

**NAVEGAÇÃO ROBÓTICA EM REDES DE
SENSORES SEM FIO BASEADA NO RSSI**

ANTONIO RAMOS DE CARVALHO JÚNIOR

**NAVEGAÇÃO ROBÓTICA EM REDES DE
SENSORES SEM FIO BASEADA NO RSSI**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal do Amazonas como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Informática.

ORIENTADOR: CARLOS MAURÍCIO SERÓDIO FIGUEIREDO

Manaus

Março de 2013

© 2013, Antonio Ramos de Carvalho Júnior.
Todos os direitos reservados.

D1234p de Carvalho Júnior, Antonio Ramos
Navegação Robótica em Redes de Sensores Sem Fio
Baseada no RSSI / Antonio Ramos de Carvalho
Júnior. — Manaus, 2013
xx, 49 f. : il. ; 29cm

Dissertação (mestrado) — Universidade Federal do
Amazonas

Orientador: Carlos Maurício Seródio Figueiredo

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

CDU 519.6*82.10

[Folha de Aprovação]

Quando a secretaria do Curso fornecer esta folha, ela deve ser digitalizada e armazenada no disco em formato gráfico.

Se você estiver usando o `pdflatex`, armazene o arquivo preferencialmente em formato PNG (o formato JPEG é pior neste caso).

Se você estiver usando o `latex` (não o `pdflatex`), terá que converter o arquivo gráfico para o formato EPS.

Em seguida, acrescente a opção `approval={nome do arquivo}` ao comando `\ppgccufmg`.

Se a imagem da folha de aprovação precisar ser ajustada, use:
`approval=[ajuste] [escala] {nome do arquivo}`
onde *ajuste* é uma distância para deslocar a imagem para baixo e *escala* é um fator de escala para a imagem. Por exemplo:
`approval=[-2cm] [0.9] {nome do arquivo}`
desloca a imagem 2cm para cima e a escala em 90%.

Dedico este livro as pessoas que sempre estão ao meu lado: minha mãe (Maria do Socorro), meu pai (Antonio Ramos), minha irmã (Luciana Figueira) e minha namorada (Tamille Lima).

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer a Deus por ser meu apoio e fortaleza nos momentos mais difíceis ao longo desta caminhada.

Quero agradecer a minha família por ter me dado todo apoio e compreensão quando tive que ficar ausente. Em especial quero agradecer minha mãe, Maria do Socorro (a Socorrinha), meu pai, Antonio Ramos, minha irmã Luciana Figueira e minha namorada Tamille Lima por aguentarem meu estresse. Sem esquecer também de meus irmãos Miguel e Marco Antônio, meus primos João Victor, Kamila, Karol e Aline. Enfim, a todos da minha família.

Agradeço também aos professores que contribuíram para meus crescimento: Maurício Figueiredo por ser um ótimo orientador e amigo. Eduardo Nakamura por suas dicas rápidas e extremamente valiosas. Vilar Neto por sempre estar disposto a compartilhar todo o seu conhecimento. Sem a ajuda de vocês eu não teria conseguido.

Não posso esquecer dos amigos que estiveram comigo do início ao final dessa longa e tenebrosa caminhada. Afonso Ribas por todas as trocas de ideias e rabiscos, sempre disposto no momento em que eu precisava de uma segunda opinião. Aos parceiros de estudos: Afonso, Palheta, Caio, Pedro, Moisés, Leandro e outros.

Não posso esquecer também dos amigos que estiverem ao meu lado independente de saber ou não o que eu estava fazendo no mestrado: Marcus Brandt, Gabriel, Sabrina, Rodrigo Borges.

Por fim porém não menos importante, quero agradecer a instituição FUCAPI por todo o apoio e confiança depositado em mim.

Resumo

Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) são comumente utilizadas em aplicações de monitoramento, devido à sua capacidade de sensoriar, processar, comunicar e seu baixo custo. No entanto, uma das limitações de RSSF é quanto à energia, pois cada dispositivo (nó sensor) dessa rede precisa ter baixo consumo de energia, não permitindo a utilização de *hardwares* extras, como o GPS. Por outro lado, robôs podem auxiliar no monitoramento feito por RSSF. Uma possível aplicação utilizando robôs em RSSF é a busca de eventos de interesse, na qual um robô navega na rede até encontrar um determinado evento, utilizando a potência de sinal (RSSI) como referência para sua navegação. Encontramos na literatura trabalhos que solucionam tal problema. Entretanto, tais trabalhos consideram um modelo de propagação idealizado, na qual a curva de regressão do RSSI em função da distância é ideal para aquele cenário. Apresentaremos nesta dissertação dois algoritmos que solucionam o problema de navegação do robô baseada na RSSI em busca de um evento. O primeiro algoritmo é baseado na detecção da borda de cobertura do sinal do nó e o segundo utiliza probabilidade para estimar distância e direção do nó alvo. Para o tal, realizamos experimentos para medir o valor de RSSI de acordo com a distância, na floresta Amazônica e representamos o modelo de propagação de sinal obtido em um simulador. Simulações baseadas nas soluções da literatura mostraram que o percentual de chegada destas soluções é inversamente relacionada à distância de partida de seu alvo quando submetidas ao modelo de propagação detectado nos experimentos. Os dois algoritmos apresentados foram desenvolvidos considerando o modelo de propagação do sinal obtido nos experimentos e ambos encontram seu alvo em 100% dos casos.

Palavras-chave: Redes de Sensores Sem Fio, Navegação Robótica, Sistemas Embarcados.

Abstract

Wireless Sensor Networks (WSNs) are commonly used in monitoring applications due to its capacity to sensing, processing and communicating, and its low cost. However, one limitation of WSN is on energy, because each device (sensor node) of the network needs to have low energy consumption, not allowing the use of extra hardware such as GPS. On the other hand, robots can assist in monitoring made by WSN. One possible application using robots in WSN is to search for events of interest, in which a robot browsing the network to find a specific event, using the signal strength (RSSI) as a reference for navigation. Solutions to this problem have been found in the literature. However, such works assume a devised propagation model, in which the RSSI regression curve versus distance is ideal for that scenario. We present in this dissertation two algorithms that solve the problem of robot navigation based on RSSI in search of an event. The first algorithm is based on the node signal coverage detection and the second uses probability to estimate distance and direction of the target node. Therefore, we conducted experiments to measure the RSSI value according to the distance in Amazon rainforest and represent the signal model propagation obtained in a simulator. Simulations based on the solutions of the literature showed that the percentage of arrival of these solutions is inversely related to the distance of departure from its target when subjected to propagation model detected in experiments. The two algorithms presented have been developed considering the propagation model of the signal obtained in the experiments and both find their target 100 % of the cases.

Keywords: Wireless Sensor Networks, Robot Navigation, Embedded System.

Lista de Figuras

1.1	Ambiente monitorado por uma Rede de Sensores Sem Fio	2
3.1	Experimento na floresta Amazônica	14
3.2	Média dos valores RSSI para cada distância tomada entre os nós sensores .	15
3.3	Simulação preliminar de algoritmos da literatura	18
4.1	Áreas de cobertura de um nó sensor	21
4.2	Algoritmo para retornar a área de cobertura	22
4.3	Ilustração do algoritmo que calcula a direção a ser seguida	23
4.4	Ilustração do algoritmo realizado dentro da área de RSSI significativo. . . .	24
4.5	Resultados obtidos nas simulações realizadas	26
5.1	Gráfico da média e desvio padrão da distância	31
5.2	Exemplos de valores a serem adicionados na grade	32
5.3	Exemplo de grade após o robô sair da área de cobertura do nó.	33
5.4	Resultado de uma instância apresentando a grade final	35
5.5	Considerações dos resultados obtidos utilizando a grade de probabilidade. .	36
5.6	Comparação entre os resultados obtidos nos dois algoritmos.	37

Lista de Tabelas

5.1	Comparação entre os valores de desvio padrão para alguns pontos dos dois algoritmos.	38
-----	--	----

Sumário

Agradecimentos	ix
Resumo	xi
Abstract	xiii
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Visão Geral	1
1.2 Motivação	4
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivos Específicos	5
1.4 Contribuições	5
1.5 Organização da Dissertação	5
2 Fundamentação Teórica e Trabalhos Relacionados	7
2.1 Redes de Sensores Sem Fio	7
2.2 Robótica Móvel	7
2.3 Redes de Sensores Sem Fio e Robótica Móvel	8
2.4 Localização e Navegação Robótica em RSSF Baseadas no RSSI	8
2.5 Considerações Finais	11
3 Caracterização do RSSI	13
3.1 Visão Geral	13
3.2 Caracterização	13
3.3 Adequação do Modelo de Propagação no Simulador	16
3.4 Simulações Preliminares	17

3.5	Considerações Finais	19
4	Algoritmo de Navegação Baseado em Detecção de Borda	21
4.1	Navegação na Área de RSSI Constante	22
4.2	Navegação na Área de RSSI Significativo	24
4.3	Avaliações	25
4.4	Metodologia	25
4.5	Resultados	26
4.6	Considerações Finais	27
5	Algoritmo de Navegação Utilizando Grade Probabilística	29
5.1	Visão Geral	29
5.2	Construção da Grade	30
5.2.1	Cálculo de Probabilidade	30
5.2.2	Determinação da Célula Alvo	32
5.3	Resultados e Avaliações	34
5.4	Comparação Entre Algoritmos	37
5.5	Considerações Finais	38
6	Considerações Finais	41
6.1	Conclusões	41
6.2	Trabalhos Futuros	42
6.3	Artigos Publicados	43
	Referências Bibliográficas	45

Capítulo 1

Introdução

1.1 Visão Geral

Presenciamos, na última década, o avanço das tecnologias móveis, é possível notar tal avanço ao vermos a popularidade de celulares e *tablets*, por exemplo. No entanto, tecnologias móveis não englobam apenas celulares e *tablets*. Sistemas de automação e segurança residencial também são exemplos de tecnologias móveis, porém, menos usual. Tais tecnologias estão sendo popularizadas pela gama de tarefas e ferramentas disponíveis para diversos fins como entretenimento, institucional acadêmico, médico e etc. Alinhada à evolução das tecnologias móveis, os sistemas embarcados estão sendo popularizados por suas aplicações em diversas tecnologias emergentes, como a automação e sistemas de monitoramento. Sem o avanço de sistemas embarcados, a de tecnologias móveis estaria fadada a estagnar.

Sistemas embarcados são sistemas com para finalidades específicas, normalmente com restrição de processamento, memória e limitação de energia [Marwedel, 2011]. O último aspecto, costuma ser um dos pontos críticos nesses tipos de sistema [Simunic et al., 1999]. Atualmente, sistemas embarcados possuem uma grande importância para a evolução de aplicações tecnológicas em diversas áreas, seja ela no ambiente florestal [Raghunathan et al., 2005] ou na indústria [Stankovic, 1996]. Em geral, uma aplicação muito comum que faz uso de sistemas embarcados são os sistemas de monitoramento ambiental, industrial e outros.

Em aplicações de observação e preservação da biodiversidade [NOSS, 1990], o principal objetivo é ter uma solução que permita detectar um determinado evento. Um evento pode ser um incêndio, presença de animais ou invasão de um ambiente. Em geral, tais eventos são detectados por meio de sensores acoplados a sistemas computacionais (geralmente sistemas embarcados) que possuem capacidade de processar a

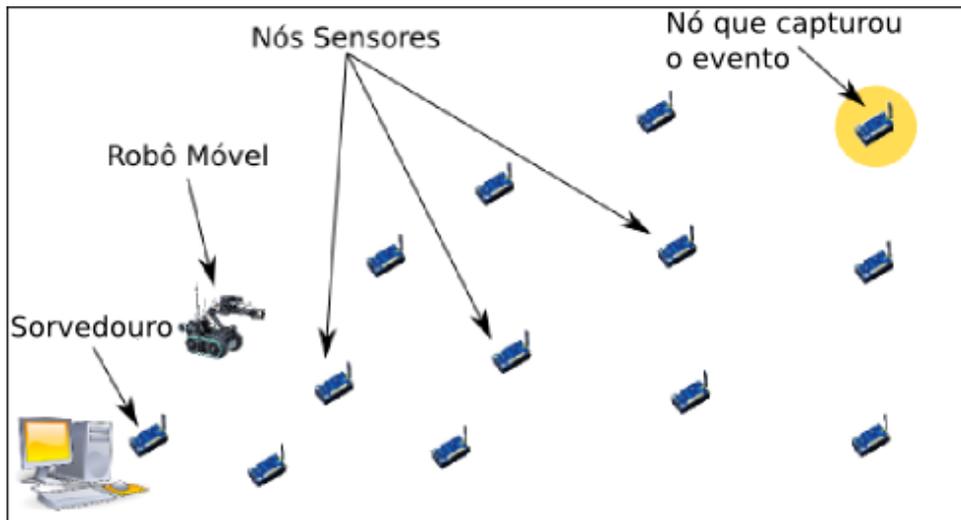


Figura 1.1. Ambiente monitorado por uma Rede de Sensores Sem Fio com a presença de um Robô Móvel.

informação capturada e identificar o evento.

A comunicação é um fator importante para sistemas de monitoramento, principalmente quando se deseja monitorar um ambiente remoto. Neste caso, é necessário que as informações adquiridas do meio sejam enviadas para serem analisadas ou tratadas. Utilizando-se de comunicação e sensoriamento, podemos monitorar grandes áreas como uma reserva florestal. Neste âmbito, Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) [Loureiro et al., 2003] podem ser utilizadas para monitorar ambientes remotos e de grandes áreas.

