

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Computação



Dissertação

Redes de Sensores com Nodos Móveis: Investigando Efeitos da Mobilidade na Cobertura de Sensoriamento e no Balanceamento de Carga

Andrea Veronica González

Pelotas, 2016

Andrea Veronica González

Redes de Sensores com Nodos Móveis: Investigando Efeitos da Mobilidade na Cobertura de Sensoriamento e no Balanceamento de Carga

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação

Orientador: Profa. Dra. Lisane Brisolara de Brisolara
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Ferreira Jr.

Pelotas, 2016

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

G642r González, Andrea Veronica

Redes de sensores com nodos móveis : investigando efeitos da mobilidade na cobertura de sensoriamento e no balanceamento de carga / Andrea Veronica González ; Lisane Brisolara de Brisolara, orientadora ; Paulo Roberto Ferreira Junior, coorientador. — Pelotas, 2016.

67 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Computação, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2016.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Sensores móveis. 3. Balanceamento de carga. 4. Simulação. 5. Eboracum. I. Brisolara, Lisane Brisolara de, orient. II. Ferreira Junior, Paulo Roberto, coorient. III. Título.

CDD : 005



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE PÓS-GRADUAÇÃO



5

DEFESA DE DISSERTAÇÃO

NOME DO ESTUDANTE ANDREA VERONICA GONZALEZ	MATRICULA 14101511
CURSO OU PROGRAMA MESTRADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO	NÍVEL MESTRADO

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA	TÍTULO	ASSINATURA
Lisane Brisolara (PPGC-UFPel)	DOUTOR	<i>Lisane de Brisolara</i>
Julio Carlos Balzano de Mattos (PPGC-UFPel)	DOUTOR	<i>Julio Carlos Balzano de Mattos</i>
Cláudio Machado Diniz (Universidade Católica de Pelotas (UCPel))	DOUTOR	<i>Cláudio Diniz</i>

APRECIÇÃO SOBRE A DISSERTAÇÃO

NÃO SIGILOSA

Em 22 de Novembro de 2016, os membros acima nomeados para a defesa da Dissertação do(a) estudante **ANDREA VERONICA GONZALEZ**, matriculado no Programa de Pós-Graduação em Computação, consideraram a Dissertação **aprovada**, estabelecendo o título definitivo como sendo "**Redes de sensores com nodos móveis: investigando efeitos da mobilidade na cobertura de sensoriamento e no balanceamento de carga**" e estabelecem um prazo máximo de 30 dias para as correções e entrega da versão definitiva.

DADOS PESSOAIS DOS MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

NOME COMPLETO	CPF	ANO NASCIMENTO	TITULAÇÃO		
			Área	Local	Ano
Lisane Brisolara (PPGC-UFPel)	92495516068	1977	Ciência da Computação	UFRGS	2007
Julio Carlos Balzano de Mattos (PPGC-UFPel)	62071599004	1974	Ciência da Computação	UFRGS	2007
Cláudio Machado Diniz (Universidade Católica de Pelotas (UCPel))	00431169063	26041983	Ciência da Computação	Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)	2015

1ª Via – Coordenador do Curso; 2ª Via – Orientador; 3ª Via – PRPPG.
DISTRIBUIÇÃO A CARGO DA COORDENAÇÃO DO PROGRAMA.

RESUMO

GONZÁLEZ, Andrea Veronica. **Redes de Sensores com Nodos Móveis: Investigando Efeitos da Mobilidade na Cobertura de Sensoriamento e no Balanceamento de Carga.** 2016. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Programa de Pós-Graduação em Computação, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

A mobilidade de nodos em redes de sensores sem fio tem sido empregada para resolver problemas de comunicação através de nodos coletores de dados ou estações base móveis, ou ainda para melhorar a cobertura empregando nodos sensores móveis, que se movem para sensoriar áreas descobertas. No entanto, um dos principais desafios em redes de sensores sem fio é o consumo de energia, visto que o tempo de vida da rede depende da carga da bateria de seus nodos. Visando aumentar o tempo de vida das redes orientadas a eventos, estratégias dinâmicas de balanceamento de carga exploram a redundância nas áreas de sensoriamento dos nodos e evitam que mais de um nodo processe um mesmo evento. A mobilidade bem como o balanceamento de carga são importantes adaptações dinâmicas que podem ser empregadas para melhorar a eficiência de redes de sensores, mas o emprego integrado destas duas adaptações precisa ser investigado. Este trabalho avalia os efeitos da mobilidade de nodos sensores tanto na cobertura da rede quanto na eficiência das técnicas de balanceamento de carga empregadas em redes de sensores orientadas a eventos. No contexto deste trabalho, uma estratégia é implementada, a qual move nodos baseada na ação de forças de repulsão, visando espalhar nodos sobre a área de interesse e melhorar a cobertura da rede. O seu impacto na cobertura foi avaliado em diferentes cenários de implantação e em redes com diferentes densidades. Primeiramente, quando nodos são implantados de forma aleatória, e então, a mobilidade permite redistribuí-los e maximizar a cobertura da rede. Em um segundo momento, a estratégia é aplicada quando nodos começam a ser desativados pela descarga de suas baterias, onde a mobilidade pode minimizar o efeito da desativação de um nodo da rede. Além disso, experimentos foram realizados de forma a observar o impacto do emprego desta estratégia de mobilidade no desempenho de duas técnicas de balanceamento de carga consideradas estado-da-arte em redes de sensores sem fio orientadas a eventos. Neste trabalho foi considerado o consumo de energia que o nodo gasta com o sensoriamento, mas o consumo energético gasto com o movimento está fora do escopo.

Palavras-chave: Redes de sensores sem fio, Sensores móveis, Balanceamento de carga, Cobertura, Simulação, Eboracum.

ABSTRACT

GONZÁLEZ, Andrea Veronica. **Sensor Networks with Mobile Nodes: Investigating the Effects of Mobility on Sensing Coverage and Load Balancing**. 2016. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Programa de Pós-Graduação em Computação, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

The nodes mobility in wireless sensor networks has been employed to solve communication problems through mobile data mulling or base stations, or yet to improve coverage using mobile sensor nodes, which move to sensing uncovered areas. However, one of the main challenges in wireless sensor networks is the energy consumption, since the network lifetime depends on the node battery charge. In order to increase the lifetime of the event-oriented networks, dynamic load balancing strategies exploit redundancy in the nodes sensing areas and avoid that more than one node process the same event. Mobility as well as the load balancing are important dynamic adaptations that can be employed to improve the efficiency of sensor networks, but the integrated use of these two adaptations needs to be investigated. This work evaluates the effects of the sensor nodes mobility both on network coverage and on the efficiency of load balancing techniques used in event-oriented sensor networks. In the context of this work, an strategy has implemented, which moves nodes based on the action of repulsion forces, aiming to spread nodes over the area of interest and improve network coverage. Its impact on coverage has assessed in different deployment scenarios and networks with different densities. First, when nodes are deployed at random, then mobility allows them to redistribute and maximize the network coverage. In a second moment, the strategy is applied when nodes begin to be deactivated by the discharge of their batteries, where the mobility can minimize the effect of the deactivation of a node of the network. In addition, experiments have carried out in order to observe the impact of the use of this mobility strategy on the efficiency of two load balancing techniques considered state-of-the-art in event-oriented wireless sensor networks. In this work we considered the energy consumption that the node spends with the sensing, but the energy consumption spent with the movement is out of scope.

Keywords: Wireless sensors networks, Mobile sensors, Load balancing, Coverage, Simulation, Eboracum.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Arquitetura de uma RSSF	17
Figura 2	Classificação para aplicação das RSSF	18
Figura 3	Diferenciação periódica dos nodos - Mudança de nodos operários para nodos rainha e vice-versa	26
Figura 4	Fluxo de Projeto de uma RSSF dedicada para uma aplicação específica	30
Figura 5	Infraestrutura do Eboracum: Camadas para modelagem de redes reativas	30
Figura 6	Primitivas de modelagem da plataforma: Hierarquia de classes da plataforma	31
Figura 7	Forças repulsivas conforme distância dos vizinhos	38
Figura 8	Método campo potencial ilustrado	39
Figura 9	Primitivas para suportar nodos móveis no Eboracum	40
Figura 10	Exemplo do método proposto com 64 nodos implantados aleatoriamente	41
Figura 11	Primitivas propostas para modelagem dinâmica de nodos controladores	41
Figura 12	Comparação dos eventos detectados diariamente com nodos estáticos versus nodos móveis distribuídos em <i>grid</i> para as diferentes densidades	45
Figura 13	Comparação de eventos detectados diariamente com nodos estáticos versus nodos móveis distribuídos em <i>grid</i> com a menor densidade (49) e com a maior densidade (100)	46
Figura 14	Total de eventos sensoriados por nodos estáticos versus nodos móveis distribuídos em <i>grid</i>	46
Figura 15	Comparação dos eventos sensoriados por dia por nodos móveis versus nodos estáticos em uma distribuição randômica para as 4 densidades	48
Figura 16	Comparação dos eventos sensoriados por dia por nodos móveis versus nodos estáticos em uma distribuição randômica comparando a menor densidade (49) e a maior densidade (100)	48
Figura 17	Total de eventos sensoriados pelos nodos móveis versus estáticos em uma distribuição randômica	49
Figura 18	Nodos Móveis versus Balanceamento de Carga em Rede com Implantação em <i>grid</i>	49

Figura 19	Comparação dos eventos sensoriados diariamente em rede com nodos móveis implantados em grade com a técnica de balanceamento de carga <i>Ant-based</i> e sem balanceamento de carga para as 4 densidades	54
Figura 20	Comparação dos eventos sensoriados diariamente em rede com nodos móveis implantados em grade com a técnica de balanceamento de carga <i>Ant-based</i> e sem balanceamento de carga para menor densidade (49) e maior densidade (100)	55
Figura 21	Comparando os eventos sensoriados diariamente em redes com nodos móveis implantados em grade com o balanceamento de carga PS e sem balanceamento de carga para as 4 densidades	55
Figura 22	Comparando os eventos sensoriados diariamente em redes com nodos móveis implantados em grade com o balanceamento de carga PS e sem balanceamento de carga comparando a menor densidade (49) e a maior densidade (100)	56
Figura 23	Total de eventos sensoriados por dia com os balanceamentos de carga combinados com nodos móveis e os nodos móveis simples (sem balanceamento de carga) em redes em grade	56
Figura 24	Total de eventos sensoriados por dia com balanceamento de carga com nodos móveis versus nodos móveis simples (sem balanceamento de carga) em uma implantação aleatória	57
Figura 25	Comparação de eventos sensoriados por dia em redes com nodos móveis implantados aleatoriamente com balanceamento de carga usando o PS e sem balanceamento de carga para as 4 densidades	58
Figura 26	Comparação de eventos sensoriados por dia em redes com nodos móveis implantados aleatoriamente com balanceamento de carga usando o PS e sem balanceamento de carga comparando a menor densidade (49) e a maior densidade (100)	58
Figura 27	Comparação de eventos sensoriados por dia em redes com nodos móveis implantados aleatoriamente com balanceamento de carga usando o Ant e sem balanceamento de carga para as 4 densidades	59
Figura 28	Comparação de eventos sensoriados por dia em redes com nodos móveis implantados aleatoriamente com balanceamento de carga usando o Ant e sem balanceamento de carga comparando a menor densidade (49) e a maior densidade (100)	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Dados que compõem o relatório de simulações	35
Tabela 2	Custos energéticos	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACO	Ant Colony Optimization
ACS	Ant Colony Systems
BFS	Breadth-First Search
BS	Base Station
CPU	Central Processing Unit
FIFO	First In First Out
GA	Genetic Algorithm
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical User Interface
IA	Inteligência Artificial
MANET	Mobile Ad Hoc Network
MEMS	Microelectromechanical Systems
MoC	Model of Computation
MWSN	Mobile Wireless Sensor Network
PS	Pheromone Signaling
PSO	Particle Swarm Optimization
QCA	Quantum-inspired Cultural Algorithm
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RSSFm	Rede de Sensores Sem Fio Móveis
WSN	Wireless Sensor Network

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Motivação	13
1.2	Objetivos	14
1.3	Organização do Trabalho	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TRABALHOS RELACIONADOS	16
2.1	Redes de Sensores Sem Fio	16
2.2	Redes de Sensores Sem Fio Móveis	19
2.2.1	Desafios em RSSFM	21
2.2.2	Estratégias para mobilidade em RSSFMs	22
2.3	Balanceamento de Carga	23
2.3.1	<i>Pheromone Signaling load balancing</i>	25
2.3.2	<i>Ant-based Load Balancing</i>	26
3	EBORACUM: SIMULAÇÃO DE RSSF REATIVAS	29
3.1	Eboracum: Visão Geral	29
3.2	Eboracum: Infraestrutura e Arquitetura	30
3.2.1	Modelo da Plataforma	30
3.2.2	Modelo de Aplicação	32
3.3	Eboracum: Simulação e Avaliação	33
4	MOBILIDADE EM RSSF: ESTRATÉGIA PROPOSTA	36
4.1	Campos Potenciais	36
4.2	Mobilidade dos nodos no Eboracum	39
4.3	Balanceamento de Carga com Nodos Móveis	40
5	EXPERIMENTOS E RESULTADOS	43
5.1	Metodologia	43
5.2	Eficiência dos Nodos Móveis em Redes com Implantação em Grade	44
5.3	Eficiência dos Nodos Móveis em Redes com Implantação Randômica	47
5.4	Combinando Nodos Móveis com Balanceamento de Carga	47
5.4.1	Balanceamento de Carga com nodos móveis em grade	50
5.4.2	Balanceamento de Carga com Nodos Móveis em Implantação Randômica	51
6	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos dos últimos anos tanto na área de sensores como de circuitos integrados e redes, motivaram a concepção de sistemas compostos de sensores ligados em rede, conhecidos como redes de sensores sem fio (RSSFs ou WSN, do inglês, *Wireless sensor networks*). Inicialmente, as RSSF começaram a ser empregadas na área militar com o principal objetivo de monitorar os campos de batalha, porém o interesse por esta tecnologia foi rapidamente difundido tornando-se objeto de estudos científicos com larga aplicação em diversas áreas.

As RSSFs são sistemas distribuídos com diversos domínios de aplicação, muitas delas visando o monitoramento de fenômenos físicos e naturais como atividade vulcânica (WERNER-ALLEN et al., 2006), monitoramento da vida selvagem (TOLLE et al., 2005), aquático (KIM et al., 2008) e de ambiente (SELAVO et al., 2007), bem como no monitoramento de estruturas (CERIOTTI et al., 2009). As RSSFs também vêm sendo empregadas em aplicações de automação industrial, segurança e também em cidades inteligentes. As redes de sensores permitem monitorar variáveis ambientais, podendo, por exemplo, ser usadas para controle de ambientes industriais, permitindo a detecção de vazamentos de gás ou produtos químicos em refinarias e o monitoramento de variáveis, como temperatura e humidade. Em aplicações de meio-ambiente, RSSFs podem ser empregadas para o monitoramento da vida animal ou na detecção de incêndios em florestas.

Geralmente, as RSSF são compostas de vários nodos sensores que se comunicam entre si, formando uma rede *ad hoc* (rede sem ponto de acesso, ou seja, sem infraestrutura fixa), de forma que mensagens enviadas por todos os nodos tenham como alcançar a estação base (também chamada de *sink*) através de conexões *multi-hop* (conexões de múltiplos saltos, ou seja, as informações passam nodo a nodo até chegar em uma estação base).

Redes de sensores podem funcionar de duas formas distintas. Quando uma RSSF captura periodicamente variáveis de interesse e envia os dados coletados através da rede até uma estação base, então esta é uma rede proativa. No entanto, se os usuários estão interessados apenas em obter informações da rede somente quando

algum evento acontece, então a RSSF é reativa, ou seja, esta opera capturando dados apenas quando ocorre um evento, o que pode reduzir o consumo dos nodos e o tráfego na rede.

Como as redes podem ser compostas de muitos nodos, o custo baixo é uma exigência importante para viabilizar a maioria das aplicações. Apesar dos avanços tecnológicos, devido as limitações de custo, os nodos empregados em RSSF usualmente possuem recursos limitados, no que se refere a poder de processamento e capacidade de memória. Outra limitação se refere ao consumo energético, visto que em muitos ambientes monitorados não é viável manter os nodos conectados a uma fonte de energia, estes sensores funcionam com baterias.

Além do projeto dos nodos sensores em si, projetar uma RSSF dedicada para uma determinada aplicação envolve uma série de decisões de projeto, que devem procurar prover os requisitos não funcionais requeridos pela aplicação, tais como tempo de vida da rede, tempo de resposta a eventos, área de cobertura, dentre outros aspectos. Como os nodos frequentemente estão espalhados em uma área grande e de difícil acesso, o tempo de vida da rede, ou seja, o provimento de seus serviços depende diretamente da carga das baterias dos nodos.

Em redes *multi-hop*, a descarga das baterias dos nodos depende de sua localização, visto que nodos conectados diretamente ao *sink* tendem a ser usados em um maior número de transferências de dados, o que acarreta um maior consumo de energia. Estratégias dinâmicas podem ser empregadas para dividir a carga de trabalho entre os nodos da rede, considerando também a posição dos nodos e visando aumentar seu tempo de vida. Em redes reativas, a carga de trabalho dos nodos não é estática, mas sim gerada pela ocorrência de eventos na área de cobertura. Nestes cenários, estratégias para balanceamento desta carga, podem evitar que mais de um nodo sensorie e processe um dado evento, assim reduzindo o consumo dos nodos (CALISKANELLI, 2014).

Além disso, os nodos de uma RSSF podem ser perdidos ou saírem de serviço por diferentes razões como falta de energia, ataques à segurança, ou ainda, falhas nos componentes ou na comunicação (RUIZ, 2003), o que pode fazer com que a cobertura da rede seja reduzida ou mesmo que a RSSF pare de oferecer seus serviços, pois não consegue enviar os dados coletados até à estação base. Nestes casos, nodos defeituosos deveriam ser substituídos para que a rede volte a funcionar de forma apropriada.

Tradicionalmente os nodos de uma rede são estáticos, ou seja, não mudam de posição após sua implantação. No entanto, sensores podem ser acoplados a veículos ou robôs, de forma que sua posição não seja mais fixa. Nestes casos, a rede é classificada como uma rede de sensores sem fio móvel (RSSFM). A mobilidade em RSSF pode ser empregada em diferentes cenários, variando entre o emprego de *sinks*

móveis, coletores de dados móveis e até nodos sensores móveis. Outras variantes também podem ser encontradas no projeto de RSSF móveis dependendo do tipo de movimento realizado e do mecanismo utilizado no movimento, como por exemplo sensores com motor, ou ainda sensores acoplados a um robô ou drone.

1.1 Motivação

Apesar de muitos trabalhos abordarem a mobilidade apenas de estações base e coletores de dados, em algumas aplicações, a mobilidade dos nodos sensores é empregada visando melhorar uma configuração de implantação da rede, ou ainda resolver ou amenizar alguns problemas, como por exemplo, melhorar a cobertura da rede ou substituir nodos defeituosos. A mobilidade pode ainda melhorar a comunicação entre os nodos, permitindo que outras possibilidades de conexão possam ser empregadas e desta forma melhorar a eficiência da rede como um todo.

Nodos sensores móveis podem ser empregados para maximizar a cobertura, sobretudo quando a implantação dos nodos ocorre através do lançamento destes de forma aleatória sobre a área de interesse. Esse tipo de implantação da rede é comum principalmente em áreas remotas ou de difícil acesso, porém acaba gerando problemas como redundância, uma vez que algumas regiões ficam com maior concentração de nodos que acabam sensoriando os mesmos eventos, ou ainda, regiões que ficam sem cobertura. Buscando solucionar esses problemas, pesquisadores propuseram estratégias para posicionamento ou reposicionamento dos nodos visando melhorar a cobertura (HOWARD; MATARIĆ; SUKHATME, 2002a) (LI et al., 2009).

Em (HOWARD; MATARIĆ; SUKHATME, 2002a), campos potenciais aliados a forças virtuais de atração e repulsão são empregados para reposicionar os nodos e em (LI et al., 2009) sensores do tipo ultrassom são adicionados aos nodos e informações obtidas por esta tecnologia são empregadas para reposicioná-los de forma a aumentar a cobertura da rede. A implantação dos nodos sensores também foi abordada no campo da robótica (HOWARD; MATARIĆ; SUKHATME, 2002b), onde os sensores são implantados de forma iterativa, utilizando as informações de localização obtidas a partir da implantação anterior. Nesta abordagem iterativa, uma vez que os sensores são implantados um a um, o tempo de implantação é longo, o que pode aumentar significativamente o tempo de inicialização da rede.

