

**LOCALIZAÇÃO EM AMBIENTES INTERNOS
UTILIZANDO MÚLTIPLAS TECNOLOGIAS SEM FIO**

MOISÉS LISBOA RODRIGUES

**LOCALIZAÇÃO EM AMBIENTES INTERNOS
UTILIZANDO MÚLTIPLAS TECNOLOGIAS SEM FIO**

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

ORIENTADOR: LUIZ FILIPE MENEZES VIEIRA
COORIENTADOR: MARIO FERNANDO MONTENEGRO CAMPOS

Belo Horizonte

Julho de 2011

© 2011, Moisés Lisboa Rodrigues.
Todos os direitos reservados.

R696l Rodrigues, Moisés Lisboa
Localização em Ambientes Internos Utilizando
Múltiplas Tecnologias Sem Fio / Moisés Lisboa
Rodrigues. — Belo Horizonte, 2011
xxvii, 117 f. : il. ; 29cm

Dissertação (mestrado) — Universidade Federal de
Minas Gerais. Departamento de Ciência da
Computação.

Orientador: Luiz Filipe Menezes Vieira
Coorientador: Mario Fernando Montenegro
Campos

1. Computação — Teses. 2. Sistemas de
comunicação sem fio — Teses. 3. Radiofrequência —
Teses. I. Orientador. II. Coorientador. III. Título.

CDU 519.6*22(043)



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

FOLHA DE APROVAÇÃO

Localização em ambientes internos utilizando múltiplas tecnologias sem fio

MOISÉS LISBOA RODRIGUES

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

PROF. LUIZ FILIPE MENEZES VIEIRA - Orientador
Departamento de Ciência da Computação - UFMG

PROF. MARIO FERNANDO MONTENEGRO CAMPOS - Co-orientador
Departamento de Ciência da Computação - UFMG

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

PROF. LUIZ CHAIMOWICZ
Departamento de Ciência da Computação - UFMG

PROF. DIÓGENES CECÍLIO DA SILVA JÚNIOR
Departamento de Engenharia Elétrica - UFMG

Belo Horizonte, 14 de julho de 2011.

*Para meus pais, Wilson e Mirtes.
Para meus irmãos, Marlon e Graciele.
e para Raquel.
Amo vocês... muito.*

Agradecimentos

A gratidão é a memória do coração...

Antístenes

Sempre que caminhamos por um longo caminho, chegamos ao final e olhamos para trás. Nesse momento, podemos identificar pessoas e situações que mudaram nossas vidas e nos proporcionaram bons momentos, apoio, conforto e lições que nos permitiram chegar mais longe. Para todos que foram importantes para que essa conquista se concretizasse, digo que, certamente, apenas mencionar seus nomes nesse pequeno espaço de forma alguma faz justiça à real importância de vocês para a minha vida e para realização deste trabalho. No entanto, isso é o mínimo que posso fazer na esperança de demonstrar o quanto sou grato a todos vocês.

Agradeço a Deus, não por me dar tudo que eu peço ou por atender todas as minhas orações mas por me ajudar a crescer e aprender ao longo da vida. Por me ajudar a manter a perspectiva correta quando os momentos difíceis aparecem. E agradeço também pela oportunidade de conhecer e ser ajudado por tantas pessoas especiais.

Agradeço aos meus pais, Wilson e Mirtes, e aos meus irmãos, Marlon e Graciele, pelo amor, pela dedicação e por tudo mais na minha vida. A vocês eu devo mais (...muito mais) do que a todos.

Raquel, obrigado pelo companheirismo, pelo carinho e por que namorar com você me fez entender o que minha mãe sempre dizia a mim: *“Namorar deixa a vida mais colorida”*. Mãe sempre sabe das coisas. Você colocou mais cor na minha vida.

Agradeço aos amigos de graduação e aos amigos de longa data, em especial ao Tiago (que caminha para ser mestre), ao João “Bobão” (que desistiu de ser Doutor, mas foi ficar rico em Brasília), a Raquel (que já é mestre) e ao Tael (que será Doutor,

mesmo sem fazer Doutorado, e vai ganhar muito mais dinheiro que a maioria dos “doutores com Doutorado”). Pessoal, nos momentos de descanso foi ótimo estar com vocês.

Professor Mário Fernando Montenegro Campos, obrigado pela orientação/co-orientação. Com você aprendi muitas coisas e pude fazer parte de uma equipe/laboratório que me ensinou muito. Obrigado Professor Luiz Filipe, pelo acompanhamento, pela orientação/co-orientação, pelas dicas e pela grande ajuda.

Agradeço também ao professor da Escola de Engenharia Elétrica, Diógenes Cecílio da Silva Jr., pela oportunidade de fazer Iniciação Científica no *Laboratório de Sistemas de Computação Integrados*, quando eu ainda cursava minha graduação em Ciência da Computação. O aprendizado e o contato que tive com a pesquisa ali foram muito importantes para minha vida e decisão de ingressar no mestrado. Agradeço também ao Adriano Borges da Cunha, estudante de Doutorado em Engenharia Elétrica naquela época, agora professor do Colégio Técnico (COLTEC) da UFMG pela amizade, ensinamentos e acompanhamento de perto naquela etapa de minha vida.