Redes de Sensores Sem Fio são compostas por centenas ou milhares de pequenos nós sensores com grande potencial para monitorar ambientes e vidas selvagens [Werner-Allen et al., 2005; Ribas et al., 2012; Colonna et al., 2012]. Tais nós sensores são caracterizados pelo seu baixo custo, eficiência de energia de seu *hardware* e sua programação destinada ao trabalho cooperativo a fim de detectar eventos de interesse.

O crescente estudo em RSSF em aplicações de monitoramento, se deve à sua característica técnica de comunicação e consumo de energia. Uma RSSF comunica-se de forma *ad hoc*, podendo-se ter uma grande área de cobertura e monitoramento. Outra característica técnica importante é o baixo consumo de energia dos nós sensores, podendo monitorar uma região por meses ou até anos sem que seja necessário substituir sua fonte de alimentação de energia. Para que um nó sensor possua baixo consumo de energia, deve-se evitar *hardwares* que possuam um elevado consumo de energia, como o GPS (*Global Positioning System*).

Em um cenário típico de monitoramento, eventos detectados podem ser investi-

gados por humanos. Porém, uma aplicação mais segura e menos intrusiva, seria enviar um robô móvel para o local no qual foi detectado um evento de interesse [Trincavelli et al., 2008]. A utilização de um robô proporcionaria uma melhor análise do evento, ou até mesmo atuação. No entanto, guiar um robô em uma RSSF não é uma tarefa trivial, uma vez que o robô pode não ter a localização geográfica exata do nó sensor emissor do evento, nem informações a respeito da direção a ser seguida. Dessa forma, é necessária a criação de técnicas e algoritmos que possam guiar um robô pela rede até que chegue ao evento a ser observado (figura 1.1).

A interação entre robôs móveis e RSSF é bem estudada no ambiente de pesquisa. Dentre as aplicações mais comuns estão a localização de nós sensores [Leonard & Durrant-Whyte, 1991; Patwari et al., 2005; Pathirana et al., 2005], o mapeamento de rede ou ambientes [Gutmann & Konolige, 1999; Lu & Milios, 1997; Gutmann & Konolige, 1999] e mapeamento e localização em uma mesma aplicação [Leonard et al., 1999]. A principal questão para a navegação de um robô em uma RSSF é a informação que o mesmo irá utilizar para guiar sua navegação. Sabe-se que a utilização de GPS nos nós sensores não é indicada por questões de consumo de energia, assim como é inviável criar uma organização geográfica para dispor os nós sensores em um ambiente remoto e de difícil acesso. Uma solução seria utilizar dados de potência de sinal (RSSI - *Received signal strength indication*) como referência para a navegação do robô, já sendo alvo de pesquisas como em Sichitiu & Ramadurai [2003]; Zhu et al. [2009]; Pathirana et al. [2005]; Sun et al. [2010]; Liying et al. [2010]. Utilizando o RSSI como referência, podemos dispensar qualquer pré organização geográfica dos nós da rede, assim como a utilização de *hardwares* extras. No entanto, tal técnica requer uma um prévio estudo da propagação do sinal para conhecimento das características do rádio utilizado na comunicação.

Com a crescente necessidade de monitorar ambientes e eventos particulares e a possibilidade de utilizar um robô móvel para melhorar tal aplicação, apresentaremos um estudo e desenvolveremos novas técnicas para guiar um robô móvel por uma RSSF em busca da posição que um evento ocorreu (figura 1.1). Para isso, consideramos que um evento é detectado, emitido de um nó sensor para um sorvedouro e o robô pode utilizar os dados disponíveis nos pacotes de dados trocados pelos nós para encontrar o evento. Os dados importantes para a navegação do robô são as informações do valor do RSSI, o nó sensor dono do pacote (emissor do evento) e do último salto deste pacote. Assumindo que o robô possui acesso aos pacotes trocados entre nós da rede, o mesmo pode chegar a um determinado evento utilizando apenas dados já provenientes de quaisquer aplicação de RSSF, sem necessidade de *hardware* ou soluções complexas de localização.

1.2 Motivação

Uma RSSF provê todo o artefato necessário para monitorar um ambiente. Por sua característica de comunicação, pode-se ter uma grande área de monitoramento. Outra característica importante é que não há restrição a respeito do tipo de ambiente a ser monitorado, podendo ser uma aplicação ambiental, industrial ou residencial. Existem aplicações de monitoramento de habitat [Mainwaring et al., 2002], erupções vulcânicas [Werner-Allen et al., 2005] e de biodiversidade [NOSS, 1990]. Independente do ambiente de aplicação, uma questão em comum entre todas elas é que todas estão configuradas para observar um evento em particular. A interferência humana não é descartada em algumas aplicações. No entanto, costuma ser inviável quando em ambientes de difícil acesso ou que ofereça riscos à integridade humana.

Em geral, RSSFs instaladas em áreas remotas não possuem uma organização predefinida. Uma RSSF pode ser instalada distribuindo aleatoriamente os nós sensores, o que impede o conhecimento de suas localizações *a priori*. Outra característica importante para uma RSSF em um ambiente remoto é que os nós sensores devem ser econômicos no ponto de vista energético. Essa característica é importante para o longo período de funcionamento esperado ao monitorar um ambiente remoto.

Observando os dois problemas citados anteriormente (ambiente remoto e de risco; nós sensores distribuídos aleatoriamente e sem GPS), propomos o desenvolvimento de um algoritmo de navegação para guiar um robô até um nó sensor que emite um determinado evento. O robô deverá ser capaz de capturar pacotes trocados entre os nós sensores e obter informações que o levem até o evento.

Encontramos na literatura algumas técnicas utilizadas para guiar um robô até um determinado nó sensor. Tais técnicas variam desde uma organização geográfica e mapeamento da rede [Corke et al., 2003] até a utilização do RSSI como referência [Sun et al., 2010]. Queremos utilizar o RSSI, assim como feito por Sun et al. [2010]. Porém, utilizando dados que representem um modelo de propagação real obtidos por experimentos, uma vez que o trabalho de Sun, considera um ambiente no qual não há variações de intensidade de sinal e seu decaimento é ideal. No entanto, Figueiredo et al. [2009] demonstrou por meio de experimentos práticos que a utilização de tais técnicas não refletem a realidade. Assim, há necessidade de contribuir com soluções que levem em conta o cenário encontrado na prática, sendo este o alvo de estudo desta dissertação.

Levando em consideração que utilizaremos simuladores para a validação de nossas técnicas, precisamos de parâmetros para criar modelos mais próximos da realidade. o trabalho contempla experimentos em um ambiente real para caracterizarmos seu

modelo de propagação e representado em um simulador de rede.

1.3 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é desenvolver soluções de navegação robótica em RSSF baseada no RSSI, que considerem o modelo de propagação de sinal na floresta Amazônica obtido por meio de experimentos.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Caracterizar o modelo de propagação em uma floresta Amazônica (mata fechada);
- Representar o modelo de propagação real, obtido por experimentos, em mata fechada no NS-2 (*Network Simulator*) Fall & Varadhan [2010];
- Desenvolver um algoritmo de navegação baseado em detecção de borda de propagação de sinal de um nó;
- Desenvolver um algoritmo de navegação para um nó móvel utilizando uma grade de probabilidade;
- Gerar dados comparativos entre as duas soluções desenvolvidas.

1.4 Contribuições

A principal contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de duas técnicas para guiar um robô em uma RSSF em busca de um evento, considerando modelos de propagação obtidos de experimentos. Cada técnica possui sua aplicabilidade e ambas apresentaram resultados consideráveis. As soluções são:

- Algoritmo de detecção de borda de propagação de sinal de um nó; e
- Algoritmo baseado em grades de probabilidade para robôs com maior capacidade de armazenamento e processamento;

1.5 Organização da Dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. No capítulo 2, abordamos alguns conceitos a respeito de RSSF, Robôs Móveis e Navegação Robótica. Complementando o

capítulo, discutimos trabalhos relacionados a navegação robótica e RSSF da literatura. Apresentaremos cada um destes trabalhos, assim como sua análise em relação a nossa solução.

No capítulo 3 apresentamos os experimentos feitos na floresta Amazônica a fim de detectarmos o modelo de propagação do sinal e posteriormente representá-lo em um ambiente de simulação para os testes de nossas soluções propostas. Apresentamos também neste capítulo um estudo a respeito das soluções disponíveis na literatura e os resultados de simulação para avaliar o impacto nessas soluções, utilizando uma representação do ambiente real em um simulador.

Apresentamos no capítulo 4 um algoritmo de navegação robótica baseado no RSSI para guiar um robô até um determinado nó alvo. Tal algoritmo baseia-se na detecção de bordas da propagação do sinal e utiliza um modelo de propagação obtido por meio de experimentos descritos no capítulo 3.

No capítulo 5 apresentamos um algoritmo de navegação para um robô chegar a um determinado evento utilizando o RSSI capturado e uma grade de probabilidade baseada nos valores do RSSI obtidos. No mesmo capítulo fazemos um comparativo entre esse algoritmo e o algoritmo baseado em detecção de borda.

Por fim, no capítulo 6 fazemos um balanço geral do impacto do modelo de propagação observado nos experimentos e sua influência para os dois algoritmos apresentados ao longo desta dissertação. São apresentadas, também, futuras propostas de pesquisa baseadas no problema de navegação robótica baseada no RSSI utilizando um modelo real.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica e Trabalhos Relacionados

2.1 Redes de Sensores Sem Fio

Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) consistem de nós sensores com baixo custo, baixo consumo de energia, sensores multi-funcionais e poder de processamento e componentes de comunicação [Akyildiz et al., 2002]. Normalmente são usadas em larga escala em áreas remotas, funcionando autonomamente e por longos períodos de tempo. Um dos grandes desafios em RSSF é manter baixo consumo de energia e o custo de fabricação do nós sensores. Dessa forma, existem aplicações que empregam o uso de sensores simples que auxiliam na observação de eventos [Arampatzis et al., 2005], a maioria deles a respeito de monitoramento de algum ambiente [Mainwaring et al., 2002].

Uma RSSF tende a ser autônoma, para isso, requer um alto grau de cooperação dos nós sensores para executar as tarefas definidas para a missão.

2.2 Robótica Móvel

Robôs móveis diferem de robôs convencionais pois podem mover-se em algum ambiente, considerando condições climáticas e geográficas dinâmicas. Robôs móveis têm a capacidade de sensorar, monitorar e atuar em um ambiente [Siegwart & Nourbakhsh, 2004]. Dessa forma, eles podem ser usados em aplicações de monitoramento em conjunto com RSSF, principalmente em ambientes inacessíveis a humanos.

2.3 Redes de Sensores Sem Fio e Robótica Móvel

A interação entre RSSF e robôs móveis, é retratada em trabalhos da literatura, um desses trabalhos trata da manutenção de cobertura da rede. O trabalho descrito por Batalin & Sukhatme [2002] descreve um robô móvel usado para auxiliar na cobertura de uma RSSF buscando áreas ainda não cobertas na rede, proporcionando um monitoramento mais amplo. Robôs móveis também são utilizados no trabalho feito por Kantor et al. [2003], no qual sensores coletam a valor da temperatura, criando um gradiente da mesma de modo que, a partir deste gradiente, o robô móvel possa auxiliar pessoas a encontrarem uma saída segura em caso de incêndios. Em ambos os trabalhos descritos [Batalin & Sukhatme, 2002; Kantor et al., 2003], robôs móveis são usados para auxiliar RSSF em tarefas de monitoramento. A navegação robótica também é um problema a ser considerado em aplicações de monitoramento em RSSF. Alguns trabalhos na literatura tratam deste problema. No trabalho de Jiang et al. [2008] um robô móvel foi equipado com duas antenas, uma antena omni-direcional e outra antena direcional rotativa. O sinal é recebido pelo robô e o mesmo rotaciona a antena para detectar o caminho a ser seguido pelo robô, repetindo o passo até chegar no local desejado.

Como podemos observar, robôs móveis são bastante utilizados em aplicações de RSSF. No entanto, iremos focar em aplicações referentes a algoritmos e técnicas de navegação robótica utilizadas para localização de eventos ou nós sensores.

2.4 Localização e Navegação Robótica em RSSF Baseadas no RSSI

A localização de nós em uma RSSF recém criada e não mapeada é uma tarefa difícil de ser feita, uma vez que muitos nós não dispõem de sensores que possam fornecer sua localização geográfica. No entanto, localizar um nó sensor em uma RSSF é de crucial importância para aplicações de monitoramento.

Alguns trabalhos na literatura abordam este problema utilizando robôs móveis para localizar algum nó sensor alvo. O problema de localização nem sempre trata de determinar a posição geográfica exata de um nó, mas sim de um robô móvel poder localizar esse nó na rede, muitas vezes sem informações prévias. A pesquisa feita por Sichitiu & Ramadurai [2003] utiliza um nó móvel com capacidade de saber sua posição para auxiliar nós sensores a estimarem suas posições. O nó móvel comunica-se com a rede enviando pacotes e, de acordo com que os nós sensores recebem os pacotes utilizam a localização do nó móvel, obtida por meio de um sensor GPS, e o RSSI

(*Received Signal Strength Indicator*) para estimarem suas posições.

