_3 >= 1
+ h_2_3 >= 1
+ x_0_3_3 + h_3_3 >= 1
+ h_4_3 >= 1
+ x_3_5_3 + h_5_3 >= 1
+ x_4_6_3 + h_6_3 >= 1
+ x_1_7_3 + h_7_3 >= 1
+ x_1_8_3 + h_8_3 >= 1
+ h_9_3 >= 1

+ x_0_3_0 <= 1
+ x_1_7_0 <= 1
+ x_1_8_0 <= 1
+ x_2_0_0 <= 1
+ x_3_5_0 <= 1
+ x_4_6_0 <= 1
+ x_0_3_1 <= 1
+ x_1_7_1 <= 1
+ x_1_8_1 <= 1
+ x_2_0_1 <= 1
+ x_3_5_1 <= 1
+ x_4_6_1 <= 1
+ x_0_3_2 <= 1
+ x_1_7_2 <= 1

```

```

+ x_1_8_2 <= 1
+ x_2_0_2 <= 1
+ x_3_5_2 <= 1
+ x_4_6_2 <= 1
+ x_0_3_3 <= 1
+ x_1_7_3 <= 1
+ x_1_8_3 <= 1
+ x_2_0_3 <= 1
+ x_3_5_3 <= 1
+ x_4_6_3 <= 1

+ x_0_3_0
- 10 y_0_0 <= 0

+ x_1_7_0
+ x_1_8_0
- 10 y_1_0 <= 0

+ x_2_0_0
- 10 y_2_0 <= 0

+ x_3_5_0
- 10 y_3_0 <= 0

+ x_4_6_0
- 10 y_4_0 <= 0

+ x_0_3_1
- 10 y_0_1 <= 0

+ x_1_7_1
+ x_1_8_1
- 10 y_1_1 <= 0

+ x_2_0_1
- 10 y_2_1 <= 0

```

```

+ x_3_5_1
- 10 y_3_1 <= 0

+ x_4_6_1
- 10 y_4_1 <= 0

+ x_0_3_2
- 10 y_0_2 <= 0

+ x_1_7_2
+ x_1_8_2
- 10 y_1_2 <= 0

+ x_2_0_2
- 10 y_2_2 <= 0

+ x_3_5_2
- 10 y_3_2 <= 0

+ x_4_6_2
- 10 y_4_2 <= 0

+ x_0_3_3
- 10 y_0_3 <= 0

+ x_1_7_3
+ x_1_8_3
- 10 y_1_3 <= 0

+ x_2_0_3
- 10 y_2_3 <= 0

+ x_3_5_3
- 10 y_3_3 <= 0

+ x_4_6_3
- 10 y_4_3 <= 0

```

```

+ 10.0000 w_0_0 + 30.0000 y_0_0 - ep_0_0 <= 0
+ 10.0000 w_1_0 + 30.0000 y_1_0 - ep_1_0 <= 0
+ 10.0000 w_2_0 + 30.0000 y_2_0 - ep_2_0 <= 0
+ 10.0000 w_3_0 + 30.0000 y_3_0 - ep_3_0 <= 0
+ 10.0000 w_4_0 + 30.0000 y_4_0 - ep_4_0 <= 0
+ 10.0000 w_0_1 + 30.0000 y_0_1 - ep_0_1 <= 0
+ 10.0000 w_1_1 + 30.0000 y_1_1 - ep_1_1 <= 0
+ 10.0000 w_2_1 + 30.0000 y_2_1 - ep_2_1 <= 0
+ 10.0000 w_3_1 + 30.0000 y_3_1 - ep_3_1 <= 0
+ 10.0000 w_4_1 + 30.0000 y_4_1 - ep_4_1 <= 0
+ 10.0000 w_0_2 + 30.0000 y_0_2 - ep_0_2 <= 0
+ 10.0000 w_1_2 + 30.0000 y_1_2 - ep_1_2 <= 0
+ 10.0000 w_2_2 + 30.0000 y_2_2 - ep_2_2 <= 0
+ 10.0000 w_3_2 + 30.0000 y_3_2 - ep_3_2 <= 0
+ 10.0000 w_4_2 + 30.0000 y_4_2 - ep_4_2 <= 0
+ 10.0000 w_0_3 + 30.0000 y_0_3 - ep_0_3 <= 0
+ 10.0000 w_1_3 + 30.0000 y_1_3 - ep_1_3 <= 0
+ 10.0000 w_2_3 + 30.0000 y_2_3 - ep_2_3 <= 0
+ 10.0000 w_3_3 + 30.0000 y_3_3 - ep_3_3 <= 0
+ 10.0000 w_4_3 + 30.0000 y_4_3 - ep_4_3 <= 0

```