Visando suportar o projeto e avaliação de estratégias dinâmicas para RSSF relativas, o framework EBORACUM (BRISOLARA; FERREIRA; SOARES INDRUSIAK, 2015) foi recentemente proposto. Este framework suporta a modelagem e simulação de RSSF usando primitivas de alto nível de abstração, que permitem representar aspectos da plataforma, bem como da aplicação. Usando modelos construídos a partir destas primitivas, é possível avaliar configurações de projeto bem como estratégias

de gerenciamento voltadas a RSSF reativas. Em (FERREIRA; BRISOLARA; INDRUSIAK, 2015), duas estratégias bioinspiradas para balanceamento de carga em RSSF reativas foram implementadas e avaliadas usando Eboracum. Ambas estratégias exploram a redundância dos nodos.

O reposicionamento de nodos sensores em uma RSSF reativa pode ser usado para aumentar a sobreposição das áreas de sensoriamento dos nodos, consequentemente criando cenários com redundância. Assim, da mesma forma que a mobilidade afeta a cobertura da rede, esta afetará também estratégias de balanceamento de carga, sobretudo estratégias que exploram a redundância. No entanto, a eficiência das técnicas de balanceamento propostas para redes reativas foram testadas apenas com RSSFs estáticas (FERREIRA; BRISOLARA; INDRUSIAK, 2015) sem considerar mobilidade dos nodos.

1.2 Objetivos

O foco deste trabalho é investigar RSSFMs e o impacto da mobilidade dos nodos na cobertura da rede e no resultado alcançado por técnicas de balanceamento de carga propostas para redes reativas. Para alcançar este objetivo, uma estratégia para mobilidade de nodos inspirada no equilíbrio de forças empregado por HOWARD; MATARIĆ; SUKHATME (2002a) foi proposta, a qual visa melhorar a cobertura da rede. A estratégia proposta baseia-se em cálculos simples, permitindo que esta possa ser empregada em ambientes de simulação.

Neste trabalho, o impacto da estratégia de mobilidade proposta é avaliado em dois cenários. Primeiramente, quando nodos são implantados de forma aleatória, e a redistribuição dos mesmos pode maximizar a cobertura da rede. Em um segundo momento, a estratégia é aplicada quando nodos começam a descarregar as baterias e são desativados, onde a mobilidade pode minimizar o efeito da desativação de um nodo. Para atingir estes objetivos, a estratégia foi implementada no EBORACUM e experimentos de avaliação de cobertura foram realizados, para diferentes configurações de rede. Além disso, experimentos foram realizados de forma a observar o impacto do emprego desta estratégia de mobilidade no desempenho das técnicas de balanceamento de carga já implementadas no simulador.

Em nossos experimentos, o tempo de vida da rede é avaliado em diferentes configurações de rede, considerando a descarga das baterias dos nodos. No entanto, esta descarga não considera o custo energético relacionado ao movimento, considerado fora do escopo deste trabalho.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte maneira. No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica no qual o trabalho se baseou e são discutidos trabalhos relacionados. O Capítulo 3 revisa o framework Eboracum, empregado para a simulação de redes de sensores reativas usando modelos de alto nível de abstração. No Capítulo 4, a estratégia para mobilidade de nodos investigada é apresentada, detalhando sua fundamentação bem como discutindo sua implementação no *framework* Eboracum. Os experimentos realizados são discutidos no Capítulo 5 e as conclusões e trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 6.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo revisa os principais conceitos e fundamentações teóricas relevantes para a compreensão e desenvolvimento deste trabalho. Definições importantes no domínio de redes de sensores sem fio e redes de sensores sem fio com nodos móveis são apresentadas neste capítulo, bem como são discutidas estratégias de mobilidade de nodos em RSSFs. Este capítulo inclui também uma revisão de abordagens para balanceamento de carga em RSSF, com enfoque as abordagens empregadas nos experimentos.

2.1 Redes de Sensores Sem Fio

As RSSFs são tipicamente uma sub-classe das redes *ad hoc* consideradas também um sistema distribuído embarcado, onde os sensores têm como objetivo, monitorar algum fenômeno físico e onde é possível coletar e analisar seus dados conforme a sua aplicação. Inúmeras aplicações de sensoriamento requerem centenas e até milhares de nodos frequentemente implantados em áreas remotas ou inacessíveis, onde redes cabeadas seriam inviáveis.

Com o passar do tempo alguns nodos atingem níveis de energia que podem restringir de forma parcial ou total sua capacidade de sensoriamento o que acaba ocasionando o seu desligamento da rede comprometendo a comunicação e reduzindo a área de cobertura da rede. Problemas podem ocorrer já no momento da implantação da RSSF devido à falhas ou defeitos dos nodos.

Os nodos sensores comunicam-se entre si usando comunicação sem fio, usualmente via rádio. Como pode ser observado na Figura 1, as conexões entre os nodos definem uma rede *multi-hop*, a qual permite através de várias transmissões que um dado enviado por um nodo alcance a estação base, também chamada de *sink*.

A estação base, por sua vez, pode ter acesso tanto à rede como à internet, possibilitando que os dados coletados possam ser analisados remotamente pelo usuário final. Segundo (DARGIE; POELLABAUER, 2010), esta arquitetura permite a disseminação

dos dados de cada sensor para o processamento, visualização, análise e armazenamento em um sistema remoto.

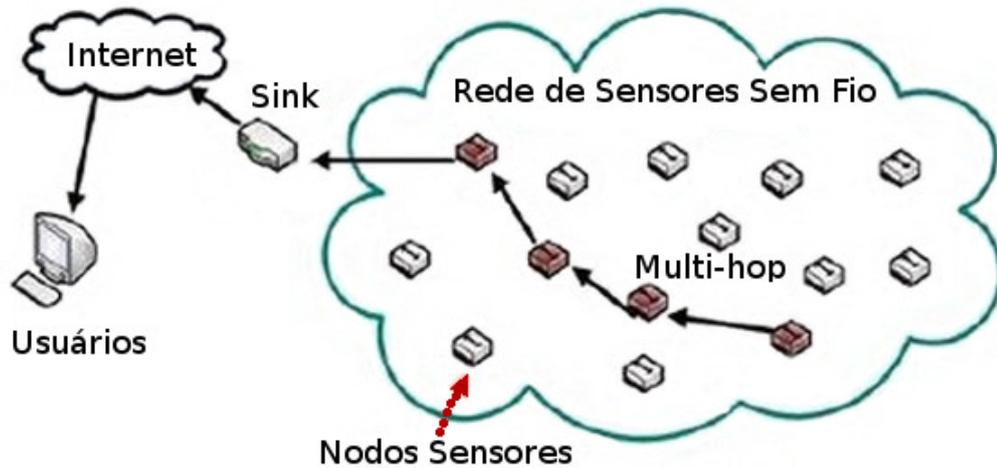


Figura 1: Arquitetura de uma RSSF. Baseada em (Salama Ahmed, 2015)

Segundo MOTTOLA; PICCO (2011), as aplicações de RSSFs podem ser caracterizadas quanto a cinco aspectos: objetivo, padrão de interação, mobilidade, espaço e tempo. Estes aspectos também são usados para classificar uma solução para uma aplicação de RSSF, como proposto na Figura 2.

Classificação para a aplicação das RSSFs, proposta por (MOTTOLA; PICCO, 2011):

1. Objetivo: uma RSSF pode realizar apenas o sensoriamento ou pode além de monitorar, atuar sobre o objeto de monitoramento.
2. Padrão de Interação: está relacionado ao propósito da comunicação. O padrão "Um para Muitos" está normalmente relacionado à transmissão de comandos para configuração da rede. "Muitos para Muitos" normalmente é utilizada quando há vários *sinks* e a informação deve ser repassada a todos eles. "Muitos para Um" é a situação mais comum, quando os nodos enviam informação para um *sink* que realiza a coleta de dados.
3. Mobilidade: muitas RSSFs possuem formação em topologia fixa (CHEN; VARSHNEY, 2004), ou seja é constituída por nodos estáticos. Entretanto, pode-se ter mobilidade de três formas: i) quando é utilizado um coletor de dados móvel (ou *data-mulling*), que se movimenta em uma rede fixa realizando coletas de dados sensorizados; ii) quando é utilizada o *sink* móvel, ou seja, uma estação base que se move pela rede enviando os dados até o destino final; iii) nodos sensores móveis, que podem ser anexados à algum agente, como robôs (ERMAN et al.,

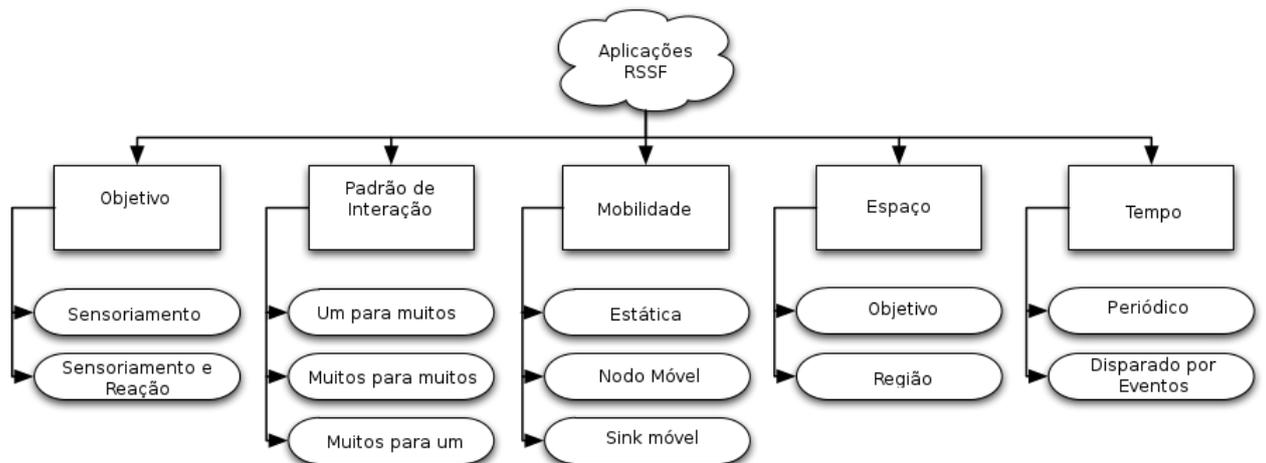


Figura 2: Classificação das RSSFs segundo sua aplicação (MOTTOLA; PICCO, 2011)

2008), (FREITAS et al., 2010), (VALENTE et al., 2011), pessoas (ARAÚJO; BECKER, 2011), ou animais (LIU et al., 2004), ou ainda, estão em algum ambiente que lhes proporcionem a mobilidade, como correnteza de oceanos ou rios.

4. Espaço: está relacionado ao significado da informação coletada. No modo "Global" o dado de um único sensor não é relevante, mas apenas os dados coletados de toda a rede fazem sentido. No modo "Regional" onde importa a informação coletada por regiões da área sensoriada. Ou ainda, é possível ter uma terceira classificação quanto ao espaço, que seria a "Única", quando o dado de um nodo sensor é tão importante quanto qualquer outro. Um exemplo de aplicação da classificação única, seria o monitoramento de animais (LIU et al., 2004) ou em seres humanos (ARAÚJO; BECKER, 2011).
5. Tempo: há uma relação de tempo na geração da informação, pois as operações de monitoramento e envio de dados podem ser periódicas ou orientadas a eventos. Quando há um intervalo de tempo pré-definido para a realização destas tarefas, diz-se que a rede é periódica e quando é detectado um evento e este exige algum tratamento (envio dos dados coletados ou processamento dos mesmos) diz-se que a rede é orientada a eventos ou reativa.

Segundo LOUREIRO et al. (2003), as RSSFs tendem a ser autônomas, requerem um alto grau de cooperação para executar as tarefas definidas pela aplicação e normalmente possuem um grande número de nodos distribuídos, têm restrições de energia, e devem possuir mecanismos para auto-configuração e adaptação devido a problemas como falhas de comunicação e perda de nodos. Estratégias dinâmicas de adaptação podem ser empregadas visando melhorar a eficiência da rede como um

todo. Neste capítulo, trabalhos que exploram mobilidade de nodos e balanceamento de carga na rede são discutidos nas seções 2.2.2 e 2.3, respectivamente.

2.2 Redes de Sensores Sem Fio Móveis

As redes de sensores sem fio podem ser vistas como um tipo especial de rede móvel *ad hoc* MANET (do inglês, *Mobile Ad hoc Network*) e como uma das vertentes da computação ubíqua (LOUREIRO et al., 2003). Esse tipo de rede possui um grande número de elementos distribuídos, operam sem intervenção humana direta, têm restrições severas de energia, e devem possuir mecanismos para autogerenciamento em função de sua aplicação em áreas remotas. Quando os nodos de uma rede são móveis, a rede é classificada como RSSFM (Rede de Sensores Sem Fio Móvel). Porém, há uma diferença entre RSSFs do tipo MANET e tipo RSSFMs, pois uma MANET tem mobilidade arbitrária enquanto que em uma RSSFM essa mobilidade é intencional e planejada.

De acordo com (MUNIR et al., 2007), uma rede de sensores sem fio móvel recebe este nome por apresentar mobilidade dos nodos sensores, do *sink* ou do coletor de dados. É considerada como a maior vantagem das RSSFMs sobre as RSSF estáticas, a capacidade de utilizar a energia gasta com a comunicação de forma mais eficiente. Nas RSSFs estáticas os nodos mais próximos do *sink* geralmente descarregam suas baterias mais rápido que nodos não diretamente conectados ao *sink*, isso devido ao fato dos nodos próximos ao *sink* participarem de um maior número de transmissões de mensagens. A descarga destes nodos chave na transmissão dos dados causa a "morte" da rede. Já em uma RSSFM, a mobilidade dos nodos proporciona uma melhora na cobertura da rede, visto que é possível reposicionar nodos de forma a maximizar a cobertura e garantir a conectividade da rede, ou seja, que todos os nodos consigam atingir o *sink* através de um dos caminhos da rede. Esta mobilidade pode também ser usada para maximizar a cobertura em redes cujos nodos são implantados em posições aleatórias.

Quando a mobilidade é usada de forma a reduzir o número de transmissões (ou *hops*) exigidas para uma mensagem atingir o *sink*, por exemplo, movendo o próprio *sink* ou usando um coletor de dados, um benefício adicional é alcançado que é uma maior fidelidade dos dados decorrentes da redução do número de *hops* o que minimiza a possibilidade de erros de transmissão.

A mobilidade relativa entre os nodos sensores, o *sink* e o fenômeno tem consequências importantes no funcionamento da RSSF e a rede deve manter o monitoramento do evento de interesse do observador, independente desta mobilidade. A mobilidade pode estar envolvida nos diferentes componentes de rede. Por exemplo, os nodos podem ser móveis e a estação base estática, ou vice-versa. Neste traba-

lho, considera-se que uma RSSFM como uma rede em que pelo menos um dos seus componentes é móvel.

Nas RSSFMs é possível encontrarmos diferentes tipos de movimentos dependendo do tipo de aplicação da rede, ou seja, uma aplicação cujo objetivo é monitorar o movimento de veículos exige um tipo de movimento enquanto que uma aplicação cujo objetivo seja monitorar alguma atividade animal na natureza, exige outro tipo de movimento. Esses movimentos podem ser, aleatórios ou controlados.

Os modelos a seguir utilizam a aleatoriedade, ou seja, movimentos independentes de outros nodos na rede. Este tipo de movimento é considerado adequado para o tipo de rede *ad hoc*, onde usuários móveis entram e saem da rede aleatoriamente.

- *Random Walk Mobility Model*: Um modelo de mobilidade simples, baseado em velocidades e direções aleatórias.
- *Random Waypoint Mobility Model*: Um modelo que inclui pausas no tempo entre as variações da velocidade e direção.
- *Random Direction Mobility Model*: Um modelo que força o nodo móvel a ir para a borda da área de simulação antes de mudar a direção e a velocidade.
- *A Boundless Simulation Area Mobility Model*: Um modelo que converte uma área de simulação retangular 2D em uma área 3D.
- *Gauss-Markov Mobility Model*: Um modelo que utiliza um parâmetro de ajuste para variar o grau de aleatoriedade no padrão de mobilidade.
- *A Probabilistic Version of the Random Walk Mobility Model*: Um modelo que utiliza um conjunto de probabilidades para determinar a próxima posição do nodo móvel.
- *City Section Mobility Model (Manhattan)*: Uma área de simulação que representa as ruas em uma cidade.

Algumas aplicações exigem modelos de movimento que considerem o movimento e ou posição de outros nodos, ou seja, que considerem o movimento de grupos e não de nodos isoladamente. Nestes casos, modelos de movimento específicos devem ser empregados, tais como:

- *Exponential Correlated Random Mobility Model*: Um modelo de mobilidade de grupo que usa uma função de movimento para criar os movimentos.
- *Column Mobility Model*: Um modelo de mobilidade de grupo, onde um conjunto de nodos móveis de uma linha se movem uniformemente para frente e em uma direção particular.

- *Nomadic Community Mobility Model*: Um modelo de mobilidade em grupo onde um conjunto de nodos móveis se move junto de um local para outro.
- *Pursue Mobility Model*: Um modelo de mobilidade de grupo, onde o conjunto de nodos móveis segue um determinado alvo.
- *Reference Point Group Mobility Model*: Um modelo de mobilidade em grupo, onde os movimentos são baseados dependendo do caminho percorrido por um centro lógico.

2.2.1 Desafios em RSSFM

Segundo REZAZADEH (2012), as redes RSSFM trazem alguns desafios como a localização dos nodos e a conexão da rede dinâmica. Em uma rede com nodos fixos, sabe-se o local onde o nodo encontra-se, mas em uma RSSFM, é necessário o emprego de algoritmos de localização dos mesmos. Além disso, a medida em que os nodos são reposicionados, a rede precisa ser reconstruída, assim a topologia da rede é modificada, exigindo o emprego de algoritmos de roteamento e protocolos que consideram esta mobilidade.

Desafios da mobilidade em RSSFM também são discutidos em DI FRANCESCO; DAS; ANASTASI (2011), dentre eles:

(i) Contato: Uma vez que a comunicação é possível apenas quando os nodos estão no alcance do raio de comunicação um dos outros, é necessário fazer a detecção da presença de um nodo móvel.

(ii) Gerenciamento de energia e consciência de movimento: Em alguns casos, é possível explorar o conhecimento sobre o padrão da mobilidade para otimizar ainda mais a detecção dos nodos móveis. Isto é, se os tempos de visita são conhecidos ou podem ser previstos com uma certa precisão, os nodos sensores podem ser "acordados" somente quando eles esperam que um elemento móvel esteja em seu raio de comunicação.

(iii) Transferência de dados confiável: Como o contato entre os nodos é mais rápido e menos frequente, há necessidade de maximizar o número de mensagens corretamente enviadas ao *sink*. Além disso, como os nodos se movem durante a transferência de dados, a troca de mensagens deve ter consciência desse movimento.

(iv) Controle da mobilidade: Quando o movimento dos nodos pode ser controlado, uma política para visitar nodos na rede tem de ser definida. Para este fim, o caminho e a velocidade ou tempo de permanência de nodos móveis têm de ser definidos, a fim de melhorar o desempenho da rede.

Adicionalmente, os modelos de consumo de energia de uma RSSF diferem dos modelos de uma RSSFM, uma vez que neste último, a descoberta da rede e atualização dos dados ocorrem com maior frequência, aumentando o consumo

energético dos nodos. Além disso, para uma análise completa de eficiência energética de uma dada configuração de RSSFM, também devem ser considerados os custos para movimentar os nodos, a menos que este movimento independa da bateria do nodo da rede.

2.2.2 Estratégias para mobilidade em RSSFMs

Vários grupos têm investigado estratégias para a mobilidade dos nodos com diferentes objetivos. Em AZIZ et al. (2011), os autores propõem um algoritmo de otimização baseado em enxames de partículas PSO (do inglês, *Particle Swarm Optimization*), para o reposicionamento dos nodos em RSSF. Este algoritmo é executado em duas etapas, sendo a primeira para maximizar a cobertura de rede e a segunda para reduzir o consumo de energia. Os autores levam em conta a cobertura e o custo de movimento dos sensores. A cobertura é otimizada pelo rearranjo da posição dos sensores, enquanto a energia é conservada, minimizando a distância máxima do movimento dos sensores. O desempenho do algoritmo é avaliado através de simulações nas quais são usadas diferentes configurações de rede. Os resultados da simulação mostram que o algoritmo proposto aumenta a cobertura e reduz o consumo de energia significativamente.

Em GUO et al. (2013), os autores utilizam um algoritmo inspirado em um QCA (do inglês, *Quantum-inspired Cultural Algorithm*) para reposicionamento dos nodos baseando-se em um modelo de sensoriamento probabilístico para maximizar a área de cobertura da rede e minimizar a redundância dos nodos.