Utilizar o RSSI para estimar a direção ou posição de um nó também é o tema abordado por Zhu et al. [2009]. No entanto, o autor espera por um conjunto de valores de RSSI para aplicar o cálculo de localização. O algoritmo possui três passos. O primeiro passo é definir um ponto de partida e um ponto fora da área de cobertura. Dessa forma, o robô navega de um ponto ao outro com uma velocidade constante enviando dados de sua localização para os nós da rede. O segundo passo é utilizado para os nós sensores estimarem suas localizações. O último passo é utilizado pelos nós sensores que não conseguiram estimar sua localização. Tais nós utilizam as informações de localização obtidas por seus vizinhos.

Alguns trabalhos tratam da localização em redes tolerantes a atrasos (*Delay-Tolerant Sensor Network - DTN*), como é apresentado por Pathirana et al. [2005]. Os autores utilizam um grupo de nós móveis para coletar dados da rede que formam um *cluster*, que é uma rede formada por nós que podem ser mutualmente desconectados. A fim de eliminar as restrições de processamento de nós sensores estáticas e à necessidade de nós estáticos de referência, os autores utilizaram Filtro de Kalman Robusto [Einicke & White, 1999] para a estimar a localização dos sensores da rede. Em aplicações práticas, a localização de um nó em uma RSSF pode ser usada para solucionar o problema em Sistemas Inteligentes de Transportes (ITS). No estudo realizado por Xu et al. [2010] utiliza o algoritmo de localização de Monte Carlo (MCB), onde os nós sensores agem como parte do ITS. O algoritmo foi chamado como MCB genérico e obteve resultados satisfatórios.

Apesar da navegação robótica auxiliar em aplicações de localização, nosso principal objetivo não determinar a localização geográfica de um nó sensor em uma RSSF. O principal objetivo deste trabalho é utilizar dados de RSSI coletados da rede para chegar até um determinado nó ou evento sem que seja necessário determinar a disposição geográfica dos nós na rede. Desta forma, não precisamos da localização deste nó na rede, precisamos apenas chegar até o nó para a análise ou atuação de eventos. Abaixo apresentamos trabalhos de literatura que utilizam o RSSI para guiar um robô em uma RSSF, independente da aplicação.

Um trabalho que trata de tal navegação é descrito em Corke et al. [2003]. Nesse trabalho, o objetivo é guiar um robô que sobrevoa uma rede de sensores. Esse trabalho considera o uso do GPS e da disposição geográfica dos nós sensores como uma grade regular, na qual cada nó ocupava uma linha e uma coluna nessa grade. O primeiro aspecto traz um custo mais elevado para a solução, e este último aspecto é difícil de obter em aplicações nas quais a RSSF é instalada de forma aleatória, sem uma organização definida, e em ambientes de difícil acesso.

Batalin & Sukhatme [2003] utiliza um mapa de localização em um robô móvel que atua como um nó móvel com capacidade de comunicar-se com os nós sensores da RSSF. Os autores descrevem um algoritmo desenvolvido para um nó móvel que considera os dados de sinal de rádio para decidir qual nó encontra-se mais próximo do nó móvel. O primeiro passo do algoritmo apresentado é uma planificação no momento em que o objetivo é especificado. Este planejamento é feito usando uma probabilidade discreta. A segunda fase é a navegação, na qual o nó móvel desloca-se pelo caminho criado seguindo cada nó por vez.

Considerando que o RSSI possui ruídos em ambientes reais, algumas aplicações utilizam filtros de modo a suavizar tais variações. O estudo feito por Zhang & Chen [2011] apresenta um esquema de navegação e localização baseado no RSSI e no Filtro de Kalman em ambiente fechado, no qual ele apresenta uma melhora do tempo de navegação em relação a utilização do filtro de Kalman e sem o filtro.

Além de filtro de Kalman, outros filtros são utilizados para uma melhor estimativa de RSSI. Liying et al. [2010] apresentam um algoritmo para estimar a distância entre dois nós utilizando o RSSI. Assim como qualquer experimento para a detecção da relação entre o RSSI e a distância entre o nó, este trabalho também detectou um grande variação, o que torna a navegação baseada nesta informação mais complexa. O filtro utilizado é o Algoritmo Metropolis-Hastings (MH) [Chib & Greenberg, 1995]. Os resultados apresentam uma melhora em relação ao valor a ser estimado com e sem filtro, assim como em Zhang & Chen [2011].

A utilização do RSSI para guiar a navegação de um robô é proposta por Sun et al. [2010]. O trabalho apresenta um algoritmo que guia um robô até um determinado nó utilizando o RSSI. No entanto, os autores consideram um ambiente ideal para criar seu algoritmo, isto é, as simulações obedecem um ambiente de propagação de sinal sem ruído. O robô móvel navega até detectar uma variação do RSSI, e continua a navegar até que ele detecta uma diminuição na intensidade do sinal. Quando a intensidade do sinal diminui, o robô móvel calcula um ângulo de rotação para corrigir o caminho para o nó de destino, repetindo tais etapas até localizar o nó destino.

O problema da utilização do RSSI nos trabalhos citados anteriormente, é que todos utilizam um modelo de propagação sem ruído, o que permite a tomada de decisão quando ocorre o crescimento ou decrescimento do valor do RSSI ao longo da navegação. No entanto, trabalhos como o de Figueiredo et al. [2009] nos mostram que é preciso realizar experimentos para a detecção do modelo de propagação de sinal de acordo com o ambiente. Sendo assim, um algoritmo de navegação baseado no RSSI deve levar em consideração o ambiente ao qual o robô e a rede serão submetidos, pois as características do meio podem influenciar no funcionamento deste algoritmo.

2.5 Considerações Finais

Podemos observar que uma grande parte dos problemas relacionados a navegação robótica em RSSF são para o auxílio da localização de nós. Tais técnicas auxiliam em aplicações de monitoramento e mapeamento de redes. Outros trabalhos utilizam robôs móveis em RSSF para localizar eventos, sem preocupar-se com a posição geográfica nem com organização da rede. Tais trabalhos são alvos de nossos estudos para o desenvolvimento de nossos algoritmos.

A utilização do RSSI para auxiliar na navegação robótica em RSSF é conhecida na literatura. No entanto, trabalhos da literatura demonstram que é necessário um estudo prévio do RSSI para o desenvolvimento de soluções baseados nesses valores.

Capítulo 3

Caracterização do RSSI

3.1 Visão Geral

Em uma RSSF, nós sensores coletam dados e os transmitem até um determinado nó, normalmente conhecido como o nó sorvedouro. Modelos de propagação de sinal mostram que existe uma relação entre a distância do transmissor e do receptor e a intensidade de sinal [Rappaport, 2001]. Um indicativo para podermos identificar se a distância está aumentando ou diminuindo em relação ao emissor, é o valor fornecido pelo RSSI. Desta forma, um robô móvel pode utilizar este princípio para guiar sua navegação na rede até um nó sensor que emite um sinal de interesse (quando detecta-se o evento esperado). O princípio básico deste algoritmo é explorar uma área de interesse medindo o RSSI e navegando na direção na qual o sinal estiver mais forte até que se chegue ao nó desejado.

No entanto, experimentos feitos por Diaz et al. [2010] e Figueiredo et al. [2009] mostram que a estimação de distância baseada no RSSI é imprecisa e fortemente dependente do ambiente ao qual está submetido. Isto requer que um algoritmo de navegação baseado no RSSI leve em conta tais peculiaridades.

Diante do exposto, apresentaremos neste capítulo os passos realizados para a caracterização de propagação de sinal na floresta Amazônica, bem como para adequação do simulador para melhor representar o cenário real.

3.2 Caracterização

Descreveremos abaixo, experimentos realizados com o objetivo de caracterizar o modelo de propagação de modo que possamos representá-lo em um simulador. Escolhemos um

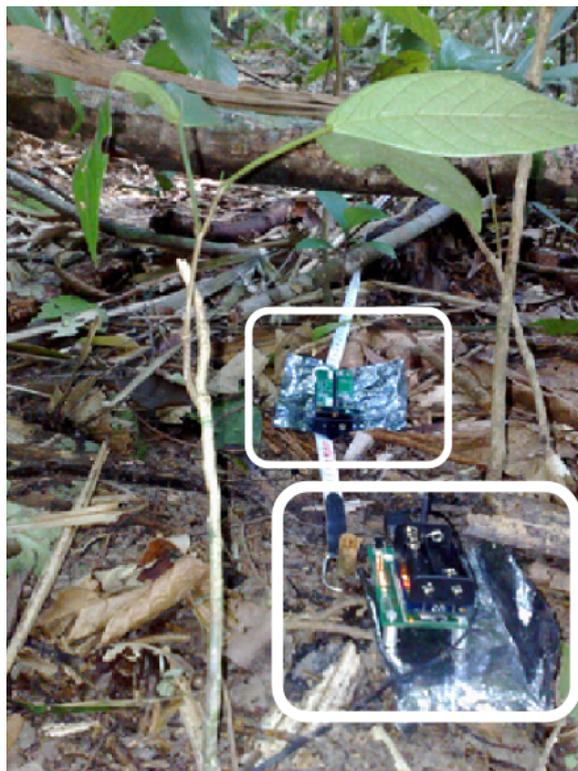


Figura 3.1. Experimento na floresta Amazônica utilizando dois nós sensores Iris [Crossbow, 2009].

ambiente de floresta Amazônica pois, posteriormente, tais dados podem auxiliar em aplicações de monitoramento para a preservação e estudos ecológicos.

Utilizamos nós sensores da plataforma Iris [Crossbow, 2009] para a realização de nosso experimento. Afim de obtermos as informações necessárias do decaimento do RSSI, colocamos um transmissor e um receptor no chão (figura 3.1). Aumentamos, gradativamente, a distância dentre o transmissor e o receptor. Para cada distância, foram feitos 33 tomadas de medidas, em cada tomada de medida o nó transmissor enviava 20 pacotes, totalizando 660 pacotes com dados de RSSI para cada distância.

Com os dados de RSSI coletados para cada distância, foi calculada a média e o desvio padrão deste RSSI para cada distância (figura 3.2). Podemos observar que existe uma grande região na qual o valor do RSSI é constante

Como o valor mínimo do RSSI indicado pelo dispositivo de comunicação é -94 dBm, o perfil da curva é plana onde os pacotes são transmitidos com sucesso, porém, o RSSI real está abaixo deste limiar. Chamamos esta área de RSSI constante, que começa aproximadamente a uma distância de 4,5 m. Abaixo desta distância é onde pode-se detectar uma variação do RSSI. Nesta área, o RSSI varia sempre acima do valor mínimo e pode ser utilizado efetivamente para fins de navegação baseada no gradiente.

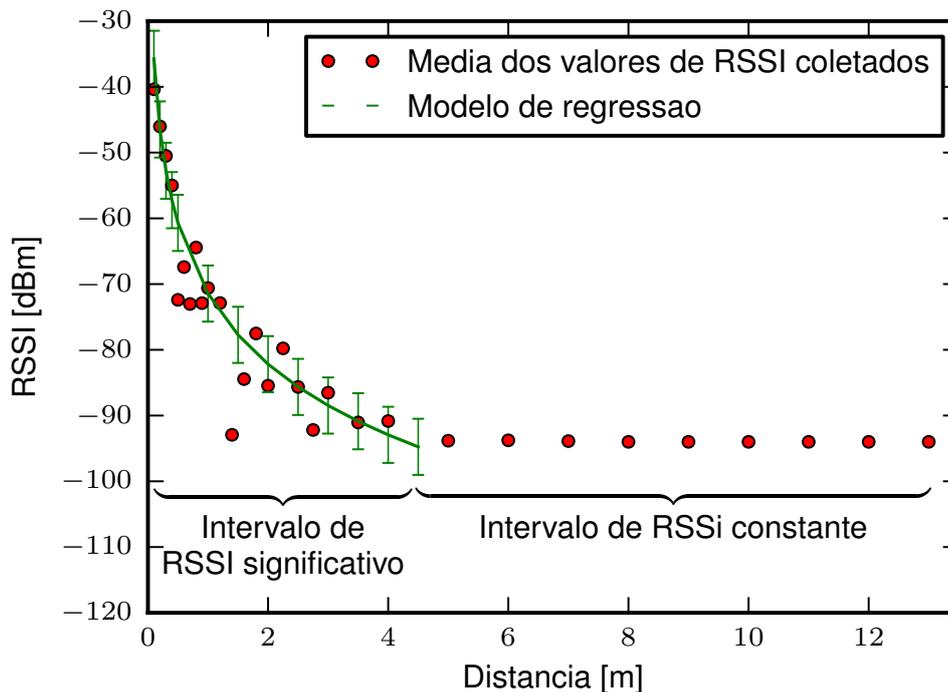


Figura 3.2. Média dos valores RSSI para cada distância tomada entre os nós sensores (pontos vermelhos) e o modelo de regressão proposto (curva com intervalos de confiança). A comunicação entre os dispositivos reporta um mínimo de -94 dBm. Como consequência, este valor é insuficiente para estimar a distância entre dois nós sensores quando estão a mais do que 4,5 m de distância.

Chamamos esta área de RSSI significativo.

Quando consideramos a aproximação circular de área de cobertura de um nó sensor, a área de RSSI constante é aproximadamente 92,7% de toda área de cobertura do nó. Isto implica diretamente no desenvolvimento do algoritmo, pois qualquer solução de navegação baseada no RSSI deve levar em consideração esse dado significativo. Na verdade, quando um robô móvel navega na região de RSSI constante, os níveis de RSSI observados não fornecem qualquer informação útil para guiar o robô para o nó destino. A estratégia é sempre buscar a área de RSSI significativo, área na qual é possível observar uma variação no RSSI. No entanto, é possível que o robô saia da área de cobertura. Neste caso a estratégia é retornar para a área de cobertura e obter informações da borda para estimar a direção do nó.