Não poderia deixar de agradecer ao pessoal do *Laboratório de Visão e Robótica - Verlab*. Douglas, obrigado por implementar a navegação autônoma do robô. Isso me permitiu fazer experimentos mais “sofisticados” do que eu planejava. Agora, já não falta implementar. Só falta defender 😊. Armando e Wilson, obrigado pelas “consultorias” sobre filtro de Kalman e outros assuntos. Anderson, obrigado pelas boas discussões e bons bate-papos sobre meu trabalho. Elizabeth, obrigado por revisar o capítulo de introdução dessa dissertação. Agradeço também aos Renato’s, Vilar, Marcelo, Erickson, Gabriel, Alyson, Matias, Bruno, Rafael e Tiago. Um agradecimento especial ao Wolmar por estar sempre pronto a ajudar em tudo. Chegar até aqui com certeza foi muito mais fácil por causa de vocês. Aprendi muito nas nossas conversas e ao observar todos vocês no dia a dia de um aspirante a pesquisador.

O último agradecimento vai para o pessoal da secretaria do DCC, em especial à Túlia por toda a ajuda e por bons bate-papos. Vocês fazem um ótimo trabalho. Parabéns!

...todos vocês estarão para sempre na *memória do meu coração*.

*“Combati o bom combate,
completei a carreira,
gardei a fé.”*
(Paulo, em II Timóteo 4:7)

Resumo

Localização é um problema fundamental em muitas áreas da computação como, por exemplo, robótica, computação móvel e computação sensível ao contexto. Recentemente, a utilização do sinal sem fio de radiofrequência (RF) foi proposta como uma alternativa para solucionar o problema de localização em ambientes internos. As principais vantagens desse tipo de localização são seu baixo custo e o grande número de dispositivos sem fio existentes em prédios industriais, comerciais e campi universitários atualmente. Geralmente, apenas uma das diversas tecnologias sem fio disponíveis (Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, etc.) é utilizada para realizar a localização. Pouco foi estudado a respeito da utilização de múltiplas tecnologias desse tipo para realizar a localização. Sendo assim, neste trabalho serão investigadas as vantagens e desafios da utilização de múltiplas tecnologias RF (especificamente, são utilizados dispositivos RF compatíveis com as tecnologias Wi-Fi, Bluetooth e Zigbee) para realizar localização em ambientes internos.

Dois métodos de localização são utilizados. O primeiro método é baseado em mapa de assinaturas (*fingerprinting map*). O segundo método é baseado em modelos de propagação do sinal de RF.

As duas principais vantagens da utilização de múltiplas tecnologias RF para realizar a localização são a possibilidade de aumentar a exatidão e a disponibilidade do serviço de localização. Os dois principais desafios são descobrir *como integrar* as múltiplas tecnologias (qual a melhor forma de fundir as informações provenientes de diferentes tecnologias RF) e *como evitar* que efeitos adversos dessa integração possam degradar a qualidade da localização obtida (por exemplo, como evitar que a interferência entre as tecnologias prejudiquem os resultados de localização). A exploração dessas vantagens e a superação desses desafios é fundamental para que sistemas de localização baseados em múltiplas tecnologias RF sejam mais eficazes.

Palavras-chave: localização, radiofrequência, múltiplas tecnologias sem fio, modelo de propagação, mapa de assinaturas, potência do sinal recebido.

Abstract

Localization is a fundamental problem in many areas of computer science such as robotics, mobile and context-aware computing. Recently, the use of radio frequency (RF) signal was proposed as an alternative to solve the problem of indoor localization. The main advantages of this kind of localization method are its reduced cost and the large number of wireless devices present in industry, commercial buildings and university campuses today. Generally, only one of several available wireless technologies (Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, etc..) is used and little has been said about the use of multiple wireless technologies to perform the localization. Therefore, in this work we investigate the advantages and challenges of using multiple RF technologies (more specifically, Wi-Fi, Bluetooth and Zigbee compliant devices) to perform localization indoors.

Two localization methods are used. The first method is based on fingerprinting. The second method is based on a RF signal propagation model.

Two concluding remarks are made at the end. First, the two main advantages of using multiple RF technologies to perform localization are the possibility of increasing the accuracy and availability of a localization service. Second, the two main challenges are finding the best way to integrate the multiple technologies (in other words, it is necessary to understand what is the best way to fuse information from different RF technologies) and to avoid the adverse effects of this integration that can diminish the localization quality (for example, how to prevent that the interference among technologies affects the results?). The further exploration of these advantages and the overcome of these challenges are essential to create more effective localization systems based on multiple RF technologies.