Recentemente, um algoritmo de implantação distribuída para RSSFs propôs aumentar a cobertura (SAHA; DAS, 2016). A solução proposta é iterativa e com base na geometria, usando Diagramas de Voroni para particionar o espaço entre os sensores. Este diagrama representa a informação mais próxima de um conjunto de sensores, que é usado para identificar os buracos de cobertura e mudar os nodos de posição visando reduzir estes buracos.

Além destas propostas mais recentes, (HOWARD; MATARIĆ; SUKHATME, 2002a) propôs uma estratégia de mobilidade empregada no domínio de robótica móvel e a qual vem servindo de inspiração para vários pesquisadores na área de RSSF. Nesta abordagem os nodos são tratados como partículas virtuais que estão sujeitas a forças virtuais, essas forças repelem os nodos tanto uns dos outros quanto dos obstáculos. As forças repulsivas entre os nodos são tais que uma configuração inicial compacta vai fazer eles logo se espalharem. As forças repulsivas entre os nodos e os obstáculos, por outro lado, se asseguram que a rede se espalhará ao redor dos obstáculos ao invés de através deles. O efeito é a implantação da rede de tal forma que a área de cobertura seja maximizada.

A estratégia utilizada por (HOWARD; MATARIĆ; SUKHATME, 2002a), além das

forças de atração e repulsão baseadas no campo potencial descritas acima, os nodos estão também sujeitos a forças de fricção viscosa. Esta força é usada para garantir que a rede atinja o equilíbrio, por exemplo, para assegurar que todos os nodos farão uma parada final. No entanto, a força viscosa não impede a rede de reagir às mudanças do ambiente. Se algo se move, a rede automaticamente se reconfigura para o ambiente modificado e novamente retorna ao estado de equilíbrio estático. Então, os nodos se movem somente se necessário e conseqüentemente economizando energia.

Técnicas de campo potencial para aplicações de robótica foram descritas pela primeira vez por Khatib (KHATIB, 1986) e desde então têm sido muito usadas pela comunidade que estuda mobilidade na robótica para tarefas como navegação local e desvio de obstáculos. Neste trabalho estas forças também estão sendo usadas, com o objetivo de reposicionar os nodos após uma implantação inicial, que pode ser aleatória ou em *grid*, ou ainda quando os nodos descarregarem suas baterias, deixando falhas na cobertura na área de interesse da rede.

2.3 Balanceamento de Carga

O consumo energético hoje representa uma importante restrição ao projeto de RSSFs, pois à medida que os nodos descarregam suas baterias, a RSSF perde conectividade e cobertura, podendo inclusive não conseguir manter sua funcionalidade.

Diversos pesquisadores vêm buscando soluções para esse problema e com isto surgem novas estratégias que visam aumentar o tempo de vida das redes. Uma abordagem para prolongar o tempo de vida da rede é equilibrar o trabalho realizado pelos nodos que compõem a RSSF. Essa técnica é chamada de balanceamento de carga e consiste em distribuir as atividades computacionais e de comunicação entre os nodos da rede de forma equilibrada. Através do balanceamento de carga, espalha-se a carga sobre a rede evitando que pontos sejam sobrecarregados e aumentando o tempo de vida útil da rede (DAI; HAN, 2003).

De acordo com LEE; LEE (2012), muitos algoritmos de escalonamento têm sido propostos para solucionar o problema energético das RSSFs. O autor afirma que tal problema já foi convertido em um problema de programação inteira binária ao qual poderia ser facilmente aplicado um algoritmo guloso. Algoritmos estocásticos para otimização incluem algoritmos genéticos (GA do inglês, *Genetic Algorithm*), como o *Particle Swarm Optimization* (PSO) e o *Ant Colony Optimization* (ACO), usados para implementar estratégias de escalonamento de atividades de comunicação e sensoria-

mento. Em (DAI; HAN, 2003), visando aumentar o tempo de vida das redes, os autores projetaram um algoritmo focado nos nodos e que constrói uma árvore de balanceamento da carga de comunicação em RSSF com arquitetura assimétrica. A métrica

Chebyshev Sum foi utilizada para avaliar, através de simulação, o balanceamento das árvores de roteamento produzidas pelo algoritmo. Os autores afirmam que o algoritmo atinge árvores de roteamento que são efetivamente mais equilibradas do que o roteamento baseado em pesquisa em largura (BFS, do inglês, *Breadth-First Search*) e menor caminho obtido pelo algoritmo de Dijkstra.

Ainda com foco em balancear a carga referente a comunicação em uma RSSF, uma estratégia de balanceamento de carga focada em nodos considera a carga acumulada pelo tráfego de dados desde os nodos filhos em uma árvore de roteamento até seus nodos pais. A árvore de roteamento da RSSF é roteada pela estação base (*sink*). A carga dos nodos filhos adiciona carga a cada um dos pais dessa árvore, consequentemente os nodos sensores próximos ao *sink* serão sobrecarregados. O objetivo do balanceamento de carga centrado em nodos é distribuir bem os pacotes gerados pelos nodos sensores através de diferentes ramos da árvore de roteamento (DAI; HAN, 2003).

Segundo MOR; SAROHA (2013), a ideia por detrás do balanceamento de carga é distribuir a carga em todos os nodos que estão inativos ou que são menos utilizados evitando sobrecarregar nodos que encontram-se em posições estratégicas na rede cuja interrupção da operação pode quebrar a conectividade da rede ou reduzir consideravelmente sua cobertura. O autor ainda propõe classificar os algoritmos de balanceamento de carga em algoritmos estáticos, algoritmos dinâmicos e algoritmos adaptativos. Nos algoritmos estáticos (*offline*), toda a decisão de balanceamento é programada usando informações prévias do sistema, enquanto que em algoritmos dinâmicos (*online*), são usadas informações correntes dos nodos, como volume de trabalho ou energia da bateria, para balancear a carga. Algoritmos dinâmicos têm vantagens sobre algoritmos estáticos, pois têm a capacidade de explorar uma flutuação de curto prazo no sistema para aumentar a sua eficiência. No entanto, soluções dinâmicas incluem sobrecarga na coleta, armazenamento e análise do estado do sistema (YING; MING, 2010). Algoritmo adaptativo é um caso especial de algoritmo dinâmico, o qual adapta suas atividades alterando dinamicamente o algoritmo para modificar o estado do sistema (JABBAR et al., 2011).

Em CALISKANELLI (2014), a distribuição da carga de trabalho sobre todos os componentes da rede é apresentada como um problema análogo ao *Bin Packing problem* (DYCKHOFF, 1990). O *Bin Packing problem* é um conhecido algoritmo de distribuição de objetos, o qual é frequentemente aplicado a problemas de otimização de equipamentos, especialmente em alocação de recursos e questões de escalonamento (WIEDER; BRANDENBURG, 2013). Dados N itens, de tamanhos $S_1, S_2, S_3, S_4, \dots, S_N$, o objetivo é empacotar itens dentro de menor número possível de pacotes (*bins*).

Segundo CALISKANELLI (2014), em RSSFs técnicas clássicas de balanceamento

de carga são frequentemente aplicadas *offline*, ou seja, antes da execução (estática) e/ou usam um mecanismo de controle centralizado para referenciar a distribuição de carga na rede. Porém, tanto as técnicas estáticas e abordagens que implementam mecanismos de controle centralizados não lidam com a natureza dinâmica das RSSFs, o que tem motivado a investigação de estratégias dinâmicas e descentralizadas.

Embora vários trabalhos abordem o balanceamento de carga em RSSF, a grande maioria destes foca em redes periódicas, onde a carga a ser distribuída refere-se a comunicação dos dados até o *sink*, como em (DAI; HAN, 2003). No entanto, em cenários de RSSFs reativas com sobreposição nas áreas de cobertura, algoritmos de balanceamento de carga podem otimizar o uso dos recursos, evitando que nodos sensores redundantes realizem o mesmo trabalho. Além de reduzir o consumo dos nodos sensores, estas técnicas reduzem o tráfego na rede. Duas estratégias bioinspiradas para balanceamento dinâmico de carga em RSSF reativas, Pheromone Signaling (PS)(CALISKANELLI; BROECKER; TUYLS, 2014) e Ant-based (FERREIRA; BRISOLARA; INDRUSIAK, 2015), são descritas nas seções 2.3.1 e 2.3.2, respectivamente.

2.3.1 Pheromone Signaling load balancing

Inspirado no comportamento das abelhas, a técnica de balanceamento de carga nomeada *Pheromone Signaling* (PS) foi proposta em CALISKANELLI et al. (2013), visando dinamicamente distribuir a carga em uma RSSF reativa, explorando a redundância das redes. Nesta abordagem os nodos da rede são periodicamente diferenciados uns dos outros, de forma que tenhamos dois tipos distintos de nodos: os nodos rainhas, que podem processar os eventos e os nodos operários, que ficam em *stand by*. Desta forma, se um evento acontece em uma área coberta por mais de um nodo, apenas o nodo rainha irá tratar este evento e os demais irão permanecer em *stand by* para preservar suas baterias.

A diferenciação entre nodo rainha e nodo operário é feita através de uma transmissão periódica de feromônio do nodo rainha para seus vizinhos e a retransmissão do feromônio por seus receptores para a sua vizinhança. A retransmissão está limitada a um número de *hops* e a quantidade de feromônio decresce cada vez que é propagado. É através deste processo que o PS limita a faixa de influência de cada nodo rainha objetivando assim, manter dentro do possível a área de cobertura da RSSF e minimizar a redundância. Para que o balanceamento de carga aconteça, periodicamente, os nodos rainha devem ser substituídos por nodos que ficaram em *stand-by* no último período. Um nodo se transforma em nodo rainha quando o seu nível interno de feromônio for inferior a um valor limite. A diferenciação acontece se o nodo não recebe uma quantidade de feromônio suficiente de seus vizinhos para manter o seu nível de feromônio interno acima do limite. Como o nível de feromônio dos nodos aumenta com o passar do tempo, pois o mesmo recebe feromônios de seus vizinhos, o nível

de feromônio de todos os nodos é reduzido periodicamente. Na Figura 3 é possível observar a diferenciação de nodos rainha dos nodos operários, onde nodos rainhas são representados pelas esferas brancas e nodos operários pelas esferas azuis. Estas figuras também dão uma ideia sobre como esta diferenciação afeta a distribuição da carga em uma rede em grade (ou *grid*).

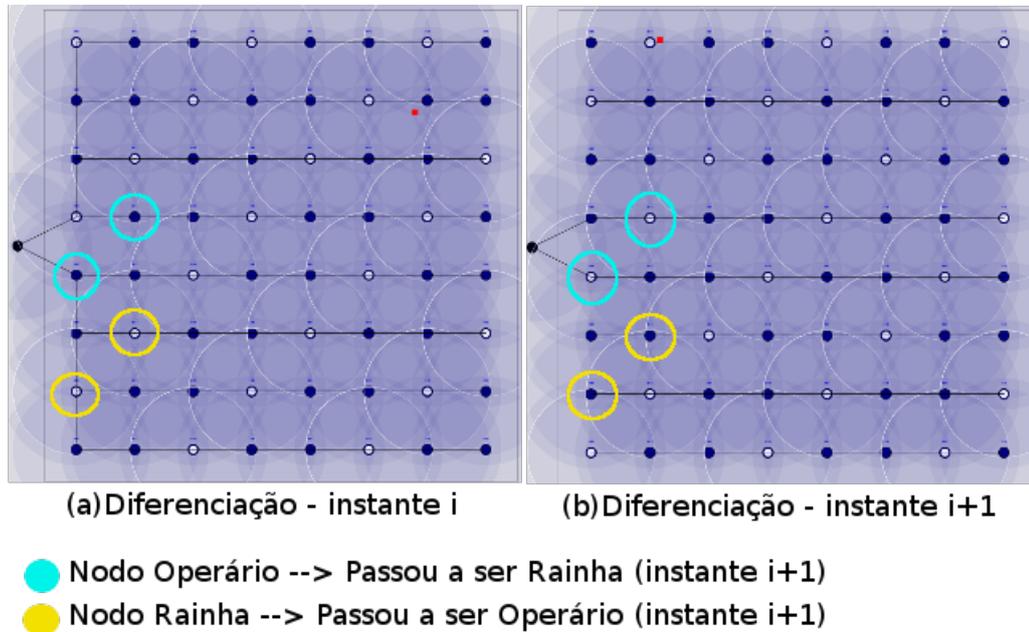


Figura 3: Diferenciação periódica dos nodos - Mudança de nodos operários para nodos rainha e vice-versa

Em CALISKANELLI et al. (2013) e em CALISKANELLI (2014), a técnica PS foi avaliada através de experimentos, que avaliaram a sua eficiência em RSSF reativas com nodos implantados em *grid*. Nestes experimentos, diferentes densidades de rede foram avaliadas considerando as métricas: disponibilidade dos serviços que são completados com sucesso sobre o número total de requisições dos serviços em um determinado período de tempo. Posteriormente, esta técnica foi implementada no simulador Eboracum (FERREIRA; BRISOLARA; INDRUSIAK, 2015) e avaliada considerando um modelo de cenário mais detalhado (raios circulares de sensoriamento e probabilidades mais realistas de detecção de eventos) e sua eficiência foi comparada a do *Ant*, outra abordagem bioinspirada para balanceamento de carga em RSSF.

2.3.2 *Ant-based Load Balancing*

Baseado no comportamento de colônias de formigas (ACS, do inglês, *Ant Colony Systems*), FERREIRA; BRISOLARA; INDRUSIAK (2015) propõem uma estratégia bioinspirada para dinamicamente balancear a carga em RSSFs reativas com o objetivo de aumentar o tempo de vida da rede. Assim como a estratégia PS, o *Ant* também explora a redundância na detecção de eventos pelos nodos da rede. Seguindo a

estratégia chamada aqui de *Ant*, ao detectar um evento, o nodo decide individualmente e *on-the-fly* se irá processar este evento, baseando-se em um modelo probabilístico. Este processo de decisão é disparado pela ocorrência de um evento no ambiente e é descentralizado. A ideia geral desta abordagem é dividir o trabalho entre os nodos sensores de uma mesma área considerando o número de nodos que sensoriam um mesmo evento ao mesmo tempo e o número de vezes que o nodo foi previamente envolvido no processamento de eventos.

Quanto mais trabalho o nodo realiza, diminui a probabilidade deste se envolver no tratamento de eventos, assim distribuindo a carga na rede. E o comportamento dos nodos em relação ao processamento de eventos pode ser entendido, conforme explicado em (FERREIRA; BRISOLARA; INDRUSIAK, 2015) e descrito a seguir.

Admitindo que existem J eventos para serem processados em uma RSSF cada evento j tem um estímulo s_j associado a ele. Como I nodos diferentes podem detectar os eventos, cada nodo $i \in I$ tem um limite de resposta θ_i . Então o nodo i se envolve no processamento do evento j com uma probabilidade dada pela Equação 1.

$$P_i(t) = \frac{s_j^2}{s_j^2 + \theta_i^2} \quad (1)$$

Os eventos têm o mesmo estímulo inicial s_0 . Os valores para cada estímulo em cada instante t são dados pela Equação 2, onde N_{act} é o número de vizinhos que sensoriam um evento t e N_j é o número máximo de vizinhos que podem sensoriar o mesmo evento. N_j^{act} é determinado pela comunicação dos nodos na vizinhança com mensagens indicando que um evento foi detectado. O processo de comunicação é usado para que cada nodo estime N_j de acordo com o número máximo de mensagens simultaneamente recebidas por este até o instante t δ e α são coeficientes constantes.

$$s_j(t) = s_0 + \delta - \frac{\alpha N_j^{act}(t)}{N_j(t)} \quad (2)$$

O estímulo de um nodo para realizar uma dada tarefa depende de um limiar estabelecido que pode aumentar ou diminuir conforme a variação de dois coeficientes, mas o limite inicial θ_i é igual para todos os nodos.

O limite de resposta θ_i de um nodo i decresce de acordo com ξ como mostrado na Equação 3 e aumenta conforme ρ como pode ser visto na Equação 4 e isto ocorre a cada instante que o nodo decide processar um evento.

$$\theta_i = \theta_i - \xi \quad (3)$$

$$\theta_i = \theta_i + \rho \quad (4)$$

Em resumo, o método utilizado e explicado acima, funciona modificando a probabilidade de um nodo para processar um evento de acordo com: O número de nodos que detectam o evento ao mesmo tempo; O número de vezes que este nodo foi anteriormente envolvido em processamento de eventos.

Em (FERREIRA; BRISOLARA; INDRUSIAK, 2015) ambas abordagens *Ant* e *PS* são avaliadas e comparadas usando o Eboracum (EBORACUM, 2014). Nestes experimentos, o número de eventos sensoriados pela rede por dia, são avaliados para cada uma das abordagens e comparados a uma rede sem nenhuma estratégia de balanceamento de carga. Apenas eventos que conseguem chegar até a estação base (*sink*) são considerados na avaliação. Além do número de eventos, os experimentos também discutem o tempo de vida da rede, variando suas densidades e estratégias de balanceamento de carga. Porém, os experimentos realizados consideraram apenas redes compostas de nodos estáticos implantados em grade.

Neste trabalho, novos experimentos avaliam estas estratégias de balanceamento de carga considerando redes compostas com nodos móveis, variando a densidade das redes bem como a forma de implantação dos nodos. O cenário de teste será o mesmo que o empregado em (FERREIRA; BRISOLARA; INDRUSIAK, 2015), permitindo comparação dos resultados e observação do impacto da mobilidade dos nodos na eficiência das estratégias de balanceamento de carga.

3 EBORACUM: SIMULAÇÃO DE RSSF REATIVAS

Neste capítulo é feita uma revisão do Eboracum que é um *framework* extensível para modelagem e simulação de RSSFs reativas (orientada a eventos) e adaptáveis empregando modelos de alto nível de abstração (MARQUES et al., 2016). Na Seção 3.1 será apresentada a visão geral do Eboracum, enquanto a arquitetura do framework será detalhada na Seção 3.2. A simulação e detalhes da avaliação suportada serão apresentados na Seção 3.3.

3.1 Eboracum: Visão Geral

O Eboracum (EBORACUM, 2014) é uma infraestrutura para suportar a modelagem e avaliação de RSSFs, bem como a investigação de estratégias dinâmicas para gerenciamento dos recursos da rede. Esta infraestrutura pode ser vista como um *framework*, o qual estende o VisualSense (ROSELLO et al., 2009) e o Ptolemy II (PTOLEMAEUS, 2014), provendo primitivas de alto nível para modelar tanto aspectos da plataforma, como da aplicação. Desta forma, o Eboracum pode ser facilmente estendido para suportar diferentes tipos de nodos e de eventos, bem como também a avaliação de diversas estratégias dinâmicas de adaptabilidade em redes de sensores sem fio.

O foco do Eboracum é na modelagem e simulação de RSSF reativas, podendo ser empregado para o projeto de uma solução dedicada para uma dada aplicação. Seguindo o fluxo de projeto, ilustrado na Figura 4, a partir de um conjunto de requisitos, o projetista deve projetar uma solução dedicada para atender os requisitos da aplicação. Encontrar uma solução eficiente, considerando as várias configurações possíveis exige ferramentas que permitam construir soluções e avaliá-las, empregando abstrações. Visando avaliar uma dada solução, modelos de alto nível da plataforma e da aplicação são empregados no Eboracum. A simulação destes modelos permite a análise do comportamento da solução projetada, quando executando uma dada aplicação orientada a eventos. Esta avaliação da eficiência de uma solução gera métricas que são relevantes para domínios de aplicação e respectivos usuários finais.

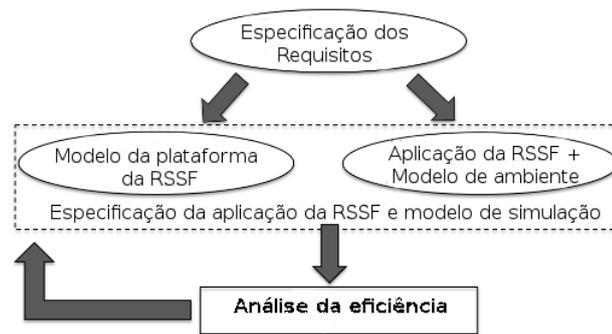


Figura 4: Fluxo de Projeto de uma RSSF dedicada para uma aplicação específica (MARQUES et al., 2016)

3.2 Eboracum: Infraestrutura e Arquitetura

Como ilustrado na Figura 5, a infraestrutura do Eboracum é composta de várias camadas, tendo como base o *framework* Ptolemy II. Desta forma, a infraestrutura de simulação de eventos discretos provida pelo Ptolemy II pode ser reusada. Também foram reusadas algumas primitivas providas pelo VisualSense, principalmente para a representação de canais de comunicação sem fio, que fazem parte da abstração dos nodos da rede.