As soluções propostas na literatura para navegação de um robô baseada no RSSI, aguardam alguma alteração nesse dado para que outras definições de direção sejam tomadas, cada uma com suas estratégias, variando de acordo com a aplicação. Para as aplicações apresentadas na literatura, existem dois problemas. O primeiro é que se o robô navega na área de RSSI constante, não consegue detectar a diminuição

da intensidade do sinal e, pode navegar na direção errada até perder o sinal. Não encontramos na literatura uma solução que considere o evento de perda de sinal. Em segundo lugar, mesmo que o robô possa encontrar a área de RSSI significativo, existem variações no RSSI a serem consideradas (ruído) e, dependendo da estratégia utilizada, apenas a utilização de um pacote para a tomada de decisão pode levar o robô a um direção errada.

3.3 Adequação do Modelo de Propagação no Simulador

Um modelo de propagação é utilizado para estimar a potência do sinal entre um dispositivo emissor e outro dispositivo receptor deste sinal. A intensidade é uma estimativa do quão perto ou quão longe encontra-se o emissor do receptor do sinal. Existem vários modelos matemáticos que representam as características de propagação do sinal como o *Two-Ray Ground* (baseia-se na reflexão das ondas eletromagnéticas) e o modelo *Shadowing* (utilizado quando existe obstáculos e considera uma perda ou ganho de qualidade do sinal recebido), apresentados em Rappaport [2001].

Utilizaremos os modelos *Shadowing* e o *Free Space* para representar no simulador NS-2 o modelo detectado por meio do experimento descrito neste capítulo. Ambos os modelos consideram que a redução da atenuação de potência do sinal (*Path Loss*) é proporcional a distância entre emissor e receptor. Dessa forma, a potência do sinal tende a cair de acordo com quem a distância entre emissor e receptor de sinal aumenta.

O modelo para calcular o *Path Loss* ($PL(d)$) é a seguinte:

$$PL(d) \propto d^N, \quad (3.1)$$

na qual d é a distância entre emissor e receptor e N é o expoente que indica a taxa de decaimento para essa distância.

No entanto, o *Path Loss* não é suficiente para nosso objetivo. Como já comentando anteriormente, utilizaremos o RSSI como referência de navegação para nosso robô. Dessa maneira, o modelo *Free Space* nos permite obter o valor do RSSI em dBm por meio da equação:

$$P_r(d) = P_0 - 20 \log(d) + 27.56, \quad (3.2)$$

na qual P_0 é a potência de sinal quando a distância é zero, f é a frequência em MHz e d é a distância em metros entre o emissor e receptor.

No entanto, de acordo com Rappaport [2001], o modelo *Free Space* nos fornece a potência de sinal como uma esfera perfeita. No entanto, sabe-se que existe uma taxa de erro em relação à distância. Nesta problemática, o modelo *Shadowing* nos permite estimar a potência do sinal considerando tais erros para uma distância d utilizando as equações:

$$P_r(d) = P_t - PL(d), \quad (3.3)$$

que é a equação para estimar a potência de sinal recebido, na qual d é a distância, P_t é a potência de sinal em dBm e PL é obtido por meio da equação 3.1.

A segunda equação nos fornece a variação de potência do sinal a uma distância d e é expressa pela equação

$$PL(d) = \overline{PL}(d_0) + 10N \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma, \quad (3.4)$$

onde d_0 é a referência mais próxima que se tem. $\overline{PL}(d_0)$ é a média de decaimento do sinal para a distância d_0 . N é o expoente que indica o decaimento de potência de acordo com a distância. X_σ é uma distribuição Gaussiana de acordo com o desvio padrão σ .

Dessa maneira, a potência de sinal é obtida por meio da equação

$$P_r(d) = P_0 - 10N \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (3.5)$$

e P_0 é calculado pela equação

$$P_0 = P_t - \overline{PL}(d_0). \quad (3.6)$$

Para a adaptação de tal modelo no NS-2, foi preciso replicar os cálculos descritos acima, estabelecendo um valor para P_0 e σ com base nos experimentos descritos na Seção 3.2. Dessa maneira, o sinal será propagando com as características, inclusive a área de RSSI constante e variação na distância de perda de sinal, obtidas no experimento.

3.4 Simulações Preliminares

Antes de iniciarmos o desenvolvimento de nosso algoritmo, iremos avaliar o impacto do modelo de propagação detectado em nossos experimentos, utilizando as soluções disponíveis na literatura. Em primeiro lugar, o modelo de propagação para o experimento

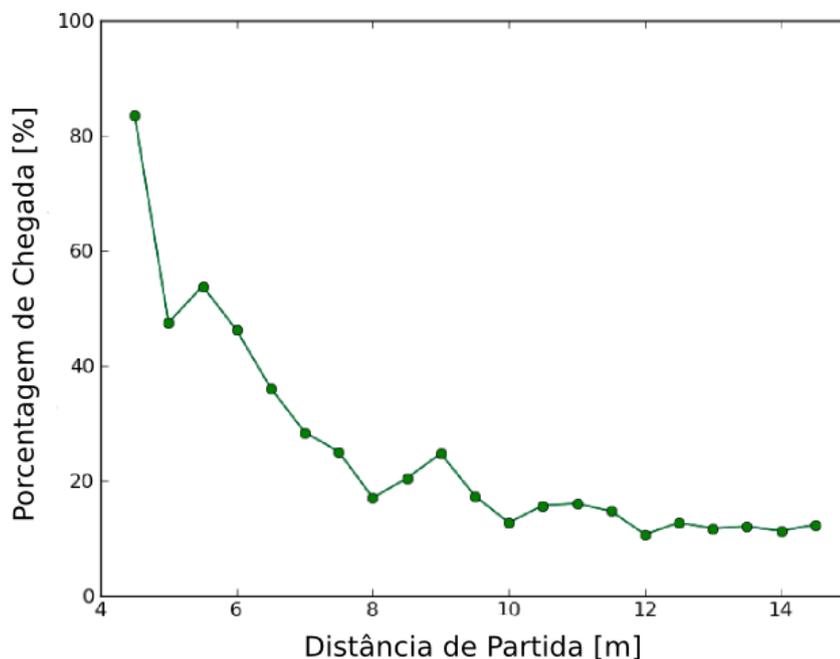


Figura 3.3. Simulação preliminar representando o percentual de detecção de variação do RSSI para os algoritmos disponíveis na literatura.

foi reproduzido para o simulador NS-2 (*Network Simulator*) [Fall & Varadhan, 2010].

Como descrito anteriormente, o experimento nos mostra que existem duas áreas a serem consideradas para um algoritmo de navegação que utilize o RSSI como referência. Por outro lado, os algoritmos convencionais disponíveis na literatura, consideram que o modelo de propagação é uma curva ideal, não considerando toda a área na qual o RSSI permanece constante.

Os algoritmos da literatura [Sun et al., 2010; Al Alawi, 2011; Zhang & Chen, 2011] esperam por um crescimento ou decrescimento do RSSI para saber se a direção na qual o robô está é a correta ou errada. Desta maneira, várias técnicas dependem dessa variação para seus algoritmos funcionarem.

A fim de analisarmos o impacto do modelo de propagação representado por nosso experimento nos algoritmos da literatura, criamos o seguinte ambiente de simulação: o robô móvel inicia a navegação na área com o RSSI constante e parte em uma direção aleatória com uma determinada distância em relação ao nó sensor destino. Para cada distância, foram feitos 300 simulações com diferentes direções de partida. O objetivo é analisar o percentual de chance desse robô detectar uma mudança no RSSI, determinante para o funcionamento do algoritmo.

Nenhuma solução considera que o robô perca o sinal, isto é, saia da área de

cobertura. Assim, a simulação descrita anteriormente possui dois casos de parada: o primeiro é quando detecta uma mudança de RSSI e a segunda é quando ele perde o sinal. Apresentamos na figura 3.3 o resultados desta simulação.

Pode-se observar na figura 3.3 que a distância entre o robô móvel e o nó alvo influencia no resultado desejado. Quanto maior é a distância entre ambos, menor é a chance do robô móvel detectar uma variação de RSSI. Isto ocorre porque o robô não tem referência de aproximação do alvo quando está na área de RSSI constante. Desta forma, é necessário um algoritmo que considere tais áreas, além da possibilidade do robô móvel perder a comunicação com o nó sensor e, mesmo assim, voltar para a área de cobertura e continuar sua navegação em busca do evento.

3.5 Considerações Finais

Observamos por meio dos experimentos realizados na floresta amazônica que o modelo de propagação detectado nos fornece um desafio para o desenvolvimento de um algoritmo de navegação baseado no RSSI. O desafio da criação de um algoritmo de navegação robótica baseado no RSSI deve-se ao fato de que em uma grande área de cobertura do sinal o RSSI permanece constante, não sendo possível estimar distância e nem direção quando o robô encontra-se nesta área.

Baseados nas informações obtidas nos experimentos, adaptamos tal modelo em um simulador [Fall & Varadhan, 2010] e fizemos simulações afim de avaliarmos o impacto da representação deste cenário nos trabalhos apresentados pela literatura. Avaliamos o percentual de vezes em que o robô detectou uma mudança no RSSI. As simulações mostraram que o impacto da representação deste modelo

Assim, para o desenvolvimento de nosso algoritmo, iremos considerar o modelo de propagação obtido nos experimentos, o que nos dá duas áreas a serem navegadas, uma na qual o RSSI é constante e outra na qual podemos estimar posicionamento e direção baseados no RSSI (RSSI significativo).

Capítulo 4

Algoritmo de Navegação Baseado em Detecção de Borda

Observando os resultados dos experimentos no capítulo 3, pode-se notar que existem duas áreas no gráfico da figura 3.1. A primeira área caracteriza-se pela não variação do valor do RSSI, o que impossibilita algoritmos que necessitam da variação do mesmo para tomar decisões de direção, assim como apresentado na seção 3.4. Na segunda área é possível observar um padrão de regressão (área de RSSI significativo), portanto é possível aplicarmos algoritmos e técnicas baseadas na variação do RSSI.

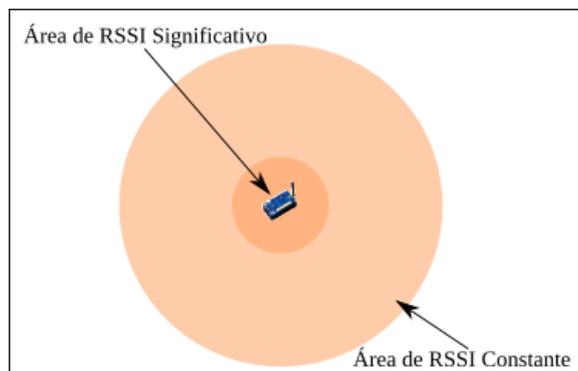


Figura 4.1. Áreas de cobertura de um nó sensor. Pode-se observar uma grande área na qual o RSSI é constante e um área menor na qual o RSSI é mais significativo.

O algoritmo proposto neste capítulo considera que existem tais áreas descritas anteriormente e representadas na figura 4.1. Considera, também, que o robô sempre parte de uma área com cobertura de sinal do nó alvo. Dessa maneira, existem duas possibilidades, de o nó encontrar-se na área de RSSI constante ou na área de RSSI significativo. O pior caso para este algoritmo é quando ele encontra-se na área de RSSI

constante, pois não é possível obter informações de direção do nó alvo sem que haja uma variação considerável do RSSI.

Dessa forma, o problema de se encontrar na área de RSSI constante é a impossibilidade de obter informações que direcionem o robô até o nó alvo. Porém, se o robô seguir em uma direção continuamente, duas ações podem ocorrer: a primeira é o robô encontrar a área de RSSI significativo, a outra é o robô perder a comunicação com o nó alvo, isto é, sair da área de cobertura.

Apresentaremos abaixo os detalhes do algoritmo de navegação robótica tanto na área de RSSI constante como na área de RSSI significativo.

4.1 Navegação na Área de RSSI Constante

Caso o robô esteja na área de RSSI constante, a estratégia para nosso algoritmo é o robô continuar navegando em uma mesma direção até que ele perca o sinal ou encontre a área de RSSI constante. Nesta seção apresentaremos os passos que o robô realizará em busca da área de RSSI significativo. Os passos para encontrar o nó alvo, estando na área de RSSI significativo, serão apresentados na Seção 4.2.

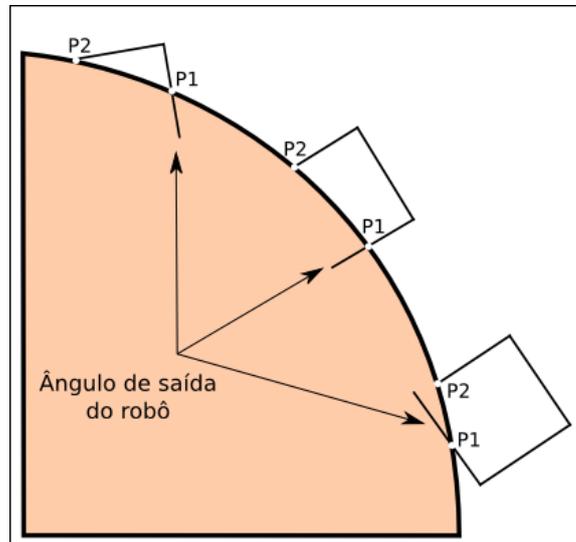


Figura 4.2. Algoritmo para retornar a área de cobertura, exemplificando casos em que são necessários dois, três e quatro passos.