```

+ ep_0_0
+ ep_0_1
+ ep_0_2
+ ep_0_3
- e_0 <= 0

```

```

+ ep_1_0
+ ep_1_1
+ ep_1_2
+ ep_1_3
- e_1 <= 0

```

```

+ ep_2_0
+ ep_2_1
+ ep_2_2
+ ep_2_3

```

```

- e_2 <=0
+ ep_3_0
+ ep_3_1
+ ep_3_2
+ ep_3_3

- e_3 <=0
+ ep_4_0
+ ep_4_1
+ ep_4_2
+ ep_4_3
- e_4 <=0

+ e_0 <= 400.0000
+ e_1 <= 400.0000
+ e_2 <= 400.0000
+ e_3 <= 400.0000
+ e_4 <= 400.0000
+ e_5 <= 1600.0000

+ y_0_0 + y_1_0 + y_2_0 + y_3_0 + y_4_0 >= 9
+ y_0_1 + y_1_1 + y_2_1 + y_3_1 + y_4_1 >= 9
+ y_0_2 + y_1_2 + y_2_2 + y_3_2 + y_4_2 >= 9
+ y_0_3 + y_1_3 + y_2_3 + y_3_3 + y_4_3 >= 9

+ w_0_0 - y_0_0 >=0
+ w_1_0 - y_1_0 >=0
+ w_2_0 - y_2_0 >=0
+ w_3_0 - y_3_0 >=0
+ w_4_0 - y_4_0 >=0
+ w_5_0 - y_5_0 >=0
+ w_0_1 - y_0_1 + y_0_0 >= 0
+ w_1_1 - y_1_1 + y_1_0 >= 0
+ w_2_1 - y_2_1 + y_2_0 >= 0
+ w_3_1 - y_3_1 + y_3_0 >= 0
+ w_4_1 - y_4_1 + y_4_0 >= 0
+ w_5_1 - y_5_1 + y_5_0 >= 0
+ w_0_2 - y_0_2 + y_0_1 >= 0
+ w_1_2 - y_1_2 + y_1_1 >= 0
+ w_2_2 - y_2_2 + y_2_1 >= 0
+ w_3_2 - y_3_2 + y_3_1 >= 0
+ w_4_2 - y_4_2 + y_4_1 >= 0
+ w_5_2 - y_5_2 + y_5_1 >= 0
+ w_0_3 - y_0_3 + y_0_2 >= 0
+ w_1_3 - y_1_3 + y_1_2 >= 0
+ w_2_3 - y_2_3 + y_2_2 >= 0
+ w_3_3 - y_3_3 + y_3_2 >= 0
+ w_4_3 - y_4_3 + y_4_2 >= 0
+ w_5_3 - y_5_3 + y_5_2 >= 0

```

Binaries

y_0_0	w_1_0
y_1_0	w_2_0
y_2_0	w_3_0
y_3_0	w_4_0
y_4_0	w_5_0
y_5_0	w_0_1
y_0_1	w_1_1
y_1_1	w_2_1
y_2_1	w_3_1
y_3_1	w_4_1
y_4_1	w_5_1
y_5_1	w_0_2
y_0_2	w_1_2
y_1_2	w_2_2
y_2_2	w_3_2
y_3_2	w_4_2
y_4_2	w_5_2
y_5_2	w_0_3
y_0_3	w_1_3
y_1_3	w_2_3
y_2_3	w_3_3
y_3_3	w_4_3
y_4_3	w_5_3
y_5_3	End
w_0_0	