O *framework* foi definido em Java, empregando hierarquia de classes, e sua arquitetura pode ser dividida em duas camadas: a camada da plataforma e a camada da aplicação. Na camada da plataforma, encontram-se as primitivas que modelam basicamente os nodos e conexões e na camada de aplicação, encontram-se as primitivas que modelam os eventos e suas características. Ambas as camadas serão detalhadas nas seções 3.2.1 e 3.2.2. Visando aproveitar a infraestrutura de simulação de eventos discretos provida pelo Ptolemy II, as primitivas providas pelo Eboracum (em ambas as camadas) são extensões dos atores do Ptolemy II.

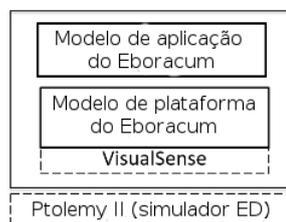


Figura 5: Infraestrutura do Eboracum: Camadas para modelagem de redes reativas (MARQUES et al., 2016)

3.2.1 Modelo da Plataforma

A hierarquia de classe contendo as classes responsáveis por modelar elementos e aspectos da plataforma de uma RSSF está ilustrada no diagrama de classes da

Figura 6. Estas classes definem primitivas de modelagem providas pelo Eboracum para modelar basicamente os diferentes tipos de nodos (nodos sensores e *sink*) e estabelecer as conexões entre eles.

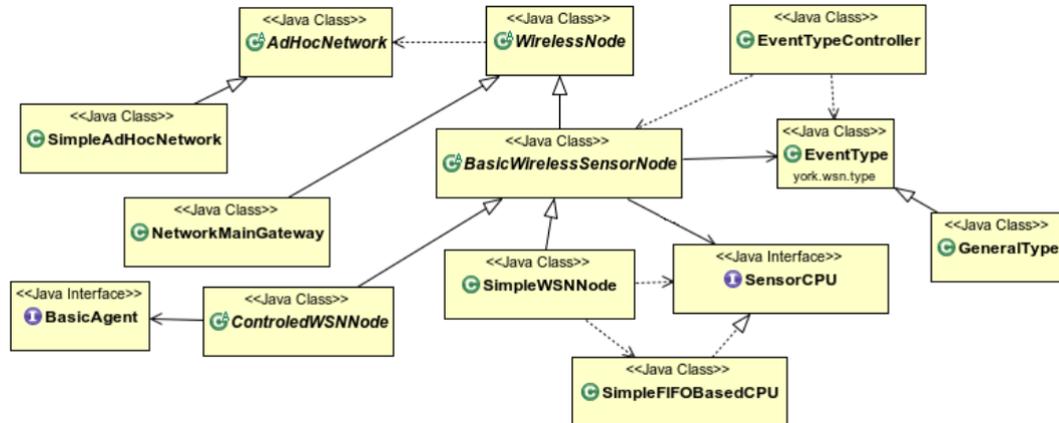


Figura 6: Primitivas de modelagem da plataforma: Hierarquia de classes da plataforma (FERREIRA; BRISOLARA; INDRUSIAK, 2015)

A principal abstração desta hierarquia de classes é o Nodo Sem Fio, o qual é representado pela classe abstrata chamada *WirelessNode*. Como os nodos podem ser nodos sensores ou *sinks*, *WirelessNode* tem duas subclasses, *BasicWirelessSensorNode* e *NetworkMainGateway*, para representar nodos sensores e *sinks*, respectivamente. Um nodo sensor em uma RSSF reativa deve detectar eventos e processar tarefas associadas a estes eventos. A classe abstrata *BasicWirelessSensorNode* representa um nodo sensor, que tem uma CPU (do inglês, *Central Process Unit*) para tarefas de processamento associadas aos eventos detectados. A CPU está representada pela interface *SensorCPU*, que especifica métodos que representam o comportamento geral de uma CPU. Esta interface possui uma implementação chamada *SimpleFIFOBasedCPU*, que define o comportamento de uma CPU baseada em uma FIFO. A classe concreta *SimpleWSNNode* é uma especialização da *BasicWirelessSensorNode* e representa o comportamento de um nodo sensor reativo associado a uma CPU com escalonador FIFO (do inglês, *First In First Out*). Esta CPU é uma abstração de um modelo de execução de tarefas e serve para avaliar o tempo em que o nodo esteve envolvido com um dado processamento.

As primitivas propostas no Eboracum também reusam primitivas do VisualSense para modelar os canais para comunicação sem fios e também para modelagem abstrata da área de detecção de cada nodo sensor, ou seja, seu raio de sensoriamento dos nodos sensores. Um nodo qualquer da rede, modelado por *WirelessNode* ou suas extensões, tem sempre um raio de comunicação, que divide o alcance de seu receptor e transmissor. Já um nodo sensor, modelado pelo *BasicWirelessSensorNode* tem uma área de sensoriamento limitada, modelada por um raio de sensoriamento. Desta

forma, somente eventos que ocorram dentro deste raio poderão ser detectados pelo nodo.

Para que seja possível suportar a avaliação de uma RSSF, um modelo da rede deve ser construído empregando as primitivas de modelagem suportadas pelo Eboracum. Esse modelo é composto basicamente de nodos conectados por um canal de comunicação sem fio com alcance limitado e seguindo algum tipo de topologia de rede. Obedecendo uma arquitetura do tipo *sink-to-gateway*, o *sink* representa a estação base, a qual os nodos da RSSF devem enviar os dados processados e para tal, *sink* deve estar conectado no mesmo canal de comunicação dos demais nodos.

Na implantação da rede, os nodos podem ser distribuídos na área de interesse de forma randômica ou na forma de uma grade (*mesh*). Respeitando o alcance do canal de comunicação de cada nodo, conexões devem ser realizadas entre estes, e considerando uma forma que todos os nodos alcancem o *sink* através de conexões *multi-hop*.

A classe *SimpleAdHocNetwork* implementa a montagem das conexões entre os nodos empregada atualmente no Eboracum. A informação da conexão do nodo com seu nodo vizinho que serve de conexão com o *sink* é armazenada localmente por cada nodo em uma tabela de roteamento. Desta forma, cada nodo tem um *gateway* que determina a forma de alcançar o *sink*. Por exemplo, quando o nodo A captura um evento, este envia uma mensagem para o nodo B (seu *gateway*) e este, por sua vez, encaminhará para o seu *gateway* e assim sucessivamente até alcançar o *sink*. Cada evento detectado dispara uma ou várias transmissões de mensagens, dependendo da posição do sensor e da sua distância até o *sink*. Se um nodo ficar inativo ou desligado (por exemplo, por falta de bateria), as conexões podem ser refeitas dinamicamente encontrando assim, uma outra forma de conectar os nodos que evite o nodo desligado.

Os nodos sensores têm um recurso energético limitado (bateria não recarregável) e parâmetros que são usados para modelar o estado inicial da bateria do nodo, bem como os custos associados a seus diferentes modos de operação. Quando um evento é capturado por um nodo *SimpleWSNNode*, este é processado localmente e uma mensagem é enviada ao *gateway* daquele nodo. Tanto o processamento quando o envio da mensagem causam descargas na bateria do nodo. Estes aspectos relacionados a dinâmica de simulação do Eboracum serão melhor detalhados na Seção 3.3.

3.2.2 Modelo de Aplicação

O modelo de aplicação é baseado nos eventos que geram a computação e a comunicação da RSSF. Um evento ocorre dentro do ambiente num determinado espaço e tempo e está relacionado a um fenômeno natural como temperatura, umidade, som, luminosidade, etc. Então, para representar esses eventos, três aspectos são relevantes: espaço, tempo e funcionalidade. Onde o espaço está relacionado

ao local de ocorrência do evento, tempo está relacionado ao tempo de ocorrência do evento enquanto que a funcionalidade está relacionada ao tipo de sensor utilizado para capturar o fenômeno que gerou o evento. Por exemplo, um evento é definido como estático se não há variação de espaço, e atômico quando ele ocorre em determinado momento (sem variação de tempo) e não se repete. Um evento é periódico quando se repete em determinados períodos de tempo.

Baseado nestes aspectos, o Eboracum provê uma série de primitivas que podem ser empregadas para modelar aplicações reativas, incluindo primitivas que permitem modelar estes aspectos através de modelos estocásticos (BRISOLARA; FERREIRA; SOARES INDRUSIAK, 2015), baseados em distribuições de probabilidade. Dentre estas primitivas, destaca-se *StochasticPeriodicJumperEvent* e que foi empregado nos experimentos realizados para avaliação da proposta de mobilidade de nodos. Esta primitiva permite representar um número grande de eventos estáticos, que mudam de posição e cuja distribuição espacial é determinada por modelos estocásticos. O emprego desta primitiva acelera a simulação, pois evita que cada evento seja uma instância diferente.

3.3 Eboracum: Simulação e Avaliação

Esta infraestrutura permite analisar o comportamento de uma RSSF quando a mesma está executando uma dada aplicação reativa. Para tal, um modelo de simulação no Eboracum combina a carga de trabalho da aplicação alvo, a qual é composta por eventos gerados pelo ambiente, à infraestrutura de computação e comunicação, permitindo assim avaliar a eficiência de uma solução, no que diz respeito a métricas que são importantes para domínios de aplicação específicos e respectivos usuários finais. Atualmente, a avaliação suportada pelo Eboracum foca na eficiência energética, permitindo avaliar a descarga de bateria dos nodos da rede ao executar uma dada aplicação. Considerando a bateria dos nodos e também a manutenção das conexões da rede com a estação base, é possível também avaliar o tempo de vida da rede e o número de eventos sensoriados pela rede.

Para simular o processamento dos eventos capturados, os nodos são providos de uma CPU. Um evento pode ser associado a um gráfico de tarefas e cada tarefa pode ter diferentes custos computacionais. Esses custos vão determinar quanto tempo a CPU ficará ocupada e quanta energia é gasta com o processamento de cada tarefa e conseqüentemente o tratamento para aquele dado evento. Após o processamento, o nodo deve enviar uma mensagem para seu *gateway*, que por sua vez retransmite esta mensagem para o seu gateway, até que a mensagem atinja o *sink*. Durante a simulação, a descarga das baterias dos nodos é calculada, considerando o estado de sua bateria e as atividades realizadas por estes.

Para simular a bateria do nodo descarregando durante a simulação, os nodos têm a carga de suas baterias recalculadas de acordo com suas atividades. Esse processo de descarga baseia-se em custos definidos para cada modo de operação do nodo. Um nodo pode estar inativo, processando ou comunicando. Quando está inativo, quer dizer que o nodo não está nem comunicando e nem processando, assumindo que os componentes responsáveis pelo sensoriamento (detecção de eventos) estão sempre trabalhando. O custo de recepção do rádio também está incluído no modo inativo do nodo. O custo de comunicação está relacionado somente com a operação de envio de mensagens, então somente o nodo que transmite a mensagem descarrega sua bateria, mas a mensagem que faz vários *hops* tem custo para cada nodo que a encaminha. Quando no modo de processando, o número de ciclos de CPU executados é multiplicado pelo custo energético deste modo de operação para determinar a descarga.

Para a parte visual das simulações, o Eboracum utiliza a interface gráfica ou GUI (do inglês, *Graphical User Interface*) do Ptolemy II, que é chamada Vergil e a qual permite que os projetistas possam construir modelos, instanciando componentes de suas bibliotecas, incluindo as primitivas suportadas pelo Eboracum. No entanto, construir modelos de RSSF com muitos componentes manualmente utilizando essa GUI pode ser uma tarefa muito custosa, no que diz respeito ao tempo de construção.

A construção do modelo de simulação também pode ser realizada através de codificação em Java, onde é possível escolher as primitivas a serem instanciadas, bem como sua quantidade, posicionamento, dentre outras configurações. Seguindo esta ideia, o Eboracum também oferece o *BenchmarkGenerator*, classe que pode ser utilizada para gerar modelos de simulação, evitando a instanciação de componentes e seu posicionamento manuais. Neste caso, o usuário define o tipo de nodo que será utilizado, a quantidade de nodos e o tipo de distribuição dos mesmos na área de interesse (*random* ou *mesh*) e o posicionamento do *sink*. O usuário deve definir também os eventos que acontecem no ambiente e que geram a carga de trabalho para a rede, tipo e número de eventos, bem como sua distribuição espacial e temporal. O modelo gerado pelo *BenchmarkGenerator* pode ser então carregado pelo Vergil. Este modelo é representado em XML (do inglês, *Extensible Markup Language*), que é o formato empregado pelo Ptolemy II.

Ao término da simulação, um arquivo no formato CSV (do inglês, *Comma Separated Values*) é gerado, contendo os resultados coletados. Na Tabela 1 é possível visualizar um resumo dos dados providos neste arquivo.

Tabela 1: Dados que compõem o relatório de simulações (FERREIRA; BRISOLARA; INDRUSIAK, 2015)

Nome	Descrição
#Eventos sensorizados	Número de eventos sensorizados, processados e quais foram enviados ao <i>sink</i>
Tempo total de simulação	O tempo de simulação deve ser convertido em semanas ou meses
#Eventos restantes	Número de eventos restantes dentro das CPUs FIFOs de cada nodo sensor
Bateria restante	Bateria de cada nodo sensor
Tempo de morte	Quando cada nodo morre
#Mensagens enviadas	Número de mensagens enviadas por cada nodo
#Mensagens perdidas	O número de mensagens perdidas é definido como uma mensagem disparada por um evento e que é processada, mas a qual não chega ao <i>sink</i>

4 MOBILIDADE EM RSSF: ESTRATÉGIA PROPOSTA

Este capítulo apresenta uma estratégia dinâmica para adaptabilidade em RSSF reativas, onde a mobilidade de nodos é empregada para maximizar a cobertura da rede. Em redes implantadas aleatoriamente, a estratégia é empregada para mover os nodos visando espalhá-los sobre a área de interesse, evitando sobreposições e maximizando a cobertura desta área. Em redes implantadas em *mesh* ou *grade (grid)*, a estratégia pode ser empregada para mover nodos à medida em que alguns nodos ficam inativos devido à falta de bateria. Neste caso, a mobilidade visa reposicionar os nodos visando reduzir as lacunas de cobertura causadas pela descarga da bateria de alguns nodos da rede.

A mobilidade proposta baseia-se no equilíbrio de forças empregado em HOWARD; MATARIĆ; SUKHATME (2002a). Baseado nesta ideia de forças da robótica móvel, em nossa estratégia, nodos exercem forças de repulsão que fazem com que nodos se movam, visando afastá-los uns dos outros de forma a minimizar a redundância entre os nodos e maximizar cobertura da rede. Os movimentos ocorrem até que um equilíbrio estático seja alcançado e a computação requerida para cálculo da nova posição é simples, o que permite sua implementação e emprego em ambientes de simulação de RSSF como o EBORACUM. A fundamentação teórica da estratégia proposta é apresentada na Seção 4.1 e aspectos da implementação da estratégia no framework EBORACUM são discutidos na Seção 4.2.

4.1 Campos Potenciais

Campos potenciais são comumente um método bem usado na robótica móvel onde eles são tipicamente aplicados em tarefas como navegação local e desvio de obstáculos (HOWARD; MATARIĆ; SUKHATME, 2002a). Os campos são construídos de maneira que cada nodo é repellido por outros nodos, forçando assim nodos ou robôs a se espalharem através do ambiente.

A estratégia proposta foi definida de forma a considerar aspectos das redes de sensores sem fio, como raios de comunicação entre nodos e raios de sensoriamento, de

forma que a reorganização dos nodos tenda a reduzir a redundância porém mantendo a capacidade de comunicação entres nodos vizinhos. O movimento é formalizado por equações para cálculo das forças de repulsão exercidas sobre um nodo pelos seus nodos vizinhos. A partir destas forças, é realizado o cálculo da força resultante, a qual é empregada para determinar a nova posição para o nodo a ser movido.

Na formalização do problema, considere J , o conjunto de todos os nodos da rede e J_i , o conjunto de nodos dentro do alcance do raio de comunicação ρ de um nodo i (daqui em diante chamados de nodos vizinhos), onde $i \notin J_i$. Para facilitar o entendimento e com o objetivo de manter os nodos dentro da área de interesse, foi considerada uma área de interesse quadrada (com 4 bordas) e 4 nodos vizinhos referenciais que modelam estas bordas. O nodo referencial estará incluso em J_i quando a borda que o mesmo representa encontrar-se dentro do raio de comunicação do nodo i . Cada nodo i está sujeito a uma força vetorial repulsiva de duas dimensões (2D) F_i^j para cada nodo $j \in J_i$.

O ponto formado pelas coordenadas cartesianas do nodo é o seu centro e indica sua posição no plano e em relação aos outros nodos. As forças atuantes formam um ângulo e podem ser decompostas em componentes, então a força F_i^j tem como componentes Fx_i^j e Fy_i^j , como mostram as equações 5 e 6 respectivamente. Nestas equações, β é uma constante, α é o ângulo formado por Fy_i^j e o eixo das abcissas e $d(i, j)$ é a distância entre os nodos i e j .

$$Fx_i^j = \rho \cdot \exp\left(-\frac{d(i, j)}{\beta}\right) \cdot \cos(\alpha) \quad (5)$$

$$Fy_i^j = \rho \cdot \exp\left(-\frac{d(i, j)}{\beta}\right) \cdot \sin(\alpha) \quad (6)$$

Nossa estratégia tem como fundamento que quanto maior a distância entre dois nodos, menor deve ser a força de repulsão entre eles, para evitar lacunas na cobertura da área de interesse. Ao diminuir a distância, a força de repulsão deve aumentar para garantir a distribuição dos nodos na área de interesse. A Figura 7 mostra a variação desejada na intensidade da força de acordo com a distância entre os nodos, adotando $\rho = 160$ (igual ao raio de comunicação dos nodos) e $\beta = 30$. O valor de β foi determinado empiricamente após vários cálculos experimentais realizados com o objetivo de avaliar a cobertura da rede após o equilíbrio entre as forças (quando as forças resultantes são 0). Estes parâmetros foram então aplicados no cálculo das forças implementado e ele é realizado individualmente para cada nodo dentro do raio de comunicação do nodo i (nodo que vai ser movido) e somente após isso o nodo i é movido.

Para determinar a nova posição de um nodo i , a força resultante R_i deve ser calculada. A força resultante é decomposta em duas componentes Rx_i e Ry_i (equações 7

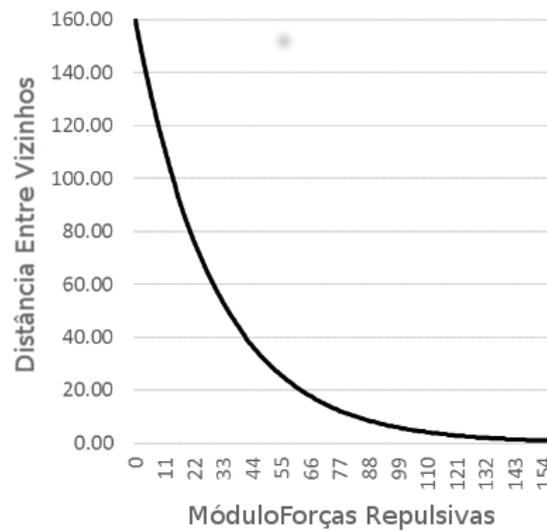


Figura 7: Forças repulsivas conforme distância dos vizinhos

e 8) e seus valores são adicionados às coordenadas (x, y) de i , gerando a nova posição para o referido nodo.

$$Rx_i = \sum_{j \in J_i} Fx_i^j \quad (7)$$

$$Ry_i = \sum_{j \in J_i} Fy_i^j \quad (8)$$

Considerando o cenário hipotético ilustrado na Figura 8, o nodo i localizado no canto superior direito da área de interesse, tem três vizinhos que exercem forças de repulsão sobre o mesmo. Dois deles são os nodos referenciais j_2 e j_3 representando as bordas superior e lateral direita e j_1 é um nodo sensor qualquer. Então, i está sujeito a três forças repulsivas $F_i^{j_1}$, $F_i^{j_2}$ e $F_i^{j_3}$ onde a força resultante R_i é computada como explicado anteriormente. Aplicando a estratégia proposta, uma nova posição é calculada para este nodo, fazendo com que este se mova para a nova posição, representada por i' .

De forma iterativa, para cada nodo, novas posições são calculadas com base no campo potencial de todas as forças repulsivas atuantes sobre este. Até que haja um equilíbrio entre as forças, nodos serão movidos para uma nova posição a cada iteração. Depois de algumas iterações toda a área de interesse estará coberta por sensores e a rede toda atingirá o equilíbrio estático. Desta forma, se os nodos forem implantados aleatoriamente ou concentrados em um mesmo lugar, através da aplicação da estratégia, estes se espalharão para cobrir a área de interesse. O equilíbrio das forças pode ser quebrado quando um nodo morre por falta de bateria e neste caso, a estratégia de mobilidade é aplicada até que o equilíbrio seja alcançado novamente.