Caso o robô perca o sinal, ele deve retornar para a área de cobertura e realizar um sequência de passos a fim de obter informações a respeito da borda de cobertura e, assim, estimar a direção da área de RSSI significativo. Essa sequência de passos tem por objetivo obter dois pontos na borda da área de cobertura do nó alvo.

No primeiro instante em que o robô detecta que perdeu o sinal do nó alvo, para isso ele aguarda um determinado tempo sem receber pacotes desse nó, o robô marca essa posição como ponto de saída P_1 e, em seguida inicia uma série de etapas (descritas abaixo) até encontrar outro ponto P_2 na borda da área de cobertura de sinal desse nó emissor (figura 4.2).

Simulações empíricas mostraram que para um robô retornar para a área de cobertura e obter informações suficientes para navegar em direção a área de RSSI significativo são necessários de dois a quatro passos. Apresentamos abaixo os quatro possíveis passos para esse algoritmo:

1. O robô navega D_1 metros e gira 90 graus para esquerda;
2. O robô navega D_1 metros e gira 90 graus para esquerda;
3. O robô navega D_2 metros e gira 90 graus para esquerda;
4. O robô navega até retornar para a área de cobertura.

É importante frisar que, para os passos acima, o robô pára de executá-los assim que detecta que retornou à área de cobertura. Portanto, o número de passos a serem realizados depende do ângulo em que o robô saiu da área de cobertura, como podemos ver na figura 4.2.

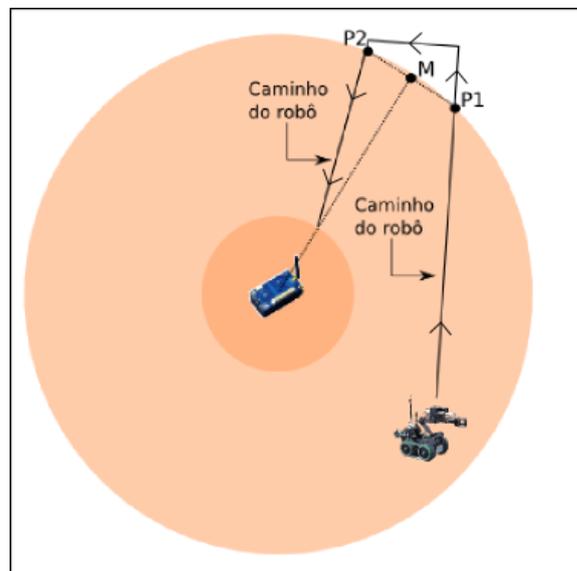


Figura 4.3. Ilustração do algoritmo que calcula a direção a ser seguida até encontrar a área de RSSI significativo.

Após retornar para a área de de cobertura, o robô deve utilizar as informações obtidas para encontrar a área de RSSI significativo. Sabemos que a área de cobertura

de um nó não é uma circunferência perfeita. No entanto, podemos estimar a direção da área de RSSI significativo utilizando conceitos de secante. A secante da área de cobertura com centro O é o segmento de reta definido pelo pontos P_1 e P_2 . De acordo com a lei das secantes, sendo M o ponto médio do segmento P_1P_2 , o segmento de reta definido pelo ponto médio M e o centro O é uma reta perpendicular ao segmento P_1P_2 (figura 4.3).

Após encontrar a reta definida pelos pontos M e O , o robô navega nessa direção até encontrar a área de RSSI significativo, iniciando assim a última parte de nosso algoritmo, que é, de fato, encontrar o nó alvo.

4.2 Navegação na Área de RSSI Significativo

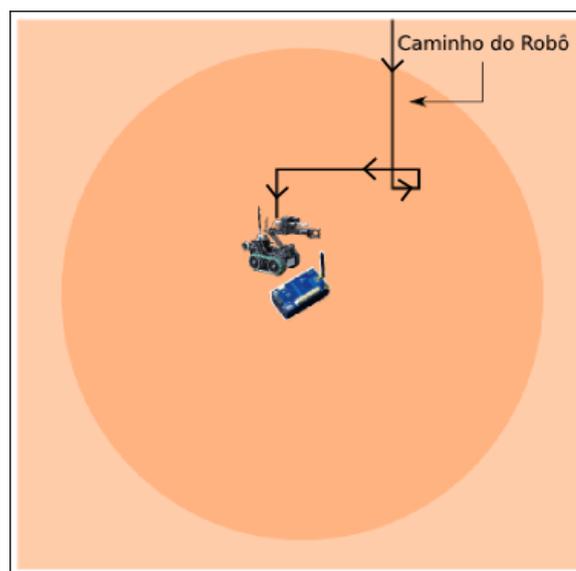


Figura 4.4. Ilustração do algoritmo realizado dentro da área de RSSI significativo.

No momento em que o robô adentra na área de RSSI significativo, ele continua a navegar na mesma direção enquanto o valor do RSSI for crescendo em relação as leituras feitas anteriormente. Toda vez que o robô detecta uma queda no valor do sinal, o robô gira 90 graus para a esquerda e continua a navegar nesta direção (figura 4.4). Isso faz com que o robô aproxime-se do nó alvo até que o encontre. Em alguns casos, o robô pode navegar para fora da área de RSSI significativo. Porém, ao deparar-se com esta situação, o robô gira 180 graus e retorna para a área de RSSI significativo e continua sua navegação.

No entanto, sabemos que o valor do RSSI não decresce ou cresce obedecendo uma curva perfeita, dessa maneira, podem existir leituras erradas e, aumentar a distância de navegação desse robô. De forma a solucionar tal problema e avaliar o impacto dessa variação de RSSI, a média do RSSI de vários pacotes pode dispor dados mais precisos para a tomada de decisão do robô. Dessa forma, apresentaremos na próxima seção, as simulações feitas para esse algoritmo.

4.3 Avaliações

Como métrica de validação e avaliação, o algoritmo será simulado no NS-2 [Fall & Varadhan, 2010] para várias instâncias, medindo a distância navegada até encontrar o alvo. Para podermos avaliar o impacto do número de pacotes recebidos para a tomada de decisão em relação à distância percorrida pelo robô, realizaremos três conjuntos de experimentos: para um, cinco e nove pacotes. Dessa maneira, o robô irá aguardar até receber o número de pacotes definidos para aquele cenário antes de efetuar uma nova navegação.

Para cada conjunto de experimentos, o robô parte de várias distâncias em relação ao nó alvo, sendo cada uma dessas distâncias em uma direção aleatória. Para cada distância de partida em relação ao nó alvo, foram feitas cem simulações.

O objetivo das simulações é que o robô encontre o nó alvo utilizando apenas dados de RSSI. É importante destacar que o modelo de propagação foi representado no NS-2 para a realização e avaliação do algoritmo.

4.4 Metodologia

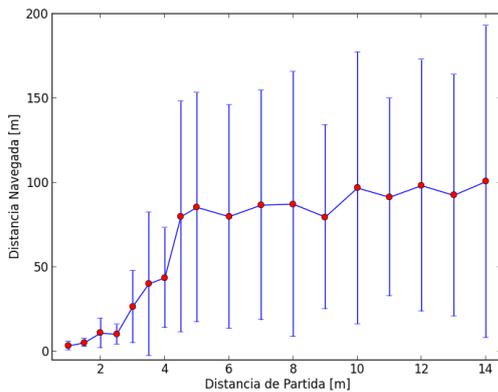
Utilizamos o simulador NS-2 [Fall & Varadhan, 2010] (versão 2.34) na distribuição Debian GNU/Linux com o kernel 2.6.32 para obter os resultados de nosso algoritmo.

Para esse algoritmo, o robô navega 50 cm e espera por um determinado número de pacotes (um, três ou cinco), em seguida efetua a média dos valores de RSSI lidos e faz a tomada de decisão. Para o cálculo do valor da distância percorrida foram feitas 100 simulações para cada cenário (distância e número de pacotes).

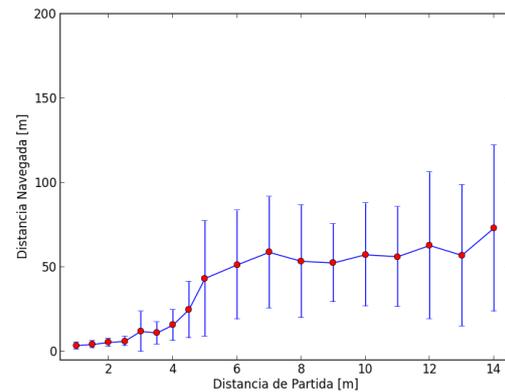
Dessa forma temos um valor médio de distância percorrida para um robô que parte à uma distância X , recebendo um número Y de pacotes.

4.5 Resultados

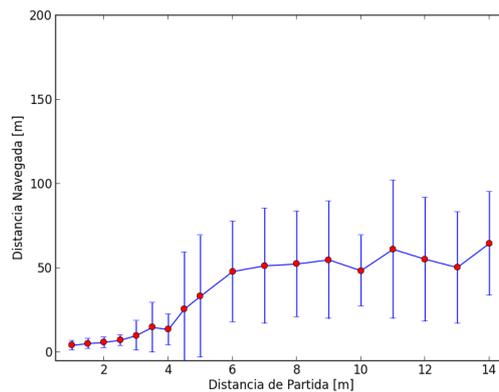
As figuras 4.5(a), 4.5(b) e 4.5(c) mostram os resultados obtidos nas simulações de acordo com o número de pacotes esperados antes da tomada de decisão.



(a) Utilização de um pacote antes da tomada de decisão.



(b) Utilização de cinco pacotes antes da tomada de decisão.



(c) Utilização de nove pacotes antes da tomada de decisão.

Figura 4.5. Resultados obtidos nas simulações realizadas. Cada gráfico corresponde a um número de pacotes utilizados antes da tomada de decisão do robô.

Analisando as figuras 4.5, verificamos que o número de pacotes influencia diretamente na distância navegada pelo robô até encontrar o nó alvo. Para um pacote, tanto a média quanto o desvio padrão são altos quando comparados a distância de partida. Notamos que há uma melhora para esses valores quando utiliza-se cinco e nove pacotes.

Quando utilizamos apenas um pacote para a tomada de decisão, o desvio padrão dentro da área de RSSI significativo é maior do que quando utilizamos cinco ou nove pacotes. Tal comportamento é verificado, também, na área da borda de cobertura do sinal. Com a utilização de um pacote, pode-se obter uma falsa borda e, fazer com que

o robô navegue em direção errada, sendo necessária outra detecção de borda.

Ainda analisando a figura 4.5, considera-se que cinco pacotes (figura 4.5(b)) é o suficiente para se obter um valor confiável do RSSI para a tomada de decisão, uma vez que as simulações com nove pacotes (figura 4.5(c)) obteve valores aproximados aos de cinco e seu tempo de espera por pacotes é maior.

Comparando os resultados obtidos em nossas simulações, o robô chegou ao seu destino em 100% dos testes, o que não acontece com os algoritmos da literatura quando submetidos ao mesmo modelo de propagação, no qual o percentual de chegada está inversamente relacionado à distância de partida (figura 3.3).

4.6 Considerações Finais

Notamos que a tarefa de desenvolver um algoritmo para a navegação em um RSSF não é uma tarefa trivial quando utiliza-se um modelo de propagação baseado em experimentos. A característica do modelo de propagação foi observada no capítulo 3 e oferece desafios quando se deseja navegar em busca do emissor desse sinal.

A forma de vencer o desafio de uma grande área de RSSI constante foi desenvolver um algoritmo que se baseia em bordas de propagação do sinal. Considerando que a área de propagação do sinal se assemelha à de uma circunferência, utilizamos técnicas de secante para estimar a direção da área de RSSI significativo quando o robô sai da área de cobertura do sinal.

Tal algoritmo obteve sucesso quando submetido a simulações representando o modelo real. No entanto, para um melhor resultado, é necessário que o robô obtenha um determinado número de pacotes de forma que obtenha um dado mais significativo e confiável. Dessa forma, observamos uma melhora na distância navegada quando comparamos o mesmo algoritmo em ação com um, cinco e nove pacotes.

Capítulo 5

Algoritmo de Navegação Utilizando Grade Probabilística

Apresentamos neste capítulo todas as etapas necessárias para o desenvolvimento do algoritmo de navegação para guiar um robô até um nó sensor utilizando grade de probabilidade. Assim como o algoritmo apresentado no capítulo 4, utiliza-se como referência o RSSI para a criação da grade.

5.1 Visão Geral

No método apresentado anteriormente, o robô aguardava por um número de pacotes, calculava a média do RSSI e, então, navegava até o próximo ponto. Dessa maneira, demandava-se um tempo à espera dos pacotes, resultando assim na impossibilidade do robô manter uma velocidade constante, sendo necessárias várias paradas ao longo de sua navegação. Quando se deseja eficiência de tempo, tal algoritmo pode não satisfazer aos anseios da aplicação, uma vez que a característica de calcular a média de RSSI influencia no tempo de navegação do robô até encontrar o evento.

Buscamos um algoritmo que possa utilizar os mesmos dados que o algoritmo anterior mas que possa realizar a tarefa com um melhor desempenho. A estratégia apresentada nesta seção utiliza os dados de RSSI coletados e alimenta uma grade com um modelo probabilístico a cada nova informação de RSSI coletada.