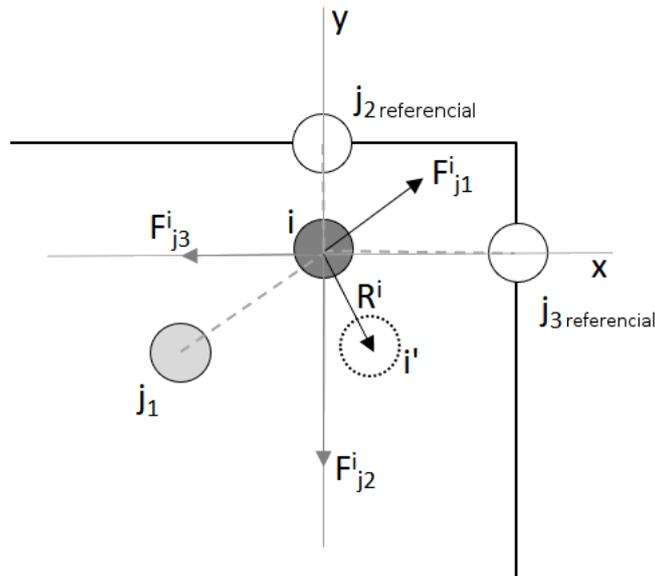


Figura 8: Ilustração das forças atuantes sobre um nodo

Quando os nodos forem implantados em grade, a rede parte equilibrada e os nodos não se moverão até que algum nodo seja desativado e o equilíbrio das forças seja então quebrado.

4.2 Mobilidade dos nodos no Eboracum

Para suportar a modelagem e simulação de redes com nodos móveis, novas classes foram inseridas na estrutura de classes do *framework* Eboracum. A Figura 9 ilustra a hierarquia de classes, incluindo as classes novas definidas. Primeiramente, uma nova classe chamada *BasicMobileWSNNode* foi definida para representar nodos móveis em geral, estendendo a classe *BasicWirelessSensorNode*, que implementa um nodo sensor básico (estático). Posteriormente, a classe *BasicMobileWSNNode* foi especializada por duas classes: a *RandomMobileWSNNode* e a *DynamicReorganizedMobileWSNNode*. A classe *RandomMobileWSNNode* foi criada para permitir mover nodos de forma aleatória, enquanto a classe *DynamicReorganizedMobileWSNNode* representa nodos que se movem de acordo com o método proposto aqui. Todas as instâncias da classe *DynamicReorganizedMobileWSNNode* estarão associadas a uma instância da classe *MovementRemoteController*, a qual é responsável por enviar os comandos de movimento aos nodos, informando a nova posição de cada nodo após computar todas as forças atuantes sobre ele.

Basicamente, o *MovementRemoteController* trabalha com uma lista de nodos *DynamicReorganizedMobileWSNNode*. Para cada nodo desta lista, este calcula as forças repulsivas que atuam sobre o nodo individualmente em um dado instante de tempo e após move o nodo para a nova posição. Este processo é realizado a cada se-

gundo até que o sistema alcance o equilíbrio estático. Após o equilíbrio, os nodos *DynamicReorganizedMobileWSNNode* permanecem em suas posições. No entanto, estes podem vir a ser movidos novamente, quando alguns nodos estiverem com suas baterias descarregadas, sendo novamente necessário mover nodos para cobrir áreas descobertas. Nestes casos, o processo é reativado no *MovementRemoteController*.

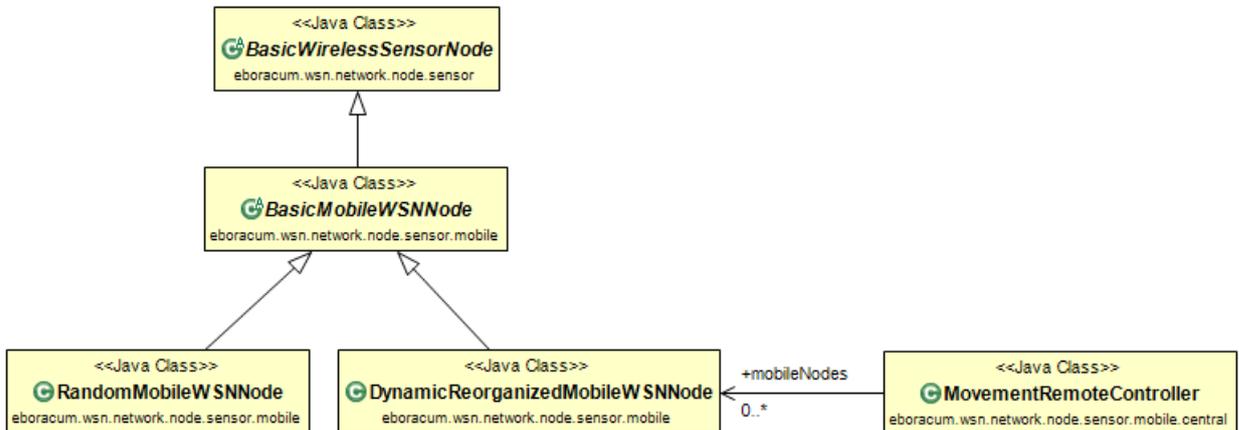


Figura 9: Primitivas para suportar *DynamicReorganizedMobileNodes* no Eboracum

Para ilustrar a aplicação do método, foi construído um modelo de simulação no Eboracum, composto de uma rede com 64 nodos *DynamicReorganizedMobileWSN-Node* implantados aleatoriamente em uma área de interesse quadrada de 810 km², conectados a um *sink*. A Figura 10 ilustra a disposição inicial dos nodos, resultante da implantação. Os pontos verdes representam os nodos sensores, o ponto preto representa o *sink* e os círculos em torno destes, de dentro para fora, representam o raio de sensoriamento e de comunicação, respectivamente, enquanto as linhas pretas representam conexões entre os nodos e destes com o *sink*. Iniciada a simulação, os nodos se movem de acordo com o método proposto. Após algumas iterações, o sistema alcança o equilíbrio estático e os nodos param de se mover. A disposição dos nodos após o equilíbrio pode ser observada na Figura 10. Neste cenário de aplicação do método, observa-se que no momento inicial (Figura 10), há lacunas na cobertura da área de interesse e vários nodos ainda não estabeleceram conexões com vizinhos, pois os nodos encontram-se muito distante uns dos outros. Estes problemas são minimizados com a aplicação do método, como pode ser observado na Figura 10. Quando a rede atinge o equilíbrio, sua cobertura foi melhorada e todos os nodos estão conectados, portanto, a rede encontra-se em uma configuração funcional.

4.3 Balanceamento de Carga com Nodos Móveis

Para suportar o balanceamento de carga foi feita a especialização da primitiva *SimpleWSNNode*, criando uma classe abstrata chamada *ControlledWSNNode* como

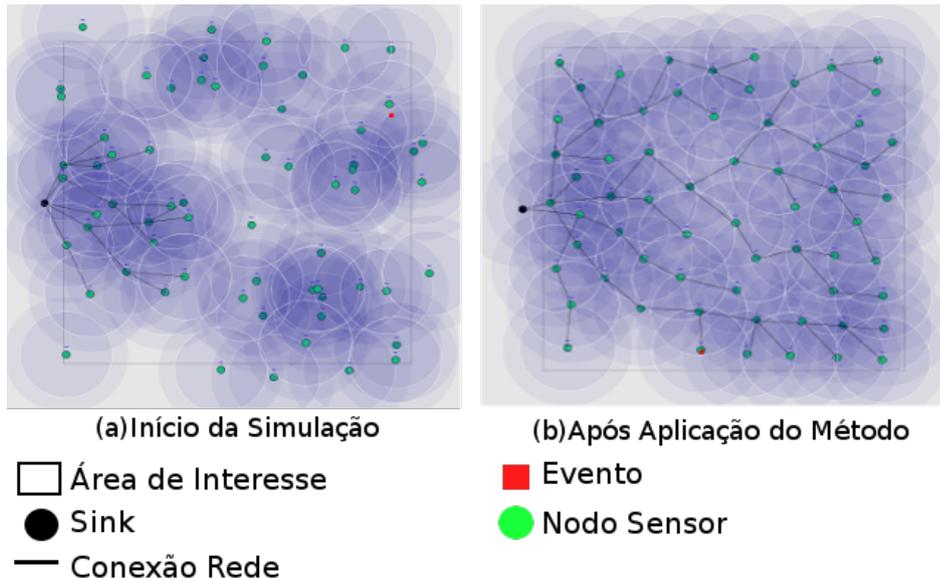


Figura 10: Exemplo do método proposto com 64 nodos implantados aleatoriamente

pode ser visto na Figura 11. Esta classe representa um tipo de nodo associado ao agente que é responsável pelo controle. O agente está representado no *framework* por uma *interface* chamada *BasicAgent*, que deve ser implementada pelas classes que representama um tipo específico de agente. Quando um nodo sensoria um evento ele delega a decisão de processamento do evento ao agente. O agente deve aplicar alguma técnica de balanceamento de carga para tomar esta decisão.

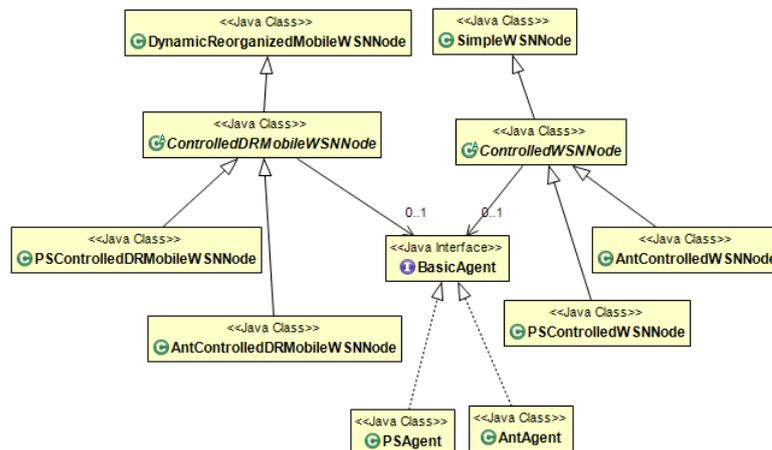


Figura 11: Primitivas propostas para modelagem dinâmica de nodos controladores

Além do agente controlador abordagens mais sofisticadas como as técnicas PS e *Ant-based* exigem mudanças significativas no comportamento dos nodos. Então, para avaliar diferentes técnicas de balanceamento de carga duas subclasses de nodos controladores foram preliminarmente definidas, são elas *PSControlledWSNNode* e *AntControlledWSNNode* e seus respectivos agentes *PSAgent* e *AntAgent*. A Figura 11 ilustra a nova hierarquia de classes e a interface inserida no Eboracum. No

trabalho (FERREIRA; BRISOLARA; INDRUSIAK, 2015), resultados experimentais obtidos usando esta implementação foram discutidos e esses resultados foram comparados com tais técnicas em relação à vida útil da rede.

Para combinar nodos móveis com o conceito de nodos controlados a primitiva *DynamicReorganizedMobileWSNNode* foi especializada criando a *ControlledDRMobileWSNNode*. Esta nova primitiva representa nodos móveis dinamicamente reorganizados de acordo com a estratégia de mobilidade implementada e com o comportamento de controle dos agentes. Foi feita a extensão desta primitiva para combinar a mobilidade proposta com as duas técnicas de balanceamento de carga criando as subclasses *PSCcontrolledDRMobileWSNNode* e a *AntControlledDRMobileWSNNode*. Devido a limitações do Java no suporte de herança não foi possível reduzir essa hierarquia de classe.

5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados alcançados com a utilização de diferentes estratégias dinâmicas para gerenciamento de RSSF reativas. Primeiramente, a mobilidade de nodos é avaliada em redes sem balanceamento de carga, variando densidade e estratégia de implantação. Estes primeiros resultados foram publicados em (GONZÁLEZ; FERREIRA; BRISOLARA, 2016). Posteriormente, a mobilidade é combinada com duas estratégias diferentes para balanceamento de carga, *PS* e *Ant-based* e o impacto desta combinação na eficiência da rede é avaliado.

5.1 Metodologia

Nos experimentos realizados foi considerado um cenário quadrado com uma área de 810km^2 (900 x 900m) e um *sink* localizado ao lado esquerdo deste cenário. Os nodos são conectados a um de seus vizinhos (quem estiver mais próximo do *sink*) ou diretamente ao *sink*. Os nodos têm raio de sensoriamento e de comunicação de 120m e 160m, respectivamente. Foram adotadas configurações de rede com 49 (grade de 7x7), 64 (grade de 8x8), 81 (grade de 9x9) e 100 (grade de 10x10) nodos sensores cobrindo a mesma área de interesse, com o objetivo de comparar a eficiência das estratégias de gerência em redes com diferentes densidades.

Os experimentos realizados focam no tempo de vida da rede, que depende do consumo de energia de seus nodos. Como discutido no Capítulo 3, este consumo é calculado considerando os custos de energia do nodo, dependendo em que modo de operação o mesmo encontra-se. No modo inativo, o nodo mantém sua capacidade de sensoriamento e recepção de mensagens e assim o custo de comunicação está considerando apenas o custo de envio da mensagem pelo nodo transmissor. Se a mensagem passa por vários *hops*, o custo do envio é considerado na descarga de todos os nodos transmissores. No modo processando, o custo total considera os ciclos de CPU envolvidos na computação de tarefas e o custo de operação deste modo. Na Tabela 2 constam os custos de energia adotados na simulações e a capacidade da ba-

Tabela 2: Custos Energéticos

Parâmetro	Valor
Capacidade da bateria	5400000 mAs
Taxa descarga inativo	0,3 mAs
Taxa descarga computação tarefas	3,57 mAs
Taxa descarga por mensagem (3 bytes) com 30 kbps	0,0018 mAs

teria, os quais foram definidos de acordo com o *datasheet* do módulo IRIS Mote (INC., 2016). Em nossos experimentos, foi considerado que quando um nodo alcançar 50 por cento de sua bateria, este pára de funcionar. Os custos associados aos movimentos dos nodos móveis foram considerados fora do escopo deste trabalho e sendo assim, foram ignorados em todos os experimentos.

Para simular a ocorrência de eventos na rede, a primitiva *StochasticPeriodicJumperEvent*, provida pelo Eboracum foi empregada. Os eventos são distribuídos aleatoriamente na área de interesse seguindo uma distribuição uniforme. Não há eventos acontecendo simultaneamente no cenário e o tempo entre eventos sucessivos é definido por uma distribuição de *Poisson* com intervalos de 120 segundos. Cada evento sensoriado gera uma carga de processamento equivalente a 14 tarefas e as mensagens enviadas têm 3 Bytes.

Nos experimentos realizados foram avaliadas estratégias dinâmicas de gerenciamento usando diferentes configurações para a RSSF. Além de variar a densidade da rede de 49 até 100 nodos, também foi feita a variação da estratégia de implantação utilizando implantação em grade e também aleatória. Quando é adotada a implantação em grade, os nodos são distribuídos na área de interesse em forma de grade, ou seja, ficando equidistantes uns dos outros. Na implantação aleatória, os nodos sensores são implantados obedecendo uma distribuição uniforme de probabilidade. Para todos os experimentos, a mesma configuração foi executada 30 vezes e os resultados médios por dia são utilizados na comparação. Testes estatísticos do tipo *t de student* foram realizados com 0,95 de confiança para respaldar as comparações dos resultados.

5.2 Eficiência dos Nodos Móveis em Redes com Implantação em Grade

Nesta seção, é feita uma avaliação do desempenho de redes compostas de nodos móveis implantados em grade (*grid*). Como a implantação em grade já garante uma cobertura e mantém os nodos em equilíbrio, o objetivo deste conjunto de experimentos é mostrar o impacto da reorganização dos nodos móveis para melhorar a cobertura quando nodos começam a ficar sem bateria. A Figura 12 mostra a média

de eventos sensoriados por dia considerando as diferentes configurações de densidades, com nodos estáticos e nodos móveis. Em todas as densidades, até o dia 76 a área de interesse encontra-se totalmente coberta e o número de eventos sensoriados é igual para todas as configurações. Isso ocorre, pois a rede foi implantada em grade e a mesma encontra-se em equilíbrio estático e portanto, a reorganização ainda não foi aplicada. Logo após, os nodos começam a morrer e o número de eventos sensoriados começa a diminuir iniciando assim a serem percebidas as diferenças entre as distintas configurações. O melhor desempenho dos nodos móveis foi observado na configuração de rede mais densa (100 nodos), onde nodos móveis sensoriaram em torno de 45% mais eventos por dia, quando comparados a nodos estáticos, durante 7 dias de um total de 84 dias de operação.

Ainda analisando o desempenho de nodos móveis em relação aos nodos estáticos em redes em grade com diferentes densidades (Figura 12), observa-se que a mobilidade apresenta maior impacto quando aplicada em redes mais densas. Esta relação entre o ganho dos nodos móveis e a densidade pode ser melhor observada no gráfico da Figura 13, onde é feita a comparação do comportamento entre a configuração de rede de menor densidade (49 nodos) e a de maior densidade (100 nodos).

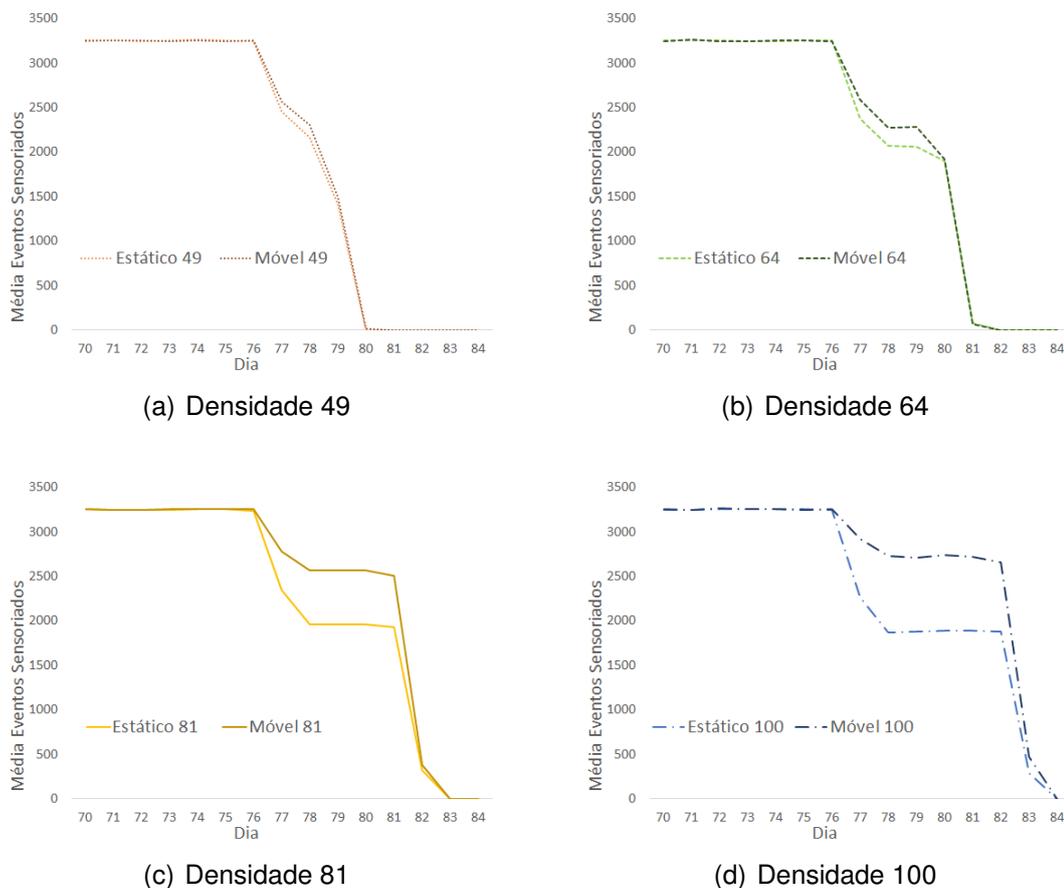


Figura 12: Comparação dos eventos detectados diariamente com nodos estáticos versus nodos móveis distribuídos em *grid* para as diferentes densidades