O modelo probabilístico foi obtido com os dados capturados no experimento descrito na Seção 3. Utilizou-se a distribuição normal [Myers, 1990] para representar a probabilidade da distância que se encontra o nó alvo de acordo com o RSSI obtido. Por não saber a informação de direção, o robô navega coletando dados de RSSI e adici-

onando a probabilidade para cada valor à grade de probabilidade e navega em direção ao ponto de maior probabilidade até que chegue ao nó alvo.

5.2 Construção da Grade

Grade de probabilidade é uma solução que já foi aplicada para a localização em RSSF, como descrito no trabalho de Stoleru & Stankovic [2004]. Queremos, no entanto, utilizar uma grade que possibilite ao robô encontrar um determinado evento em uma rede, sem ser necessário a localização do mesmo.

Uma grade em nosso algoritmo é representada por uma matriz quadrada de ordem M , na qual M células representam 32 m. Este valor foi utilizado levando em consideração o alcance máximo de transmissão de nó sensor em nosso cenário que foi de aproximadamente 14 m. A grade permanece do mesmo tamanho ao longo do algoritmo enquanto o robô muda sua posição e modifica a probabilidade da grade de acordo com que efetua leituras de RSSI.

Ao capturar a primeira informação de RSSI de um nó alvo, a grade é criada com o robô posicionado no centro da grade e é adicionada à grade a probabilidade referente ao valor do RSSI coletado. O valor e modelo de probabilidade adicionado será apresentado na Seção 5.2.1.

5.2.1 Cálculo de Probabilidade

Como dito anteriormente, para navegar na rede o robô utilizará uma grade de probabilidade preenchida de acordo com os dados de RSSI obtidos. Porém, para que possamos fazer esta representação, é necessário obtermos a distribuição probabilística de distância do nó sensor ao alvo para cada valor possível de RSSI.

Para que possamos obter uma representação probabilística do RSSI em relação a distância do nó alvo, calculamos a média e o desvio padrão da distância para cada valor de RSSI obtido no experimento. Geramos o gráfico representado na figura 5.1.

O gráfico mostra que na região de RSSI constante não é possível estimar com um intervalo de confiança relativamente pequeno a distância de nó alvo. Pode-se observar, também, que quanto menor o valor do RSSI, menor a variação da distância em relação a outros valores. Isso facilita a navegação do robô de acordo com a aproximação do nó alvo.

Em relação ao modelo de probabilidade a ser aplicado, observou-se que um distribuição normal pode ser aplicada de modo que o robô móvel possa atualizar a grade

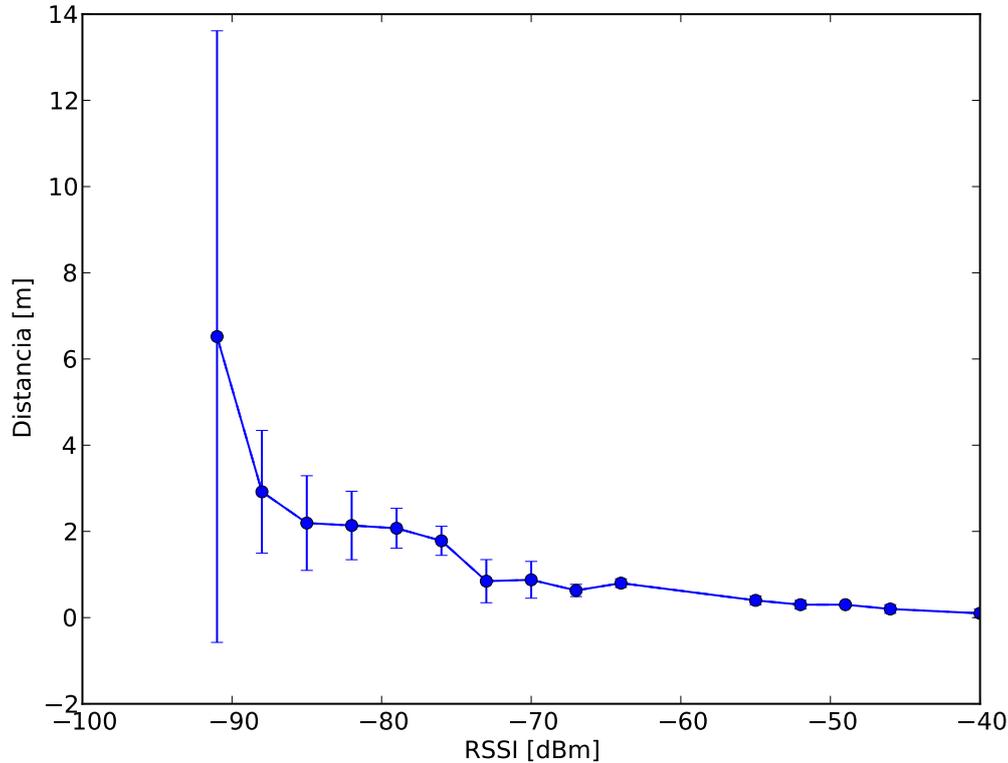


Figura 5.1. Gráfico da média e desvio padrão da distância entre o nó emissor e receptor. Tais dados foram extraídos do experimento descrito na Seção 3

de acordo com o RSSI coletado. A probabilidade a ser acrescida na grade obedece a fórmula da distribuição normal [Myers, 1990].

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (5.1)$$

A equação 5.1 fornece a probabilidade do nó sensor alvo estar a uma distância x , considerando o valor da média μ e do desvio padrão σ baseados no RSSI e obtidos por meio do gráfico representado na figura 5.1.

A cada valor de RSSI capturado, a distribuição é calculada de acordo com a equação 5.1, esse resultado é somado às células da grade. Dessa maneira a grade é atualizada a cada valor de RSSI obtido.

De acordo com o comentado anteriormente, o algoritmo deve ser capaz de detectar que o robô saiu da área de cobertura do nó alvo e utilizar tal informação para auxiliar na navegação. O algoritmo apresentado no capítulo 4 utilizava tal informação como proveito para estimar a direção do alvo ou, no pior caso, encontrar a área de RSSI

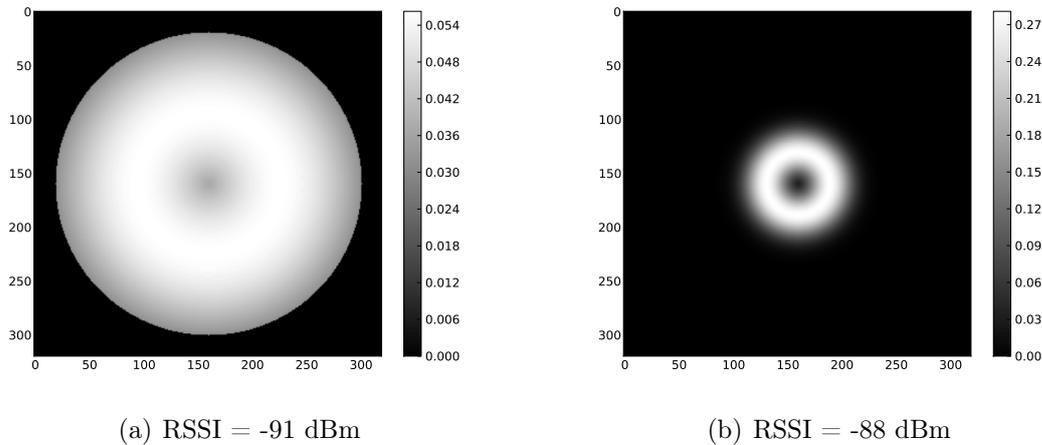


Figura 5.2. Exemplos de valores a serem adicionados na grade de acordo com o RSSI capturado.

confiável.

Para a solução utilizando uma grade probabilística, ao detectar que o robô saiu da área de cobertura, o algoritmo utiliza tal informação para atualizar a grade com uma circunferência de raio 10 m e centro na posição atual do robô na grade com valores zero. A distância foi obtida experimentalmente e tem relação com o alcance máximo do sinal de um nó. É importante frisar que tal distância depende do ambiente ao qual o nó está submetido. Utilizamos os resultados obtidos no capítulo 3 para definirmos tal distância.

A figura 5.3 apresenta um exemplo da representação da grade após o robô detectar que está fora da área de cobertura do nó alvo. Considera-se que o robô perdeu o sinal quando navega sem receber pacotes por um tempo t . Tal tempo é determinado empiricamente e depende da velocidade de navegação do robô e da taxa de transmissão de pacote da rede.

Com a grade devidamente preenchida, é necessário uma estratégia para definir qual a direção que o robô deve navegar, por definição utilizamos o ponto de maior probabilidade.

5.2.2 Determinação da Célula Alvo

Como parte integrante de um robô, um controlador é um sistema que capacita o robô a operar ou atuar sob um determinado meio [Brooks, 1986]. O controlador de nosso robô é responsável por identificar qual o melhor ponto na grade a ser investigada baseado nas informações de probabilidade disponíveis.

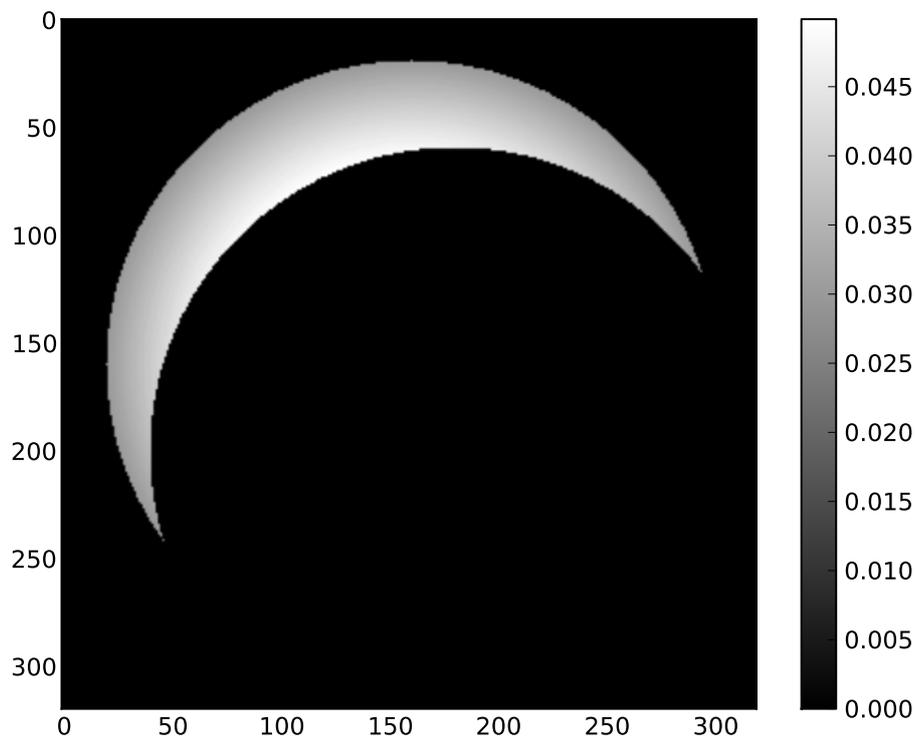


Figura 5.3. Exemplo de grade após o robô sair da área de cobertura do nó.

A estratégia é buscar pelo centro da região que possui a maior probabilidade. No entanto, não sabemos, sem um estudo prévio, qual a figura geométrica que representa a região com maior probabilidade. No entanto, definir tal figura não faz parte de nossa estratégia, estamos interessados em um ponto que leve o robô em direção ao ponto de maior probabilidade na grade. Para o tal, utilizamos o cálculo da moda das células pertencentes a esta região em cada eixo, de acordo com o Algoritmo 1.

O Algoritmo 1 busca um ponto que represente a área de maior probabilidade na grade. Sua estratégia é buscar pela moda dos pontos que possuem a maior probabilidade na grade em ambos os eixos. Em outras palavras, o algoritmo calcula em qual ponto nos eixos x e y da grade, possuem a maior frequência de um determinado valor de probabilidade. Esse ponto será definido como o próximo alvo do robô.

No entanto, em situações nas quais o robô não obteve dados suficientes para estimar com confiança a direção do nó alvo, o robô já pode estar no ponto determinado pelo Algoritmo 1, dessa maneira, é necessário um algoritmo que defina um novo ponto destino para o robô. Em nossa solução, no momento em que o ponto definido pelo algoritmo 1 é o ponto no qual o robô está, o novo destino será o ponto com maior

Algoritmo 1 Algoritmo para calcular a próxima posição a ser investigada pelo robô móvel

```

1: function PROXIMAPOSICAO
2:    $max \leftarrow Grid.maximaProbabilidade()$ 
3:    $max\_X \leftarrow 0$ 
4:    $max\_Y \leftarrow 0$ 
5:   for  $i = 0$  to  $Grid.tamanho$  do
6:      $vx[i] \leftarrow 0$ 
7:      $vy[i] \leftarrow 0$ 
8:   end for
9:   for  $i = 0$  to  $Grid.tamanho()$  do
10:    for  $j = 0$  to  $Grid.tamanho()$  do
11:      if  $Grid.valor(i, j) == max$  then
12:         $vx[i] \leftarrow vx[i] + 1$ 
13:         $vy[j] \leftarrow vy[j] + 1$ 
14:      end if
15:    end for
16:  end for
17:  for  $i = 1$  to  $Grid.tamanho()$  do
18:    if  $vx[i] \geq vx[max\_X]$  then
19:       $max\_X = i$ 
20:    end if
21:    if  $vy[i] \geq vy[max\_Y]$  then
22:       $max\_Y = i$ 
23:    end if
24:  end for
25:   $Robo.novaPosicao(max\_X, max\_Y)$ 
26: end function

```

probabilidade e mais distante do robô. Assim, o robô poderá coletar mais dados e, posteriormente estimar com maior confiança a direção do nó alvo.