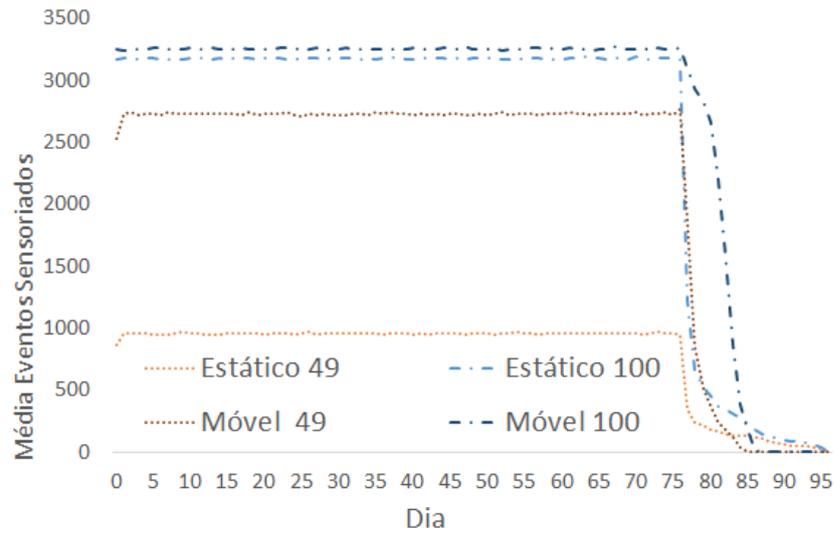


Figura 13: Comparação de eventos detectados diariamente com nodos estáticos versus nodos móveis distribuídos em *grid* com a menor densidade (49) e com a maior densidade (100)

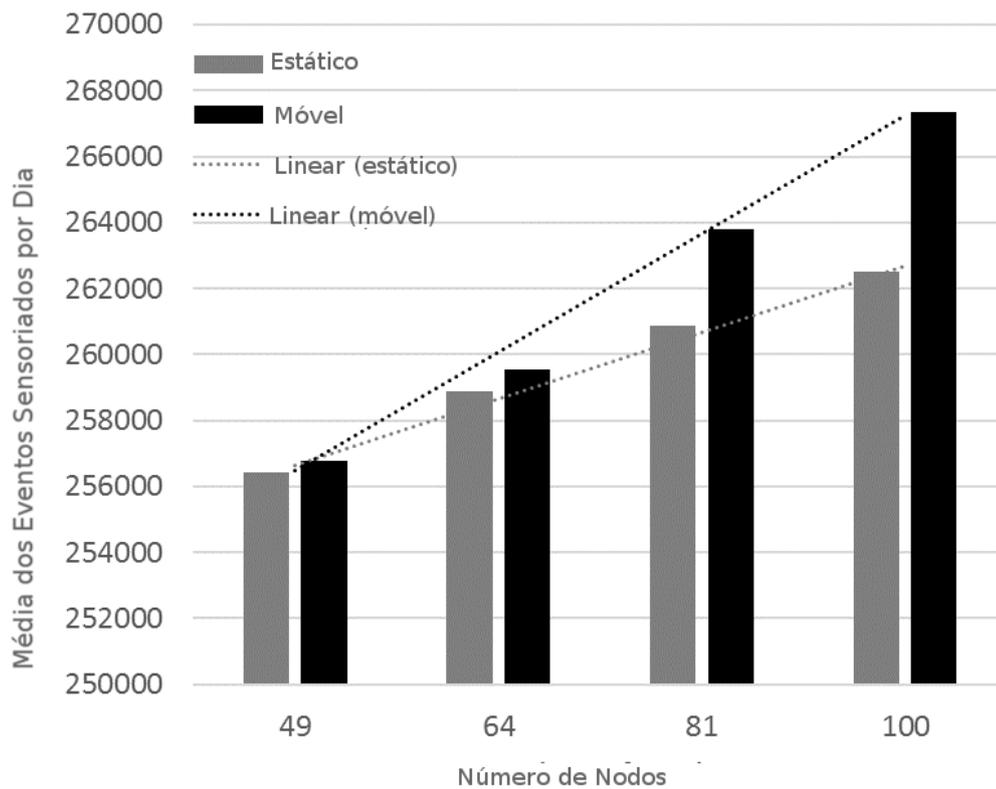


Figura 14: Total de eventos sensoriados por nodos estáticos versus nodos móveis distribuídos em *grid*

A Figura 14 mostra a soma da média de eventos sensoriados diariamente por nodos móveis e estáticos para as diferentes densidades, representando o desempenho global para estes nodos quando implantados em *grid*. Estes resultados apontam que

quando a densidade da rede aumenta, o número total de eventos detectados pelos nodos móveis também aumenta quando comparados aos nodos estáticos em redes de mesma densidade. Nas configurações com 100 nodos em grade, os nodos móveis detectaram cerca de 2% mais eventos do que os nodos estáticos.

5.3 Eficiência dos Nodos Móveis em Redes com Implantação Randômica

Implantar os nodos sensores randomicamente não garante a cobertura ou comunicação na rede mesmo com uma distribuição probabilística uniforme. Isto é mostrado na Figura 10 onde os nodos são implantados desta forma e vários nodos não conseguem estabelecer um caminho de comunicação até o *sink* e há buracos na cobertura da área de interesse. Seguindo a estratégia de mobilidade proposta neste trabalho, assim que os nodos são implantados, se as forças de repulsão não estiverem em equilíbrio, eles começam a se mover a fim de melhorar a cobertura da rede e garantir sua conectividade.

A eficiência da reorganização de nodos proposta em redes com implantação randômica pode ser observada nas Figuras 15 e 17, quando comparadas aos nodos estáticos em diferentes densidades de rede. Na Figura 15, os resultados em termos de média de eventos sensorizados por dia podem ser analisados para ambos os tipos de nodos. Comparando estes resultados, observa-se que os nodos móveis aumentam em torno de 220% a média de eventos sensorizados com uma menor densidade de rede (49 nodos). No entanto, a qualidade média da distribuição aleatória dos nodos estáticos melhora à medida que a densidade aumenta, o que reduz a melhoria alcançada pelos nodos móveis. Esta relação entre o ganho apresentado pelos nodos móveis em relação aos estáticos pode ser melhor analisada no gráfico da Figura 16, que permite comparar o desempenho dos nodos móveis em relação aos estáticos nas densidades de 49 e 100 nodos.

Quando analisado o desempenho global dos nodos móveis e nodos estáticos em redes randômicas, dado pelas somas das médias de eventos sensorizados por cada configuração de rede, observou-se que o ganho da mobilidade diminui para 66% quando a densidade é de 64 e tende a zero nas densidades mais elevadas, como pode ser observado na Figura 17.

5.4 Combinando Nodos Móveis com Balanceamento de Carga

Nesta seção é avaliada a combinação de nodos móveis com as duas técnicas bioinspiradas de balanceamento de carga implementadas no Eboracum. Os resultados desta combinação são comparados com a utilização de nodos estáticos simples (sem

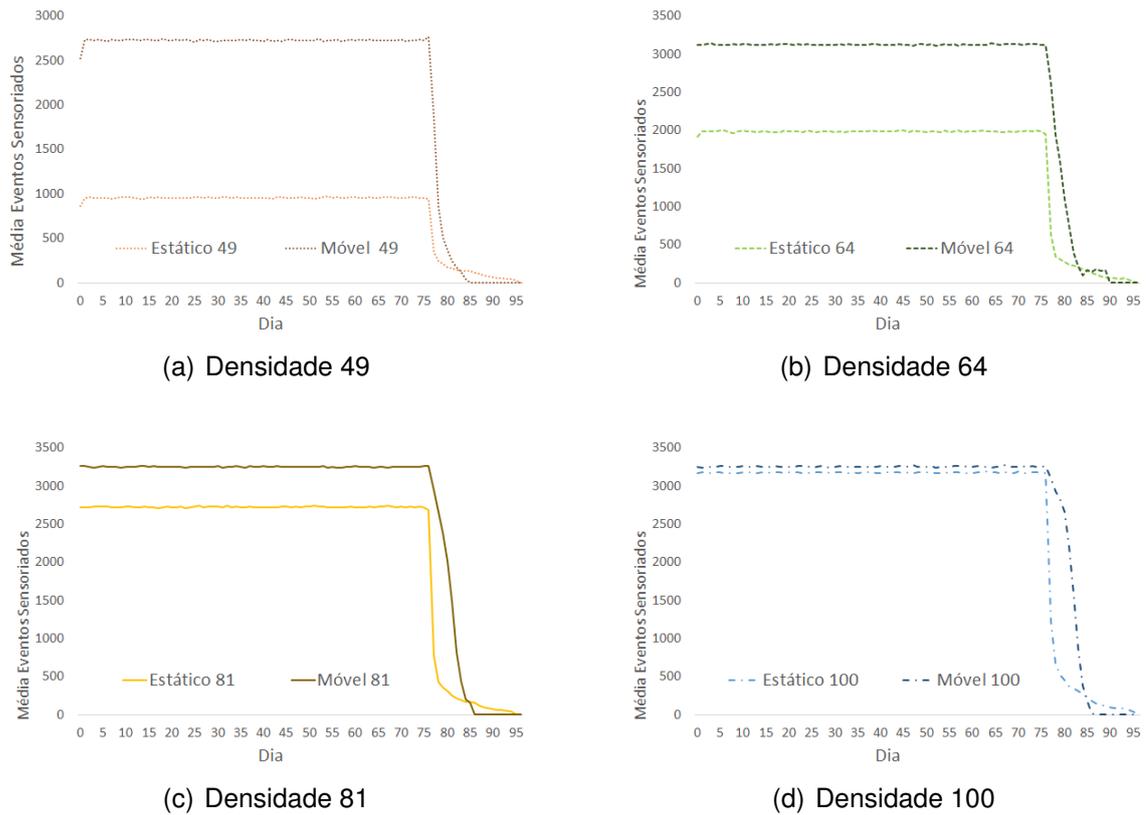


Figura 15: Comparação dos eventos sensoriados por dia por nodos móveis versus nodos estáticos em uma distribuição randômica para as 4 densidades

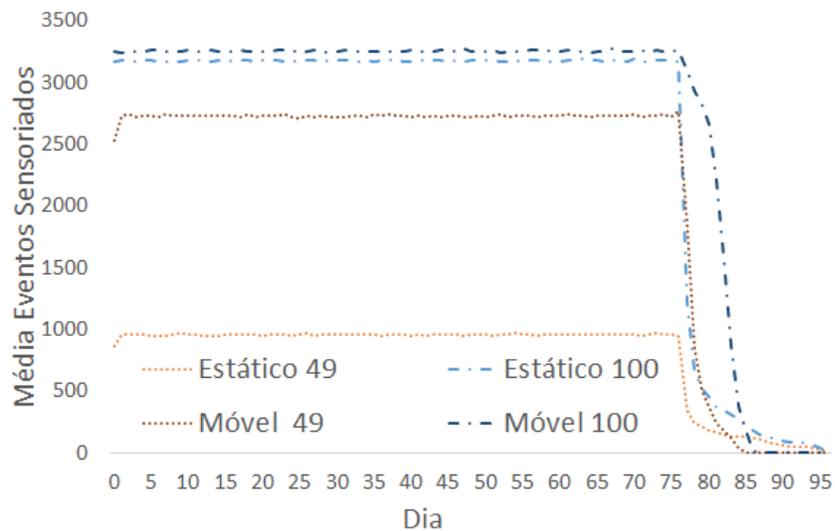


Figura 16: Comparação dos eventos sensoriados por dia por nodos móveis versus nodos estáticos em uma distribuição randômica comparando a menor densidade (49) e a maior densidade (100)

a utilização das técnicas de balanceamento), variando a densidade da rede e a estratégia de implantação adotada, visando avaliar o impacto da mobilidade nas duas técnicas de balanceamento de carga.

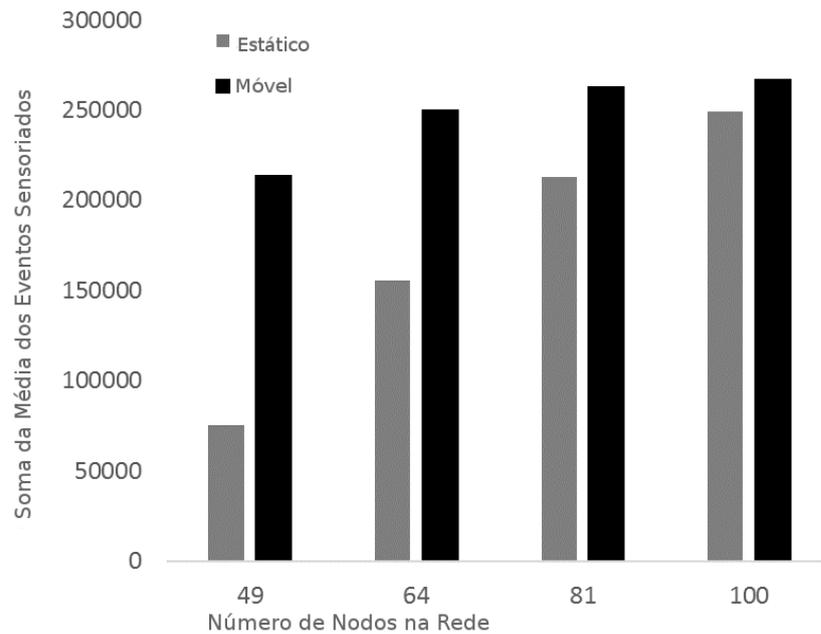


Figura 17: Total de eventos sensorizados pelos nodos móveis versus estáticos em uma distribuição randômica

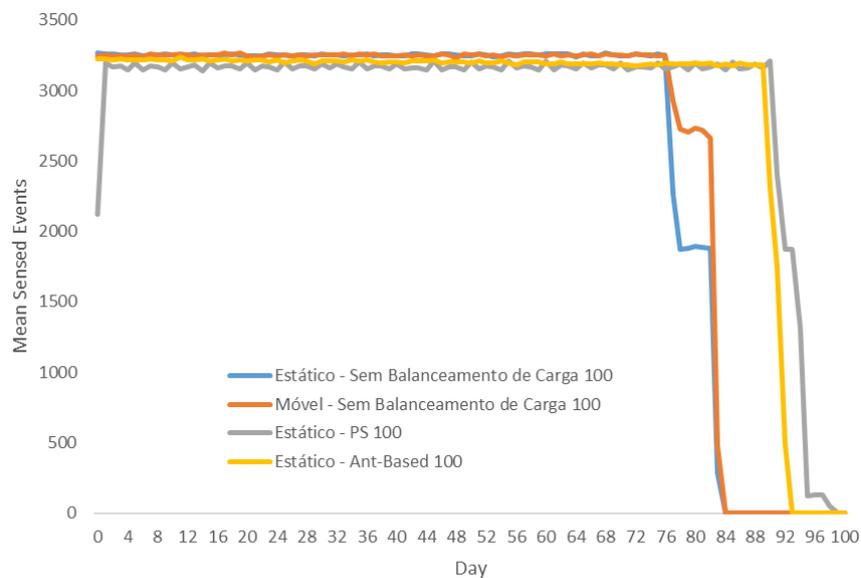


Figura 18: Nodos Móveis versus Balanceamento de Carga em Rede com Implantação em *grid*

Porém, antes de apresentar resultados desta combinação, serão discutidos os resultados de um conjunto preliminar de experimentos, onde comparou-se o desempenho dos nodos móveis simples (sem balanceamento de carga) ao desempenho de nodos estáticos sem balanceamento e com balanceamento de carga do tipo Ant e PS. Este conjunto de experimentos preliminar foi realizado usando uma rede de 100 nodos implantados em grade e seus resultados podem ser observados na Figura 18.

Nestes experimentos foi observado que todas as abordagens obtiveram resultados de desempenho bem parecidos até o dia 76. No entanto, antes do dia 80 já é possível observar uma queda no número de eventos detectados pelos nodos estáticos sem balanceamento de carga em relação aos nodos móveis, também sem balanceamento de carga. Esta melhora apresentada pelos nodos móveis deve-se a mobilidade dos nodos que permitiram aumentar o número médio de eventos detectados pela rede. É importante destacar que esta melhora só ocorre neste período avançado do tempo de vida da rede, entre os dias 80 e 84, devido ao fato da rede ter uma distribuição em *grid*, fazendo com que a redistribuição dos nodos só ocorra quando algum nodo fica sem bateria. Tanto na configuração da rede que emprega nodos móveis quanto na com nodos estáticos sem balanceamento de carga, a rede tem um tempo de vida de 84 dias.

Nestes experimentos, também é possível observar que as configurações da rede que empregam nodos estáticos com as estratégias de balanceamento de carga, apresentam um melhor resultado, quando comparadas aos nodos móveis simples (sem balanceamento de carga). Isso deve-se ao fato da densidade de 100 nodos prover um cenário com grande redundância e que permite as técnicas de balanceamento de carga aumentar o tempo de vida da rede e conseqüentemente aumentar também o número total de eventos sensoriados pela rede. Como a estratégia de mobilidade visa aumentar a cobertura e o balanceamento de carga visa aumentar o tempo de vida, estas estratégias podem ser consideradas complementares, o que motiva a combinação das estratégias, o que será avaliado nas seções 5.4.1 e 5.4.2.

5.4.1 Balanceamento de Carga com nodos móveis em grade

Nesta subseção são discutidos os resultados alcançados pelas duas técnicas de balanceamento de carga quando empregadas em redes com nodos móveis implantados em grade, comparadas ao emprego de nodos móveis sem balanceamento de carga.

A Figura 20 ilustra os resultados alcançados pela técnica *Ant-based* quando empregada em uma rede composta de nodos móveis, variando a densidade para 49, 64, 81 e 100 nodos. Neste conjunto de experimentos, foi observado que a técnica *Ant-based* perde desempenho quando combinada com nodos móveis em redes em grade com altas densidades, como pode ser observado na Figura 19. Isto se deve ao fato de que a implementação desta técnica de balanceamento de carga *Ant-based* tem um parâmetro importante que depende do número de vizinhos e essa quantidade de vizinhos é afetado pela mobilidade dos nodos. Conforme explicado em (FERREIRA; BRISOLARA; INDRUSIAK, 2015), nodos sensores que executam a *Ant-based* usam um processo de comunicação onde cada nodo pode estimar o número máximo de vizinhos que pode sensoriar o mesmo evento ao mesmo tempo, chamado $N_j(t)$.

Este parâmetro é computado de acordo com o número máximo de mensagens que os nodos recebem simultaneamente até o instante t atual e este número só aumenta durante a simulação. Porém, o número de vizinhos real cai devido ao movimento dos nodos ao reorganizar a cobertura de rede e o parâmetro $N_j(t)$ não obedece esse declínio e mantém-se com o máximo número de vizinhos que o nodo já teve. Então, depois da reorganização o estímulo computado pelos nodos será artificialmente elevado, fazendo com que mais nodos processem um mesmo evento, o que diminui o desempenho do balanceamento de carga.

A Figura 21 ilustra os resultados alcançados pela estratégia PS quando aplicada a nodos móveis implantados em grade e os resultados dos nodos móveis simples (sem balanceamento de carga) para as diferentes densidades de rede. O PS combinado com nodos móveis obteve desempenho similar, mas com uma pequena melhora, ao obtido pelo PS quando aplicado com nodos estáticos (Figura 18). Isto mostra que esta pequena melhora no desempenho se deve à mobilidade dos nodos. Experimentos mais completos do PS com nodos estáticos podem ser encontrados em (FERREIRA; BRISOLARA; INDRUSIAK, 2015).

O desempenho global de cada uma das técnicas de balanceamento de carga quando combinadas com nodos móveis implantados em grade é ilustrado na Figura 23 em termos da soma dos números médios de eventos sensorizados por cada configuração. Estes são comparados com os resultados alcançados pelos nodos móveis sem balanceamento de carga. É possível observar também, que a soma da média de eventos sensorizados com nodos móveis simples se mantém para as quatro densidades da rede. Enquanto que nodos móveis que utilizam a técnica PS têm melhor resultado em redes com densidades maiores. Já os nodos móveis que utilizam a técnica *Ant-based* obtiveram melhores resultados em uma rede com configuração menos densa.

5.4.2 Balanceamento de Carga com Nodos Móveis em Implantação Randômica

Nesta subseção são discutidos os resultados alcançados pelas duas técnicas de balanceamento de carga quando empregadas em redes com nodos móveis implantados aleatoriamente, comparadas ao emprego de nodos móveis sem nenhuma técnica de balanceamento de carga.