Algoritmo 2 Algoritmo geral do controlador

```

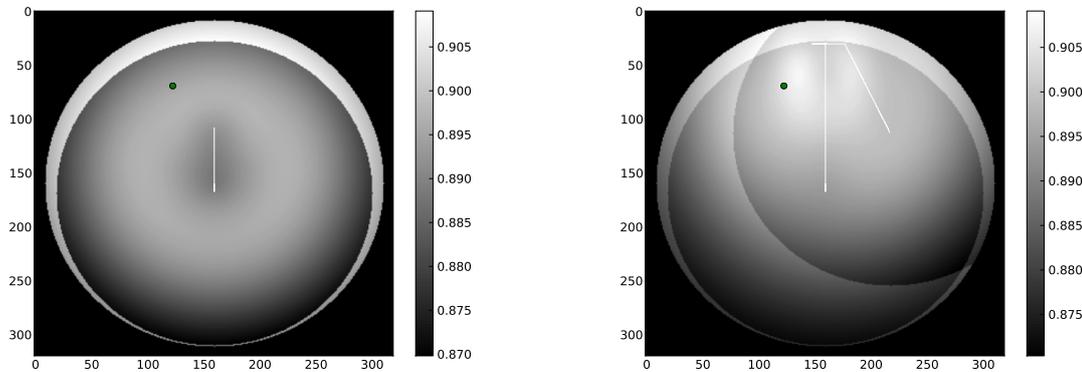
 $calculaModaProbabilidade(x, y)$ 
if  $(Robo.posx() == x)$  e  $(Robo.posy() == y)$  then
   $calculaPontoMaisDistante(x, y)$ 
end if

```

5.3 Resultados e Avaliações

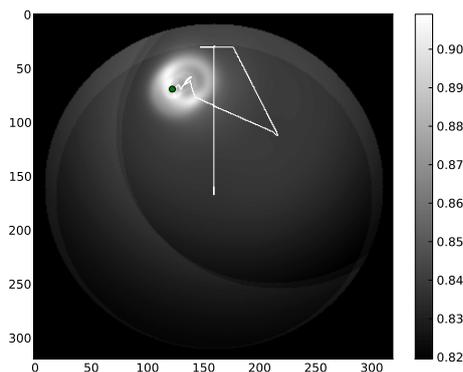
Como métrica de validação e avaliação, o algoritmo será simulado no NS-2 [Fall & Varadhan, 2010] para várias instâncias, avaliando a distância navegada até encontrar o

alvo. Para cada distância de partida em relação ao nó alvo, foram feitas com simulações, cada uma com uma direção de partida aleatória.



(a) Exemplo intermediário da grade de probabilidade.

(b) Exemplo intermediário da grade de probabilidade.



(c) Resultado final da grade de probabilidade.

Figura 5.4. Resultado de uma instância apresentando a grade final. Em branco é a trajetória do robô partindo do centro até encontrar o nó, representado pelo ponto preto. A distância de partida foi 8 metros e a distância percorrida foi 45,64 metros.

Ao contrário do algoritmo anterior, neste algoritmo o robô não espera por um determinado número de pacotes para ter a tomada de decisão. O robô navega com uma velocidade linear constante, coletando pacotes e tomando as decisões de mudança de trajetória de acordo com o controlador. O controlador, por sua vez, utiliza os dados de probabilidade para definir para qual ponto a probabilidade é maior.

Queremos analisar a distância percorrida pelo robô até encontrar o nó alvo. Desta maneira, foram feitas simulações nas quais o robô partia de uma distância fixa em relação ao alvo. Para cada distância, foram feitas 100 simulações e em cada uma delas, o robô partia em uma direção aleatória. Em seguida, foi calculada a distância

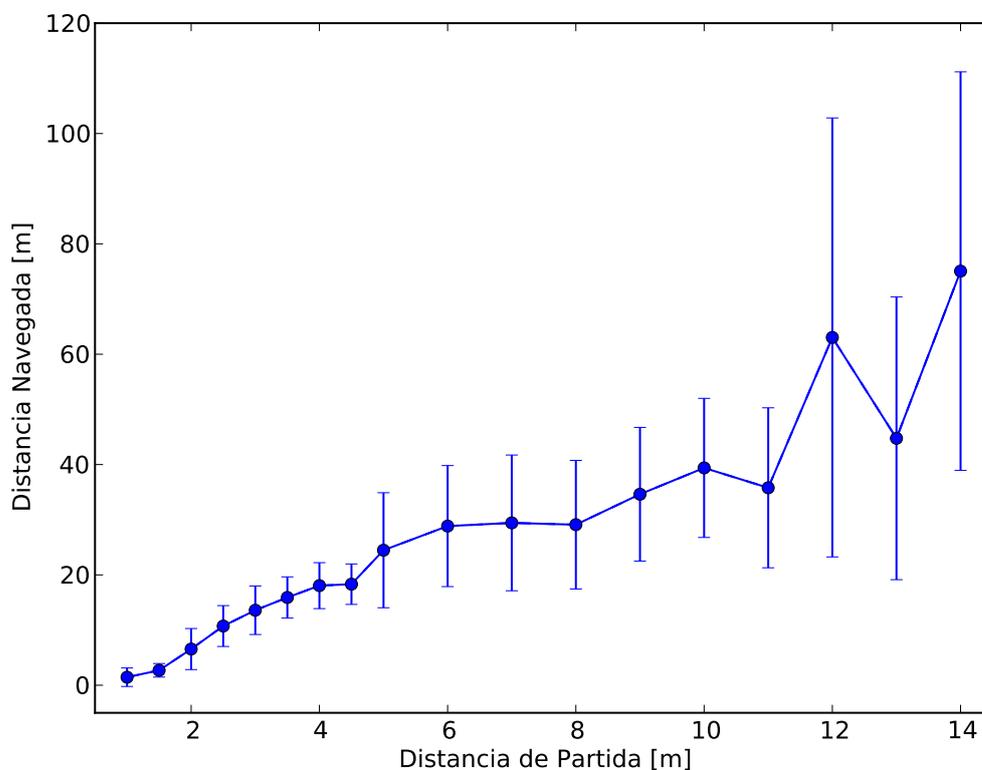


Figura 5.5. Considerações dos resultados obtidos utilizando a grade de probabilidade. No gráfico é mostrado a média da distância percorrida, assim como a barra de desvio padrão. Para cada distância foram feitos 100 experimentos com direções de partida aleatórias.

percorrida pelo robô.

Os resultados obtidos nas simulações são considerados na figura 5.5. Como podemos observar, quanto mais distante do nó alvo, a distância de navegação do robô aumenta. Isto se deve à existência da área de RSSI constante, pois o robô precisa navegar por uma grande distância a fim de ampliar sua amostragem e, assim, melhorar os dados da grade até encontrar o nó. Um exemplo de instância de nossas simulações é apresentado na figura 5.4.

Outro fator importante é o intervalo de confiança, que acompanha o mesmo raciocínio descrito anteriormente, pois, dependendo da direção inicial tomada pelo robô, o mesmo precise navegar até sair da área de cobertura e retornar para continuar sua navegação e leitura de dados.

De qualquer forma, considerando a distância navegada em relação à distância de partida, podemos observar que o algoritmo soluciona o problema proposto. Compa-

rando tal solução com as soluções da literatura, a mesma pode ser aplicada mesmo utilizando o ambiente sem ruído, sendo necessários apenas os passos para a caracterização de propagação do sinal.

5.4 Comparação Entre Algoritmos

Os algoritmos apresentados nesta dissertação trataram do mesmo problema com soluções diferentes. Enquanto um utiliza a média de valores de RSSI coletados para a tomada de decisão, outro navega em velocidade linear constante, atualizando a grade de acordo com o valor de RSSI coletado e toma a decisão de acordo com o estado atual do mapa. A fim de realizarmos uma comparação, utilizaremos os resultados obtidos com a leitura de apenas um pacote para o algoritmo baseado em detecção de borda.

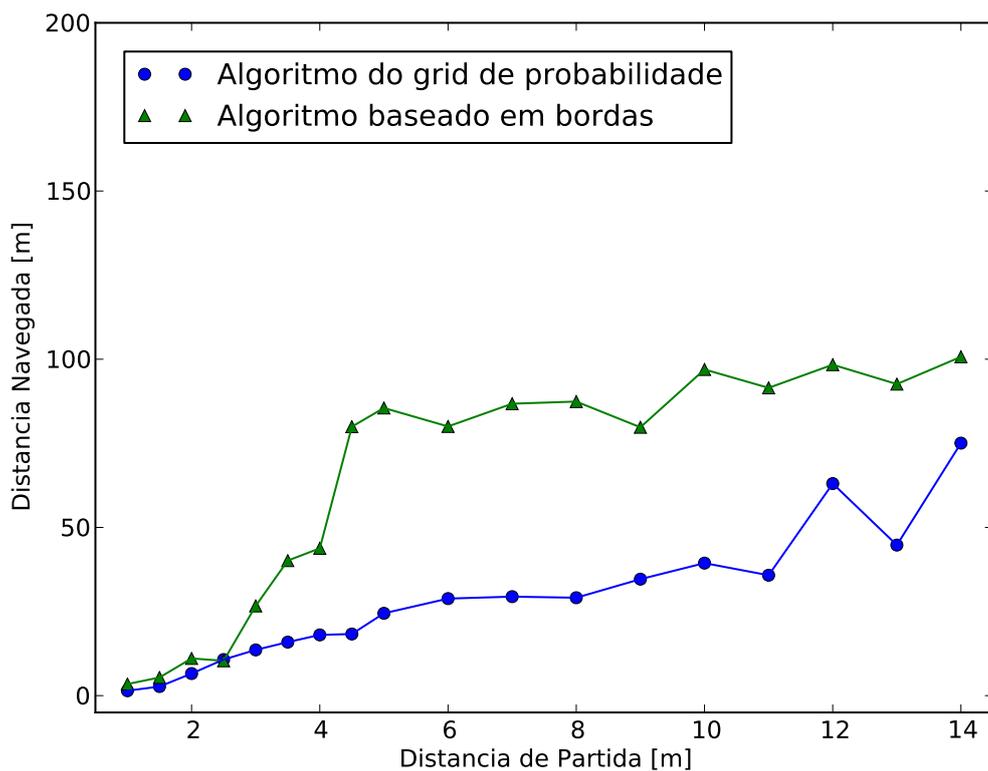


Figura 5.6. Comparação entre os resultados obtidos nos dois algoritmos. Utilizamos os valores das simulações do algoritmo de detecção de borda que utilizou apenas um pacote. No gráfico podemos observar que os resultados obtidos com o algoritmo baseado no mapa são melhores que os do algoritmo baseado em detecção de borda.

Em ambas as soluções o problema foi solucionado, mesmo com a peculiaridade do modelo de propagação ao qual foram submetidos nas simulações. Porém, cada um possui sua aplicabilidade quando consideramos sua implementação em um robô que irá atuar sob um evento ou em uma aplicação de monitoramento.

Observando o gráfico da figura 5.6, podemos observar que o algoritmo da grade de probabilidade tem um melhor comportamento quando analisamos a média da distância percorrida em função da distância de partida do nó alvo. A utilização da grade de probabilidade evita que ele navegue por muito tempo na direção errada, enquanto no algoritmo de detecção de borda é necessário que ele encontre os pontos na borda para retornar a área de cobertura.

Em ambos os algoritmos, notamos que os resultados de navegação quanto a partida dá-se na área de RSSI confiável é semelhante, isto ocorre devido a não necessidade do robô navegar até a borda, no caso do Algoritmo de detecção de borda, o que reduz consideravelmente a distância navegada.

Tabela 5.1. Comparação entre os valores de desvio padrão para alguns pontos dos dois algoritmos.

Algoritmo	Distância de partida do nó alvo (m)									
	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	7,0	9,0	10,0	12,0	14,0
Detecção de borda	3,4	11,0	26,6	43,7	85,5	86,7	79,7	96,9	98,3	100,7
Grade de Probabilidade	1,4	6,5	13,5	18,0	24,4	29,4	34,6	39,3	63,0	75,0

Podemos observar na tabela 5.1 que o desvio padrão para o algoritmo da grade de probabilidade é menor que o do algoritmo baseado em detecção de borda. Dessa forma, o algoritmo da grade de probabilidade possui uma melhor performance quando se trata da distância navegada, em relação ao algoritmo baseado em detecção de borda.

5.5 Considerações Finais

Apresentamos neste capítulo um algoritmo que utiliza os dados de RSSI coletados anteriormente para uma melhor estimativa de distância do nó alvo. À medida que os dados de RSSI são coletados, o robô mantém uma grade de probabilidade atualizada. Com a grade é possível estimar a direção a ser tomada com maiores chances de encontrar o nó alvo.

Uma das vantagens desse algoritmo em relação ao algoritmo de detecção de borda é que não é preciso o robô parar e esperar um determinado número de pacotes antes de tomar uma decisão. Para esse solução o robô mantém-se navegando em uma velocidade

constante, atualiza a grade em tempo real e muda de direção assim que o controlador detecta um novo destino com maiores possibilidades de encontrar o nó alvo.

Com esta técnica, conseguimos melhorar a distância percorrida pelo robô e também o tempo de espera por pacotes, que neste caso é zero já que não há espera. No entanto, esta solução (Grade de Probabilidade) requer uma maior custo computacional para o cálculo de probabilidades e de novo destino em tempo real, ao contrário do algoritmo de detecção de borda, que pode ser utilizado em sistemas computacionais com pouca capacidade de processamento.

Capítulo 6

Considerações Finais

6.1 Conclusões

Essa dissertação tratou do problema de guiar um robô em uma Rede de Sensores Sem Fio em busca de um evento utilizando apenas as informações de RSSI coletadas dos pacotes de comunicação da rede. Tal problema foi abordado baseado na problemática de que aplicações de monitoramento ambiental devem utilizar nós sensores simples, econômicos em energia e de baixo custo, inviabilizando uso de GPS ou soluções distribuídas de localização. Além disso, robôs podem atuar e sensorear eventos em ambientes remotos, completando a tarefa de monitorar.

Para solucionar tal problema, foi necessário a realização de experimentos a fim de caracterizar o modelo de propagação do sinal em um determinado ambiente. O ambiente escolhido para o experimento foi a floresta Amazônica, mais precisamente um ambiente de mata fechada. Utilizamos o sensor Iris [Crossbow, 2009] e, após a caracterização do ambiente, representamos o mesmo no simulador NS-2 [Fall & Varadhan, 2010] para que algoritmo seja simulado em um ambiente com características obtidas por experimentos.

Após os experimentos e representação do modelo em um simulador, observou-se uma característica no modelo de propagação que deve ser considerada para o desenvolvimento do algoritmo. Tal característica faz com que em uma grande parte da área de cobertura de sinal do nó, o valor do RSSI é pouco significativo, o que impossibilita que o robô saiba se está navegando em direção ao nó ou em direção contrária. Isso invalida qualquer algoritmo que baseia-se em um modelo de propagação de sinal sem ruído, isto é, o sinal seja intensificado de acordo com que o robô se aproxima do nó.

Assim, apresentamos duas soluções para o problema proposto:

- Algoritmo baseado em detecção de borda (capítulo 4); e
- Algoritmo de navegação utilizando grade probabilística (capítulo 5).

Em nossas análises, concluímos que o algoritmo que utiliza uma grade de probabilidade percorre uma distância menor para detectar o evento em relação ao algoritmo baseado em detecção de borda. No entanto, considerando custos computacionais, a grade de probabilidade requer mais recursos de processamento e armazenamento. Baseado nesta afirmação, concluímos que:

- O algoritmo de detecção de borda pode ser aplicado em sistemas computacionais com restrição de processamento e armazenamento, cuja aplicação não necessite de um tempo restrito e pequeno para a navegação.
- O algoritmo baseado em grades pode ser utilizado quando deseja-se um robô que encontre o mais rápido possível o evento a ser observado.

Dessa maneira, contribuimos com dois algoritmos que solucionam o problema e abrangem uma grande gama de robô e dispositivos computacionais.

6.2 Trabalhos Futuros

A proposta deste trabalho era de desenvolver dois algoritmos que solucionem o problema de navegação de um robô em uma RSSF considerando um ambiente de modelo de propagação real. Dessa forma, dois algoritmos foram apresentados, assim como seus resultados, obtidos por meio de simulações, e aplicação. No entanto, nenhum estudo foi feito considerando o tamanho da rede e a influência do tráfego de pacotes neste trabalho.

O estudo de entrega de pacotes é um trabalho que já foi considerado na literatura, assim como apresentado em Zhao & Govindan [2003]. Seria de grande importância um estudo a respeito do impacto dessa entrega de pacotes e do tráfego na rede: De acordo com o tráfego, entrega e tamanho da rede, determinar a melhor velocidade para que o robô possa ter a melhor performance neste ambiente.

Apresentamos, neste trabalho, resultados obtidos com simuladores. Considera-se ainda, a portabilidade deste algoritmo para um robô. Um trabalho interessante seria a aplicação da grade de probabilidade considerando obstáculos e ambientes *indoor*, de modo que aplicações utilizando este algoritmo possam ser utilizadas tanto em ambientes florestais monitorados como na indústria.

6.3 Artigos Publicados

- Antonio R. de Carvalho Jr, Afonso D. Ribas, Vilar F. da Camara Neto, Eduardo Freire Nakamura, Carlos Mauricio Figueiredo. An RSSI-based navigation algorithm for a mobile robot in Wireless Sensor Networks, LCN, pp.308-311, 37th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, 2012. Apresentado no capítulo 5
- Afonso D. Ribas, Antonio R. Carvalho Jr., Carlos M. S. Figueiredo, Eduardo F. Nakamura. Characterizing the communication in the Amazon rainforest: towards a realistic simulation. JBCS 2013. Apresentado no capítulo 3
- Antonio Carvalho Jr, Afonso Ribas, Carlos Mauricio Figueiredo. Algoritmo de Navegação Robótica em Redes de Sensores Sem Fio baseado no RSSI. SBCUP, 2011. Apresentado no capítulo 4.

Referências Bibliográficas

- Akyildiz, I. F.; Su, W.; Sankarasubramaniam, Y. & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38(4):393–422.
- Al Alawi, R. (2011). RSSI based location estimation in wireless sensors networks. Em *Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Networks, ICON'11*, pp. 118–122, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- Arampatzis, T.; Lygeros, J.; Member, S. & Manesis, S. (2005). A survey of applications of wireless sensors and wireless sensor networks. Em *Proceedings of the 13th Mediterranean Conference on Control and Automation*, pp. 719–724, Limassol, Cyprus.
- Batalin, M. A. & Sukhatme, G. S. (2002). Sensor coverage using mobile robots and stationary nodes. Em *SPIE Conference on Scalability and Traffic Control in IP Networks II (Disaster Recovery Networks)*, volume 4868, pp. 269–276, Boston, MA.
- Batalin, M. A. & Sukhatme, G. S. (2003). Coverage, exploration and deployment by a mobile robot and communication network. *Telecommunication Systems Journal, Special Issue on Wireless Sensor Networks*, pp. 376–391.
- Brooks, R. A. (1986). A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-2(1):14–23.
- Chib, S. & Greenberg, E. (1995). Understanding the metropolis-hastings algorithm. *The American Statistician*, 49(4):327–335.
- Colonna, J. G.; Ribas, A. D.; dos Santos, E. M. & Nakamura, E. F. (2012). Feature subset selection for automatically classifying anuran calls using sensor networks. Em *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks - IJCNN*, pp. 1–8, Melbourne, Australia.
- Corke, P.; Peterson, R. & Rus, D. (2003). Networked robots: flying robot navigation using a sensor net. Em *Proceedings of the 11th International Symposium of Robotics Research - ISRR*, volume 15, pp. 234–243, Siena, Italy.

- Crossbow, T. I. (2009). *Iris - Wireless Measurement System*. Datasheet.
- Diaz, J.; Maues, R.; Soares, R.; Nakamura, E. & Figueiredo, C. (2010). Bluepass: An indoor bluetooth-based localization system for mobile applications. Em *Proceedings of the IEEE Symposium on Computers and Communications*, pp. 778–783, Riccione, Italy. IEEE Computer Society.
- Einicke, G. & White, L. (1999). Robust extended kalman filtering. Em *IEEE Transactions on Signal Processing*, volume 47, pp. 2596–2599.
- Fall, K. & Varadhan, K. (2010). The ns manual. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>.
- Figueiredo, C. M. S.; Nakamura, E. F.; Ribas, A. D.; de Souza, T. R. B. & Barreto, R. S. (2009). Assessing the communication performance of wireless sensor networks in rainforests. Em *Proceedings of the 2nd IFIP conference on wireless days, WD'09*, pp. 226–231, Paris, France. IEEE Press.
- Gutmann, J.-S. & Konolige, K. (1999). Incremental mapping of large cyclic environment. Em *Proceedings of the IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pp. 318–325, Monterey, CA.
- Jiang, J.-R.; Lai, Y.-L. & Deng, F.-C. (2008). Mobile robot coordination and navigation with directional antennas in positionless wireless sensor networks. Em *Proceedings of the International Conference on Mobile Technology, Applications, and Systems, Mobility '08*, pp. 80:1–80:7, New York, NY, USA. ACM.
- Kantor, G.; Singh, S.; Peterson, R.; Rus, D.; Das, A.; Kumar, V.; Pereira, G. & Spletzer, J. (2003). Distributed search and rescue with robot and sensor teams. Em *The 4th International Conference on Field and Service Robotics*.
- Leonard, J. & Durrant-Whyte, H. (1991). Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot. Em *Proceedings of the IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems*.
- Leonard, J. J.; Jacob, H. & Feder, S. (1999). A computationally efficient method for large-scale concurrent mapping and localization. Em *Proceedings of the Ninth International Symposium on Robotics Research*, pp. 169–176. Springer-Verlag.
- Liyang, S.; Mingli, D.; Zhen, L. & Zhongda, Z. (2010). A mobile node filter method in wireless sensor network based on improved mh particle. Em *Proceedings of the*

- 2010 First International Conference on Pervasive Computing, Signal Processing and Applications*, PCSPA '10, pp. 158–161, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- Loureiro, A.; Nogueira, J. M. & Ruiz, L. B. R. (2003). Redes de sensores sem fio. Em *XXI Simposio Brasileiro de Redes de Computadores*. Natal - RN.
- Lu, F. & Milius, E. (1997). Globally consistent range scan alignment for environment mapping. *Autonomous Robots*, 4:333–349.
- Mainwaring, A.; Culler, D.; Polastre, J.; Szewczyk, R. & Anderson, J. (2002). Wireless sensor networks for habitat monitoring. Em *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, WSNA '02, pp. 88–97, New York, NY, USA. ACM.
- Marwedel, P. (2011). *Embedded System Design: Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems*. Embedded Systems. Springer London, Limited.
- Myers, R. (1990). *Classical and modern regression with applications*. Duxbury advanced series in statistics and decision sciences. PWS-KENT.
- NOSS, R. F. (1990). Indicators for monitoring biodiversity: A hierarchical approach. *Conservation Biology*, 4(4):355–364.
- Pathirana, P. N.; Bulusu, N.; Savkin, A. V. & Jha, S. (2005). Node localization using mobile robots in delay-tolerant sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 4:285–296.
- Patwari, N.; Ash, J.; Kyperountas, S.; Hero, A. I.; Moses, R. & Correal, N. (2005). Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 22(4):54–69.
- Raghunathan, V.; Kansal, A.; Hsu, J.; Friedman, J. & Srivastava, M. (2005). Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems. Em *Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks*, IPSN '05, Piscataway, NJ, USA. IEEE Press.
- Rappaport, T. (2001). *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA.
- Ribas, A. D.; Figueiredo, C. M. S. & Nakamura, E. (2012). Similarity clustering for data fusion in wireless sensor networks using *k*-means. Em *International Joint*

- Conference on Neural Networks (IJCNN 2012)*, Melbourne, Australia. (accepted for publication).
- Sichitiu, M. L. & Ramadurai, V. (2003). Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon.
- Siegwart, R. & Nourbakhsh, I. R. (2004). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. Bradford Company, Scituate, MA, USA.
- Simunic, T.; Benini, L. & Micheli, G. D. (1999). Cycle-accurate simulation of energy consumption in embedded systems.
- Stankovic, J. A. (1996). Strategic directions in real-time and embedded systems. *ACM Comput. Surv.*, 28(4):751–763.
- Stoleru, R. & Stankovic, J. (2004). Probability grid: a location estimation scheme for wireless sensor networks. Em *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2004. IEEE SECON 2004. 2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on*, pp. 430 – 438.
- Sun, X.; Zhao, X.; Li, E.; Li, H. & Liang, Z. (2010). Mobile robot navigation using rssi potential field in wireless sensor network. *Journal of Computational Information Systems*, 6:4751–4759.
- Trincavelli, M.; Reggente, M.; Coradeschi, S.; Ishida, H.; Loutfi, A. & Lilienthal, A. J. (2008). Towards environmental monitoring with mobile robots. Em *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2210–2215.
- Werner-Allen, G.; Johnson, J.; Ruiz, M.; Lees, J. & Welsh, M. (2005). Monitoring volcanic eruptions with a wireless sensor network. Em *Proceedings of the Second European Workshop on Wireless Sensor Networks*, pp. 108 – 120.
- Xu, H.; Luo, J. & Luo, M. (2010). Mobile node localization algorithm in wireless sensor networks for intelligent transportation systems. Em *Proceedings of the 2010 Ninth International Symposium on Distributed Computing and Applications to Business, Engineering and Science, DCABES '10*, pp. 491–494, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.
- Zhang, L. & Chen, Y. (2011). A new indoor mobile node tracking scheme based on rssi and kalman filter. Em *Wireless Mobile and Computing (CCWMC 2011), IET International Communication Conference on*, pp. 216 –220.

- Zhao, J. & Govindan, R. (2003). Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks. Em *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, SenSys '03, pp. 1–13, New York, NY, USA. ACM.
- Zhu, Y.; Zhang, B.; Yu, F. & Ning, S. (2009). A rssi based localization algorithm using a mobile anchor node for wireless sensor networks. Em *Proceedings of the 2009 International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization - Volume 01*, CSO '09, pp. 123–126, Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.