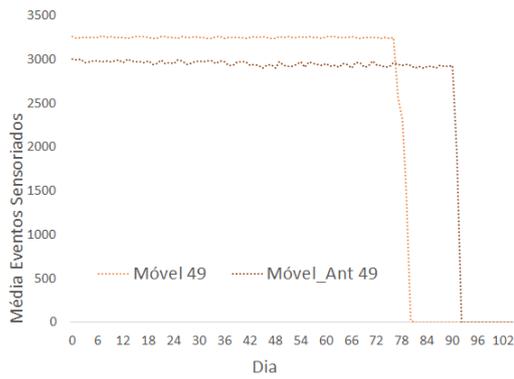
A Figura 24 apresenta os resultados de desempenho global obtidos pela combinação das duas técnicas de balanceamento de carga com nodos móveis, bem como os resultados alcançados com nodos sensores móveis sem qualquer estratégia de balanceamento de carga em redes implantadas aleatoriamente. Pode-se observar que a abordagem *Ant-based* atinge melhores resultados em redes com baixas densidades (entre 49 e 64 nodos), quando comparado ao PS ou aos nodos móveis simples. Já a estratégia PS, por ser bastante dependente da redundância nas áreas de sen-

soriamento, apresenta melhores resultados em redes de altas densidades (81 a 100 nodos), ganhando do *Ant-based* e dos nodos móveis simples nestas configurações. No entanto, os ganhos obtidos pelo PS em redes com implantação randômica são menores que os obtidos por esta técnica em redes com implantação em grade com alta densidade de nodos.

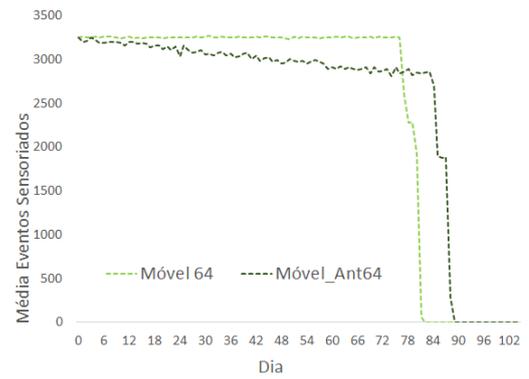
Como pode ser observado na Figura 25, o PS aumenta o tempo de vida da rede mas perde uma quantidade significativa de eventos diários quando comparado com nodos sensores móveis simples em todas as densidades avaliadas. Apesar deste comportamento ocorrer nas quatro densidades, esta redução no número médio de eventos sensorizados por dia tende a diminuir quando a densidade aumenta, como pode ser observado nas Figuras 25 e 26.

Alterando a técnica de balanceamento de carga empregada para *Ant-based*, no lugar do PS, os experimentos foram repetidos e os resultados alcançados pelo *Ant-based* quando aplicada à rede composta de nodos móveis podem ser observados na Figura 27, onde também encontram-se os resultados alcançados pelos nodos móveis simples (sem balanceamento de carga). Devido à implantação aleatória, a limitação desta técnica de balanceamento de carga relativa ao número de vizinhos e cálculo do estímulo é minimizada. Quando comparada com nodos móveis simples, a técnica *Ant-based* continua apresentando ganhos mais significativos em configurações com baixa densidade, mas em configurações de densidade alta atinge resultados equivalentes, como destacado no gráfico da Figura 28.

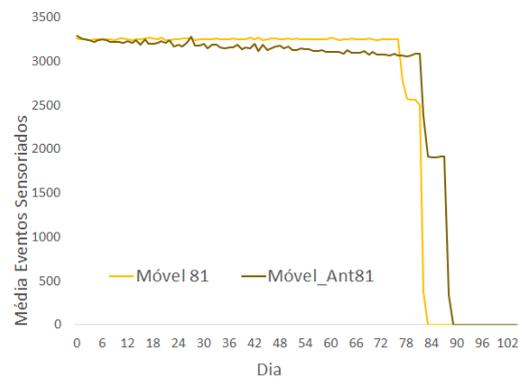
Analisando ambas técnicas e o impacto na mobilidade no desempenho das mesmas, é importante destacar que a técnica *PS-based* apresenta um comportamento consistente uma vez que mantém o seu mau desempenho em baixas densidades e melhor desempenho em alta densidade (com nodos estáticos e móveis), o que a técnica *Ant-based* não consegue fazer. Além disso, é importante destacar que o PS combinado com nodos móveis parece ser uma boa estratégia em redes com 81 nodos, tanto com implantação em grade quanto aleatória, como pode ser visto nas Figuras 24 e 23. Enquanto, que em (FERREIRA; BRISOLARA; INDRUSIAK, 2015), o PS com nodos estáticos em grade só apresentou melhores resultados que o Ant com nodos estáticos em grade na densidade de 100 nodos. Este resultado reforça que a estratégia de mobilidade proposta trouxe melhorias a técnica PS.



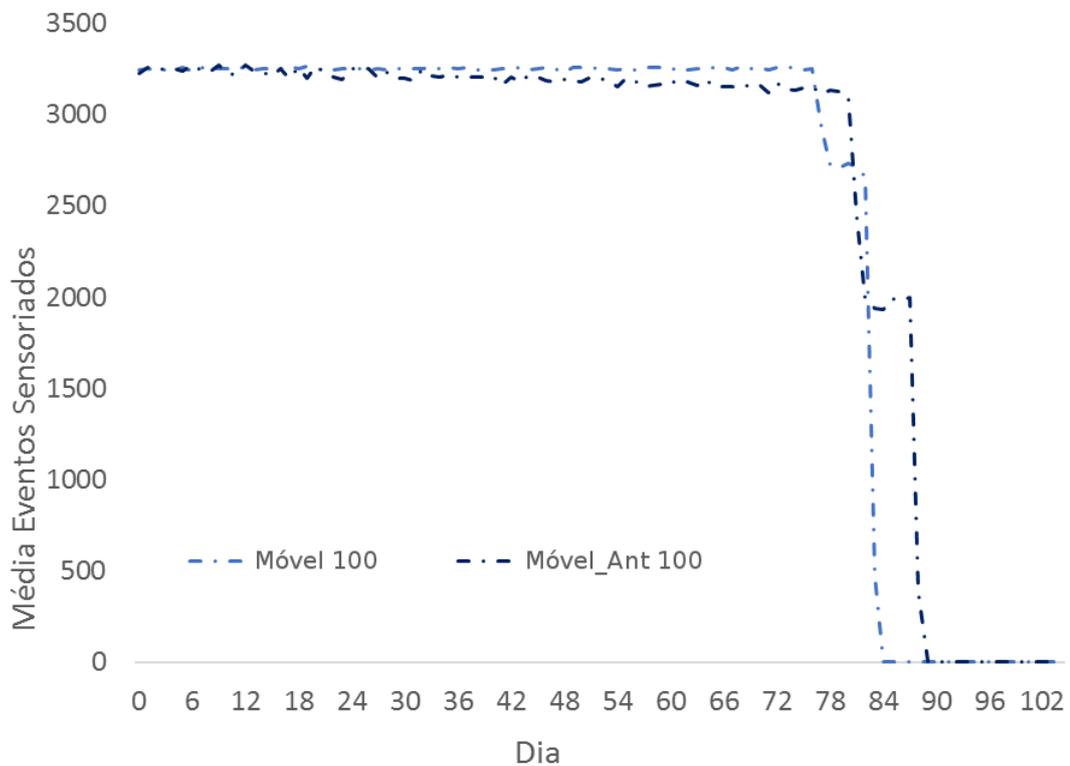
(a) Densidade 49



(b) Densidade 64



(c) Densidade 81



(d) Densidade 100

Figura 19: Comparação dos eventos sensoriados diariamente em rede com nodos móveis implantados em grade com a técnica de balanceamento de carga *Ant-based* e sem balanceamento de carga para as 4 densidades

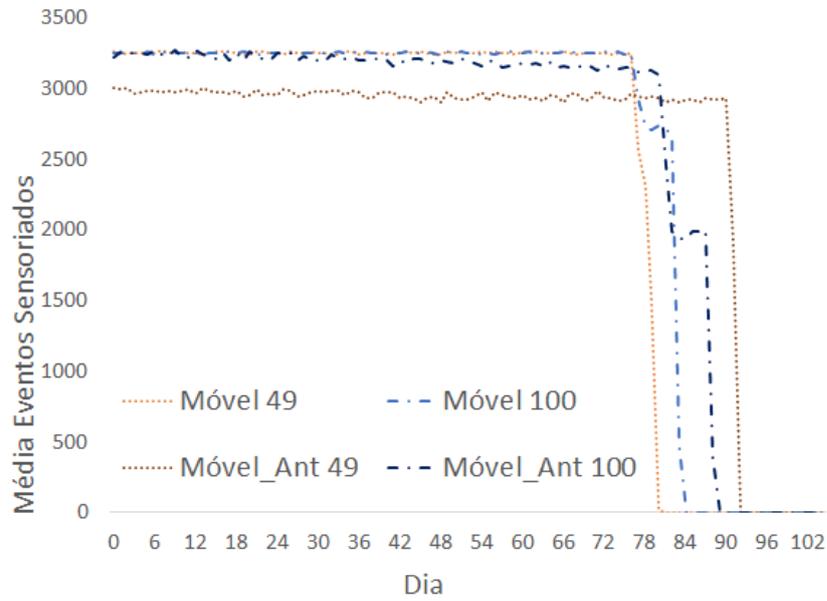
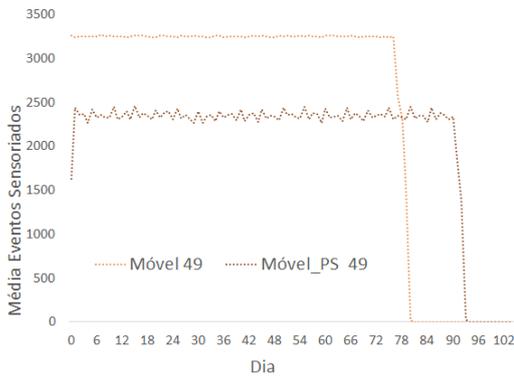
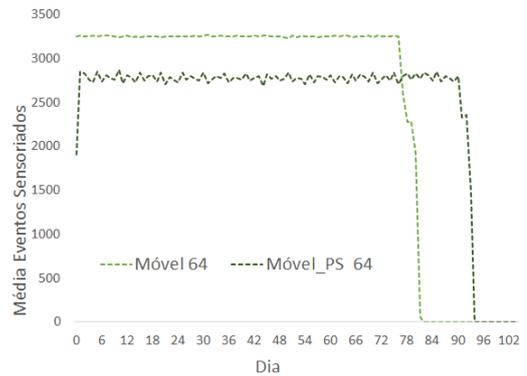


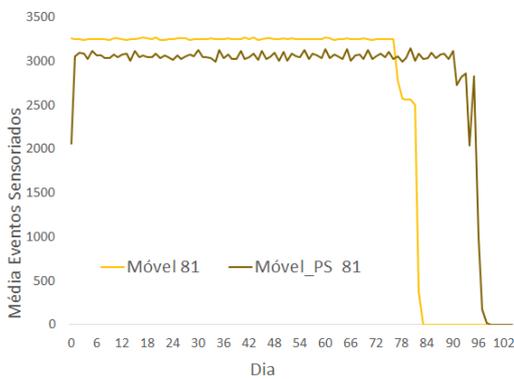
Figura 20: Comparação dos eventos sensoriados diariamente em rede com nodos móveis implantados em grade com a técnica de balanceamento de carga *Ant-based* e sem balanceamento de carga para menor densidade (49) e maior densidade (100)



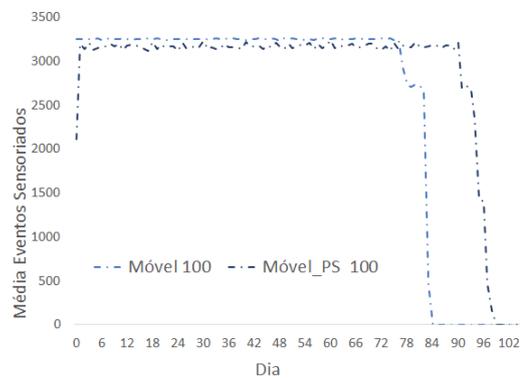
(a) Densidade 49



(b) Densidade 64



(c) Densidade 81



(d) Densidade 100

Figura 21: Comparando os eventos sensoriados diariamente em redes com nodos móveis implantados em grade com o balanceamento de carga PS e sem balanceamento de carga para as 4 densidades

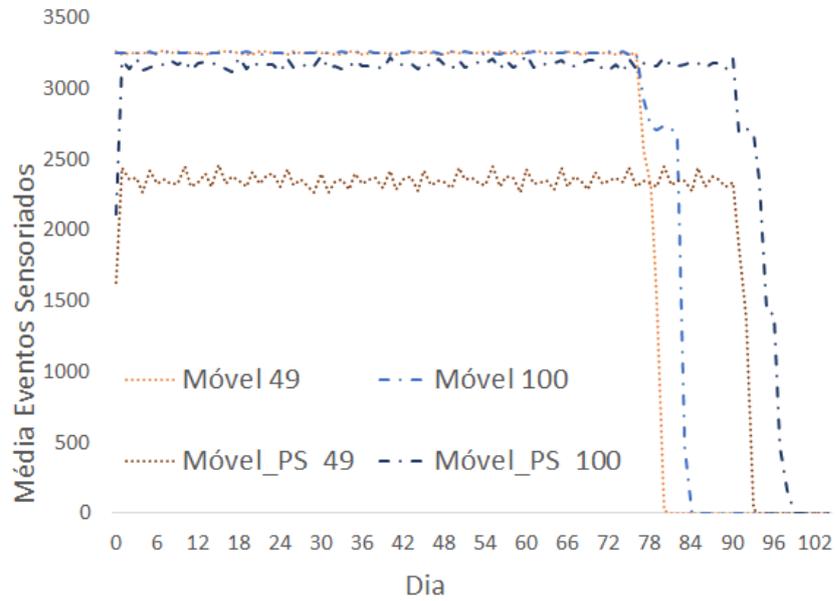


Figura 22: Comparando os eventos sensorizados diariamente em redes com nodos móveis implantados em grade com o balanceamento de carga PS e sem balanceamento de carga comparando a menor densidade (49) e a maior densidade (100)

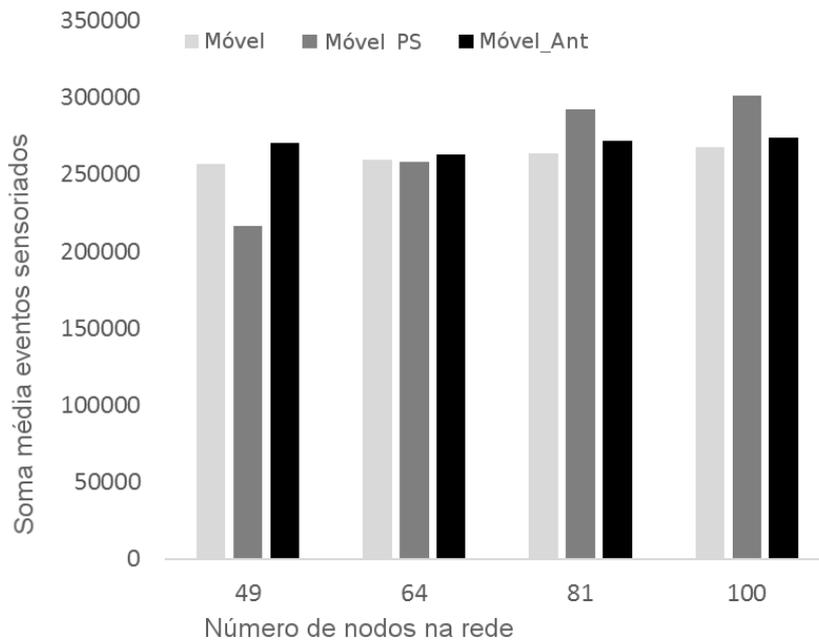


Figura 23: Total de eventos sensorizados por dia com os balanceamentos de carga combinados com nodos móveis e os nodos móveis simples (sem balanceamento de carga) em redes em grade

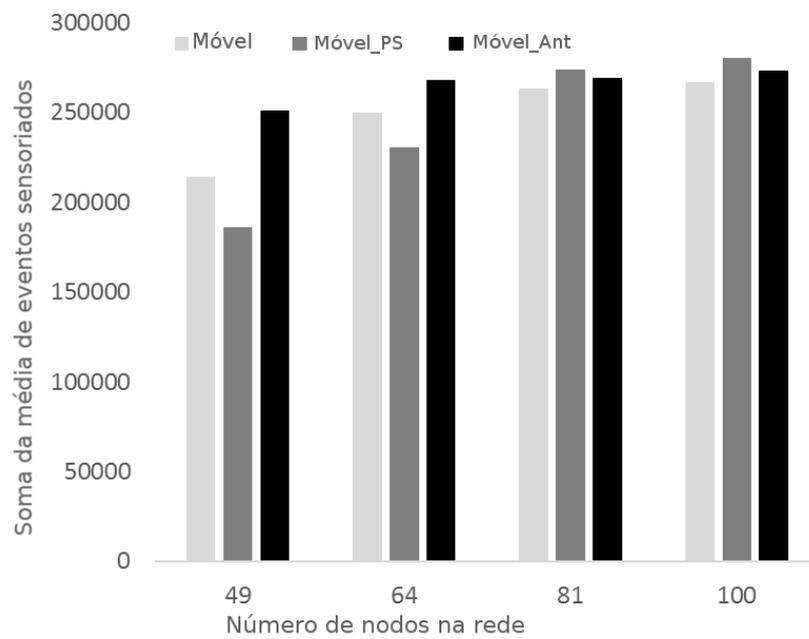
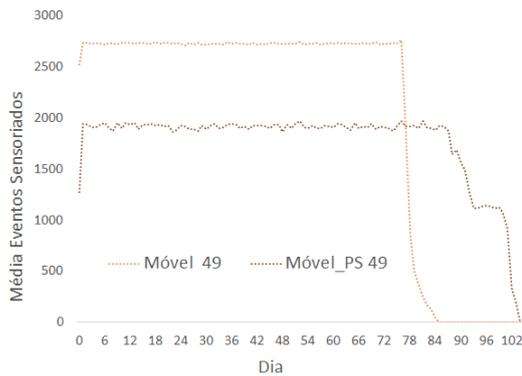
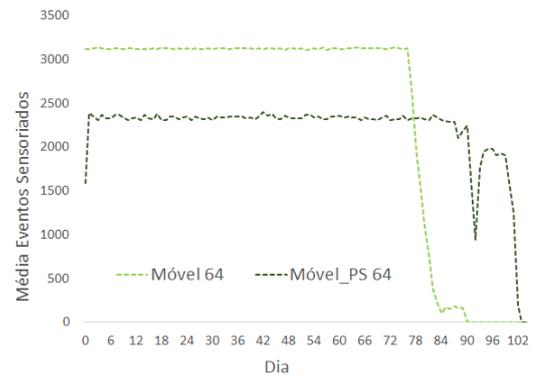


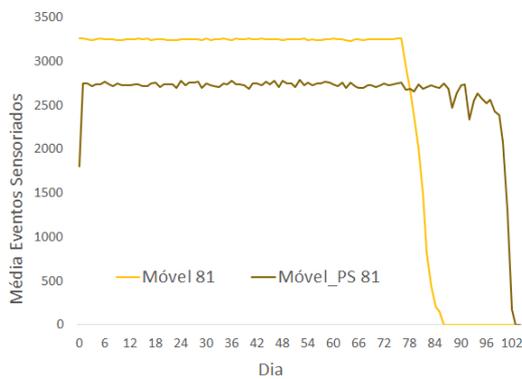
Figura 24: Total de eventos sensorizados por dia com balanceamento de carga com nodos móveis versus nodos móveis simples (sem balanceamento de carga) em uma implantação aleatória



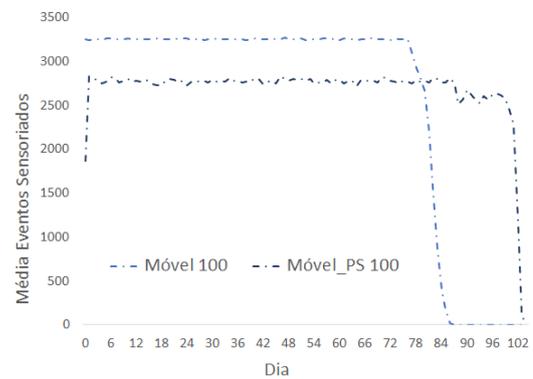
(a) Densidade 49



(b) Densidade 64



(c) Densidade 81



(d) Densidade 100

Figura 25: Comparação de eventos sensoriados por dia em redes com nodos móveis implantados aleatoriamente com balanceamento de carga usando o PS e sem balanceamento de carga para as 4 densidades

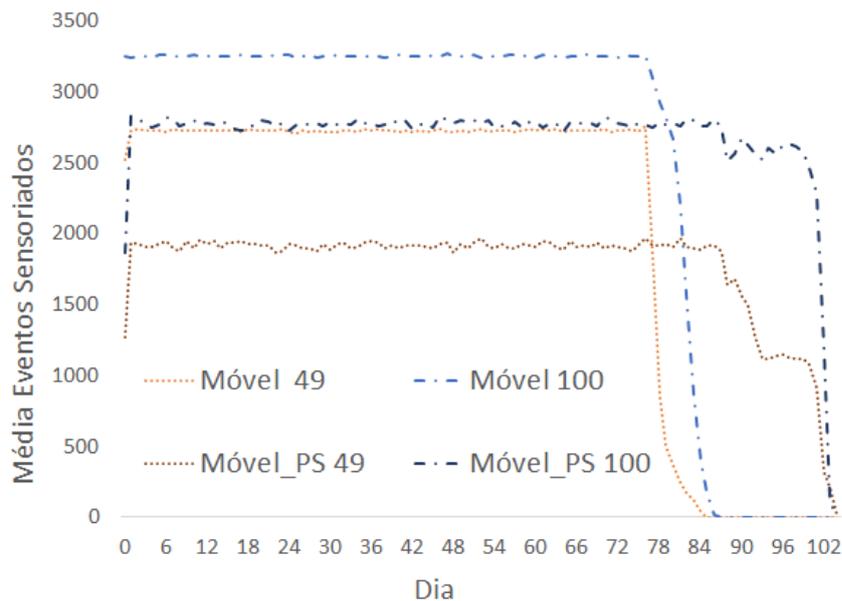
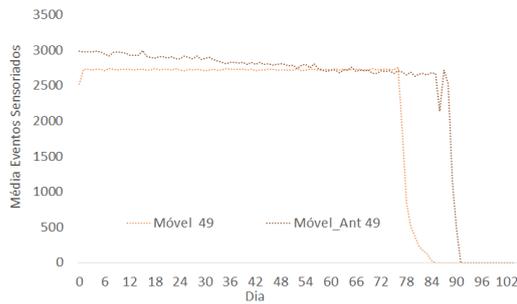
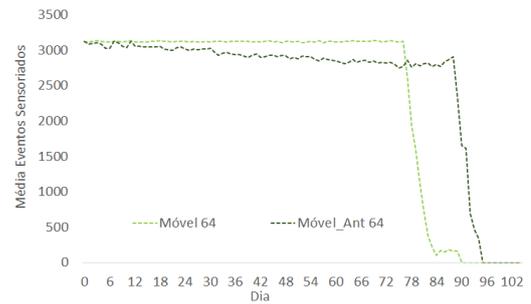


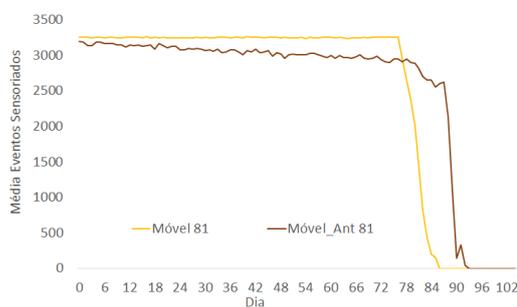
Figura 26: Comparação de eventos sensoriados por dia em redes com nodos móveis implantados aleatoriamente com balanceamento de carga usando o PS e sem balanceamento de carga comparando a menor densidade (49) e a maior densidade (100)



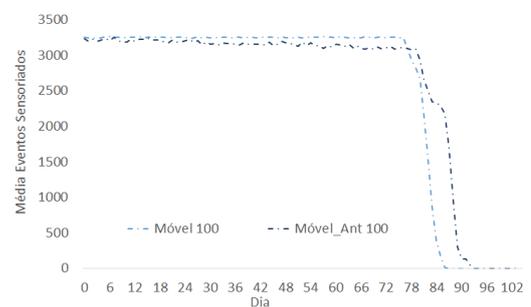
(a) Densidade 49



(b) Densidade 64



(c) Densidade 81



(d) Densidade 100

Figura 27: Comparação de eventos sensoriados por dia em redes com nodos móveis implantados aleatoriamente com balanceamento de carga usando o Ant e sem balanceamento de carga para as 4 densidades

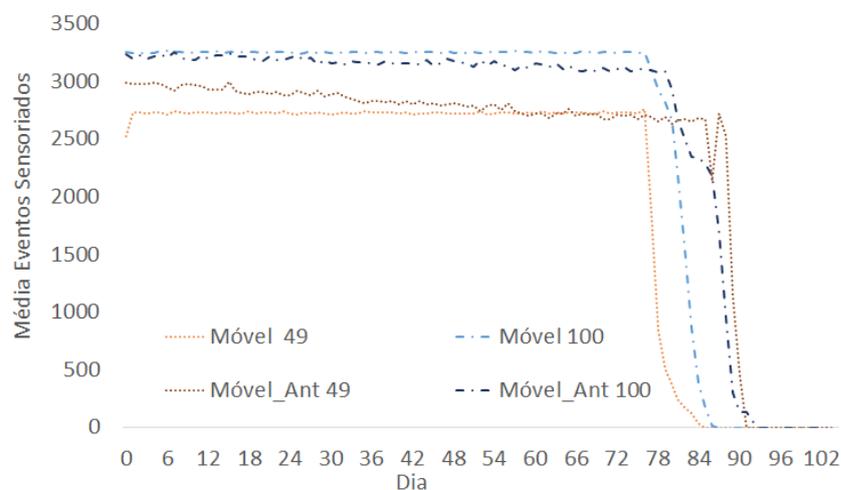


Figura 28: Comparação de eventos sensoriados por dia em redes com nodos móveis implantados aleatoriamente com balanceamento de carga usando o Ant e sem balanceamento de carga comparando a menor densidade (49) e a maior densidade (100)

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram avaliados os efeitos da mobilidade de nodos sensores tanto na cobertura quanto na eficiência das técnicas de balanceamento de carga empregadas em redes de sensores sem fio orientadas a eventos. Foi proposta e implementada uma estratégia que utiliza a teoria de campo potencial para movimentar os nodos a fim de espalhá-los pela área de interesse e assim melhorar a cobertura da rede. A estratégia de mobilidade foi implementada no Eboracum, que é um framework para modelagem e simulação de RSSFs, incorporando o conceito de nodos móveis ao framework.

Experimentos foram realizados, primeiramente para avaliar o impacto da mobilidade na cobertura da rede, em cenários de implantação randômica e em grade, e variando a densidade da rede (GONZÁLEZ; FERREIRA; BRISOLARA, 2016). Quando os nodos foram implantados aleatoriamente, foi observado que a mobilidade permite cobrir regiões da área de interesse que estavam sem cobertura, bem como espalhar aqueles nodos que estão concentrados em uma mesma região. Porém, neste tipo de implantação, a mobilidade só melhora a eficiência da rede (quantidade de eventos sensorizados) quando sua densidade é baixa, pois quando a densidade aumenta a diferença entre a utilização de nodos móveis e estáticos tende a zero. Já em redes com nodos implantados em grade, quando os nodos começam a ter suas baterias descarregadas, ocasionando seu desligamento, a estratégia de mobilidade dos nodos pode minimizar o efeito da desativação de um nodo, mantendo a rede funcional por mais tempo. Conseqüentemente, a estratégia aumenta a quantidade de eventos sensorizados pela rede em grade, principalmente em cenários com maior densidade de nodos.

Além disso, este trabalho avaliou também o impacto de nossa estratégia de mobilidade nas técnicas de balanceamento de carga para redes reativas, o *Ant-based* e o PS, implementadas recentemente no Eboracum. Para isso, este framework também foi estendido para permitir a combinação dos nodos móveis com as técnicas de balanceamento de carga. Através de experimentos, a eficiência da rede composta de nodos móveis combinado com as duas técnicas de balanceamento de carga foram compa-

radas à eficiência dos nodos móveis sem qualquer balanceamento de carga, considerando diferentes densidades e esquemas de implantação em grade e randômica. Além disso, estes resultados também foram indiretamente comparados a eficiência destas técnicas quando empregadas com nodos estáticos.

Em nossos experimentos, o *PS* combinado com nodos móveis apresentou um desempenho significativo nas implantações em grade e aleatória, já com 81 nodos, o que não foi visto em experimentos com nodos estáticos. Já a técnica *Ant-based* combinada com nodos móveis alcança melhores resultados que o *PS* apenas para redes de baixa densidade, compostas de 49 e 64 nodos sensores. Os resultados apontam que apenas o *PS* mantém o seu desempenho muito similar ao obtido com nodos estáticos em grade, uma vez que a técnica que utiliza o *Ant-based* é mais dependente do número de vizinhos diretamente afetado pelo movimento. Os experimentos permitiram observar esta limitação da implementação da técnica *Ant-based*, que não poderia ser observada sem considerar a mobilidade de nodos.

O consumo de energia referente ao movimento dos nodos não foi considerado neste trabalho, sendo considerado apenas custos com o sensoriamento, processamento de eventos e envio de mensagens. Como trabalho futuro, pretende-se construir um modelo de consumo de energia para nodos móveis, que permita avaliar também o impacto da mobilidade na vida útil da rede, considerando o custo energético relativo ao movimento. Além disso, pretende-se comparar a estratégia de mobilidade proposta neste trabalho com diferentes estratégias de mobilidade propostas na literatura.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, G. M. de; BECKER, L. B. A Network Conditions Aware Geographical Forwarding Protocol for Real-Time Applications in Mobile Wireless Sensor Networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INFORMATION NETWORKING AND APPLICATIONS, 2011., 2011. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011. p.38–45.

AZIZ, N. A. A.; MOHEMMED, A. W.; ALIAS, M. Y.; AZIZ, K. A.; SYAHALI, S. Coverage Maximization and Energy Conservation for Mobile Wireless Sensor Networks: A Two Phase Particle Swarm Optimization Algorithm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIO-INSPIRED COMPUTING: THEORIES AND APPLICATIONS, 6., 2011. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011. p.64–69.

BRISOLARA, L.; FERREIRA, P.; SOARES INDRUSIAK, L. Impact of Temporal and Spatial Application Modeling on Event-triggered Wireless Sensor Network Evaluation. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON COMPUTING SYSTEMS ENGINEERING (SBESC) 2015 , ISSN 2324-7894, 2015. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2015. p.30–35.

CALISKANELLI, I. **A Bio-inspired Load Balancing Technique for Wireless Sensor Networks**. 2014. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — University of York.

CALISKANELLI, I.; BROECKER, B.; TUYLS, K. Multi-robot coverage: A bee pheromone signalling approach. In: ARTIFICIAL LIFE AND INTELLIGENT AGENTS SYMPOSIUM, 2014. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2014. p.124–140.

CALISKANELLI, I.; HARBIN, J.; INDRUSIAK, L. S.; MITCHELL, P.; POLACK, F.; CHESMORE, D. Bioinspired Load Balancing in Large-Scale WSNs Using Pheromone Signalling. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, [S.l.], v.9, n.7, 2013.

CERIOTTI, M.; MOTTOLA, L.; PICCO, G. P.; MURPHY, A. L.; GUNA, S.; CORRA, M.; POZZI, M.; ZONTA, D.; ZANON, P. Monitoring heritage buildings with wireless sensor networks: The Torre Aquila deployment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION PROCESSING IN SENSOR NETWORKS, 2009. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2009. p.277–288.

CHEN, D.; VARSHNEY, P. K. QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS NETWORKS, ICWN '04, JUNE 21-24, 2004, LAS VEGAS, NEVADA, USA, VOLUME 1, 2004. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2004. p.227–233.

DAI, H.; HAN, R. A node-centric load balancing algorithm for wireless sensor networks. In: GLOBAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE, 2003. GLOBECOM'03. IEEE, 2003. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2003. v.1, p.548–552.

DARGIE, W.; POELLABAUER, C. **Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice.** [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. 207–223p.

DI FRANCESCO, M.; DAS, S. K.; ANASTASI, G. Data collection in wireless sensor networks with mobile elements: A survey. **ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)**, [S.l.], v.8, n.1, p.1–34, 2011.

DYCKHOFF, H. A typology of cutting and packing problems. **European Journal of Operational Research**, [S.l.], v.44, n.2, p.145–159, 1990.

EBORACUM. **Wireless Sensor Networks Framework for Ptolemy II and Visual-Sense.** Disponível em: <http://sourceforge.net/projects/eboracum/II/>. Acesso em: 20 de outubro de 2014.

ERMAN, A. T.; HOESEL, L. van; HAVINGA, P.; WU, J. Enabling mobility in heterogeneous wireless sensor networks cooperating with UAVs for mission-critical management. **IEEE Wireless Communications**, [S.l.], v.15, n.6, p.38–46, 2008.

FERREIRA, P. R.; BRISOLARA, L.; INDRUSIAK, L. S. Decentralised Load Balancing in Event-Triggered WSNs Based on Ant Colony Work Division. In: EUROMICRO CONFERENCE ON SOFTWARE ENGINEERING AND ADVANCED APPLICATIONS, 2015., 2015. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2015. p.69–75.

FREITAS, E. P. de; HEIMFARTH, T.; ALLGAYER, R. S.; WAGNER, F. R.; LARSSON, T.; PEREIRA, C. E.; FERREIRA, A. M. Coordinating aerial robots and unattended ground sensors for intelligent surveillance systems. **International Journal of Computers Communications & Control**, [S.l.], v.5, n.1, p.52–70, 2010.

GONZÁLEZ, A. V.; FERREIRA, P. R.; BRISOLARA, L. Mobile Nodes as a Dynamic Management Strategy to Improve Coverage in Wireless Sensor Network. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON COMPUTING SYSTEMS ENGINEERING (SBESC), 6., 2016. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2016.

GUO, Y.-n.; LIU, D.; LIU, Y.; CHEN, M. The Coverage Optimization for Wireless Sensor Networks Based on Quantum-Inspired Cultural Algorithm. In: SUN, Z.; DENG,

Z. (Ed.). **Chinese Intelligent Automation Conference**. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2013. p.87–96. (Lecture Notes in Electrical Engineering, v.254).

HOWARD, A.; MATARIĆ, M. J.; SUKHATME, G. S. Mobile sensor network deployment using potential fields: A distributed, scalable solution to the area coverage problem. In: **Distributed Autonomous Robotic Systems 5**. [S.l.]: Springer, 2002. p.299–308.

HOWARD, A.; MATARIĆ, M. J.; SUKHATME, G. S. An incremental self-deployment algorithm for mobile sensor networks. **Autonomous Robots**, [S.l.], v.13, n.2, p.113–126, 2002.

INC., M. **IRIS: Wireless Measurement System**. http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/WSN/IRIS_Datasheet.pdf.

JABBAR, S.; BUTT, A. E.; SAHAR, N. U.; MINHAS, A. A. Threshold based load balancing protocol for energy efficient routing in WSN. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMMUNICATIONS TECHNOLOGY (ICACT), 13., 2011. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2011. p.196–201.

KHATIB, O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. **The international journal of robotics research**, [S.l.], v.5, n.1, p.90–98, 1986.

KIM, Y.; SCHMID, T.; CHARBIWALA, Z. M.; FRIEDMAN, J.; SRIVASTAVA, M. B. NAWMS: Nonintrusive Autonomous Water Monitoring System. In: ACM CONFERENCE ON EMBEDDED NETWORK SENSOR SYSTEMS, 6., 2008, New York, NY, USA. **Anais...** ACM, 2008. p.309–322. (SenSys '08).

LEE, J.-W.; LEE, J.-J. Ant-colony-based scheduling algorithm for energy-efficient coverage of WSN. **Sensors Journal, IEEE**, [S.l.], v.12, n.10, p.3036–3046, 2012.

LI, H.; MIAO, D.; CHEN, J.; SUN, Y.; SHEN, X. S. Networked ultrasonic sensors for target tracking: an experimental study. **Engine**, [S.l.], 2009.

LIU, T.; SADLER, C. M.; ZHANG, P.; MARTONOSI, M. Implementing software on resource-constrained mobile sensors: Experiences with Impala and ZebraNet. In: MOBILE SYSTEMS, APPLICATIONS, AND SERVICES, 2., 2004. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2004. p.256–269.

LOUREIRO, A. A.; NOGUEIRA, J. M. S.; RUIZ, L. B.; MINI, R. A. d. F.; NAKAMURA, E. F.; FIGUEIREDO, C. M. S. Redes de sensores sem fio. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES (SBRC), 2003. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2003. p.179–226.

MARQUES, M. R. S.; BRISOLARA, L.; FERREIRA, P. R.; INDRUSIAK, L. S. Eboracum: An extensible framework for high-level modeling and evaluation of reactive and adaptable WSNs. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES AND FACTORY AUTOMATION (ETFA), 21., 2016. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2016. p.1–8.

MOR, S.; SAROHA, M. Load Balancing In Wireless Sensor Networks. **International Journal of Software and Web Sciences IJSWS**, [S.l.], 2013.

MOTTOLA, L.; PICCO, G. P. Programming wireless sensor networks: Fundamental concepts and state of the art. **ACM Computing Surveys (CSUR)**, [S.l.], v.43, n.3, p.19, 2011.

MUNIR, S. A.; REN, B.; JIAO, W.; WANG, B.; XIE, D.; MA, J. Mobile Wireless Sensor Network: Architecture and Enabling Technologies for Ubiquitous Computing. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INFORMATION NETWORKING AND APPLICATIONS WORKSHOPS, 2007, AINAW '07., 21., 2007. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2007. v.2, p.113–120.

SYSTEM Design, Modeling, and Simulation using Ptolemy II. [S.l.]: Ptolemy.org, 2014. Disponível em: <<http://ptolemy.org/books/Systems>>. Acesso em: 10 de novembro de 2014.

REZAZADEH, J. Mobile Wireless Sensor Networks Overview. **International Journal of Computer Communications and Networks (IJCCN)**, [S.l.], v.2, n.1, 2012.

ROSELLO, V.; PORTILLA, J.; KRASTEVA, Y.; RIESGO, T. Wireless sensor network modular node modeling and simulation with VisualSense. In: ANNUAL CONFERENCE OF IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS, 35., 2009. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2009. p.2685–2689.

RUIZ, L. B. **Maná**: uma arquitetura para gerenciamento de redes de sensores sem fio. 2003. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — Universidade Federal de Minas Gerais.

SAHA, D.; DAS, N. Self-organized Area Coverage in Wireless Sensor Networks by Limited Node Mobility. **Innovations in Systems and Software Engineering**, Secaucus, NJ, USA, v.12, n.3, p.227–238, Sept. 2016.

SELAVO, L.; WOOD, A.; CAO, Q.; SOOKOOR, T.; LIU, H.; SRINIVASAN, A.; WU, Y.; KANG, W.; STANKOVIC, J.; YOUNG, D.; PORTER, J. LUSTER: Wireless Sensor Network for Environmental Research. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMBEDDED NETWORKED SENSOR SYSTEMS, 5., 2007, New York, NY, USA. **Anais...** ACM, 2007. p.103–116. (SenSys '07).

TOLLE, G.; POLASTRE, J.; SZEWCZYK, R.; CULLER, D.; TURNER, N.; TU, K.; BURGESS, S.; DAWSON, T.; BUONADONNA, P.; GAY, D.; HONG, W. A Macroscope in the Redwoods. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMBEDDED NETWORKED SENSOR SYSTEMS, 3., 2005, New York, NY, USA. **Anais...** ACM, 2005. p.51–63. (SenSys '05).

VALENTE, J.; SANZ, D.; BARRIENTOS, A.; CERRO, J. d.; RIBEIRO, Á.; ROSSI, C. An air-ground wireless sensor network for crop monitoring. **Sensors**, [S.l.], v.11, n.6, p.6088–6108, 2011.

WERNER-ALLEN, G.; LORINCZ, K.; JOHNSON, J.; LEES, J.; WELSH, M. Fidelity and Yield in a Volcano Monitoring Sensor Network. In: SYMPOSIUM ON OPERATING SYSTEMS DESIGN AND IMPLEMENTATION, 7., 2006, Berkeley, CA, USA. **Anais...** USENIX Association, 2006. p.381–396. (OSDI '06).

WIEDER, A.; BRANDENBURG, B. B. Efficient partitioning of sporadic real-time tasks with shared resources and spin locks. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL EMBEDDED SYSTEMS (SIES), 8., 2013. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2013. p.49–58.

YING, Q.; MING, G. Energy Aware Routing Algorithm in WSN. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS, CIRCUITS AND SYSTEMS (ICCCAS), 2010. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2010. p.103–107.

Redes de Sensores com Nodos Móveis: Investigando Efeitos da Mobilidade na Cobertura de Sensoriamento e no Balanceamento de Carga – Andrea Verónica González



Veronica González

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Computação



Dissertação

Redes de Sensores com Nodos Móveis: Investigando Efeitos da Mobilidade na Cobertura de Sensoriamento e no Balanceamento de Carga

ANDREA VERONICA GONZÁLEZ

Pelotas, 2016