Keywords: localization, radio frequency, multiple wireless technologies, propagation model, fingerprinting map, received signal strength.

Lista de Figuras

1.1	Localização utilizando RSSI.	2
1.2	Amostra da distribuição de pontos de acesso Wi-Fi no mundo.	5
2.1	Sistemas de localização baseados em tecnologias sem fio.	11
2.2	Sistema <i>Active Badge</i> de localização.	11
2.3	Sistema <i>Active Bat</i> de localização.	12
2.4	Componentes de um sistema de localização baseado em radiofrequência.	13
2.5	Localização baseada em medição do tempo de chegada.	15
2.6	Sistema <i>Cricket</i> de localização.	16
2.7	Localização baseada em medição do RTOF.	17
2.8	Localização baseada em ângulo de chegada.	18
2.9	Funcionamento do método de mapa de assinaturas.	21
2.10	Sumário dos métodos de localização baseados em RF.	22
2.11	Resultados obtidos em [Haeberlen et al., 2004].	24
2.12	Sistema de localização comercial Ekahau.	25
2.13	Nó sensor Micaz e pilha 802.15.4/Zigbee.	28
2.14	Influência da interferência entre Zigbee e Wi-Fi no resultado da localização.	28
2.15	Pontos de treinamento e pontos nos quais ocorreram testes em [Aparicio et al., 2008a]. (Melhor visualizado em cores).	31
2.16	Erros obtidos em cada ponto utilizando-se apenas Wi-Fi e uma combinação de Wi-Fi e Bluetooth. Reproduzido de [Aparicio et al., 2008a].	31
2.17	Ambiente em que os experimentos foram realizados e resultados obtidos em [Mahtab Hossain et al., 2007].	31
2.18	Range-only SLAM usando rádio.	33
2.19	Melhoria de qualidade de localização quando utiliza-se tratamento para NLOS.	34
2.20	Erro de localização obtido utilizando-se trilateração e filtro de partículas.	35

3.1	Diagrama do método utilizado para realizar localização baseada em mapa de assinaturas de múltiplas tecnologias RF.	39
3.2	Concatenação de mapas de assinaturas de múltiplas tecnologias.	40
3.3	Algoritmo K-NN aplicado ao problema de localização utilizando mapa de assinaturas.	42
3.4	Robô e os dispositivos “sensores”	43
3.5	Ambiente no qual foram realizados os experimentos.	44
3.6	Robô coletando dados durante o experimento.	46
3.7	Erro médio considerando cada tecnologia para valores de K variando de 1 a 7.	47
3.8	Erro médio considerando todas as combinações de tecnologias para valores de K variando de 1 a 7.	48
3.9	Influência do número de <i>beacons</i> utilizados na qualidade da localização.	50
3.10	Erro médio de localização considerando posições treinadas e não treinadas para cada tecnologia e para cada combinação de tecnologias	51
3.11	Resultado da interferência do sinal Bluetooth no número de APs Wi-Fi detectados pelo adaptador de rede sem fio.	53
4.1	Diagrama do método utilizado para fazer localização baseado em modelos de propagação do sinal de RF.	59
4.2	Modelo de propagação e a interação entre robô e <i>beacons</i>	61
4.3	Valores de RSSI obtidos dos sinais recebidos por um dispositivo Bluetooth, dispositivo Zigbee e ponto de acesso Wi-Fi.	62
4.4	trilateração.	63
4.5	Efeito das incertezas nos resultados da trilateração.	64
4.6	Operação do filtro de Kalman. Reproduzido de [Welch & Bishop, 1995].	67
4.7	O caminho percorrido pelo robô, para o Cenário 1.	70
4.8	O caminho percorrido pelo robô, para o Cenário 2.	71
4.9	Resultado considerando apenas a hodometria, para o Cenário 1.	71
4.10	Resultado considerando apenas a hodometria, para o Cenário 2.	72
4.11	Resultado da localização, considerando valor de σ próximo de zero.	73
4.12	Influência do valor de σ na exatidão da localização.	75
4.13	Resultado da localização considerando $\sigma^2 = 0.5$	75
4.14	Resultado da localização considerando $\sigma^2 = 4$	76
4.15	Resultado final da localização associado ao número de <i>beacons</i> utilizados.	76
4.16	Resultado da localização utilizando diferentes topologias para os <i>beacons</i>	77

4.17	Resultado final da localização. A qualidade do resultado piora em áreas em que existem poucos <i>beacons</i> (região tracejada).	78
4.18	Resultado final da localização após a adição de <i>beacons</i> na região tracejada na Figura 4.17.	79
4.19	Resultados comparativos entre trilateração e EKF para dois cenários. . .	80
4.20	localização utilizando apenas Wi-Fi e utilizando múltiplas tecnologias. .	82
4.21	Cenário onde foi realizado o Experimento 1.	84
4.22	Resultado da localização no Experimento 1.	85
4.23	Erro instantâneo do resultado obtido com a hodometria e com o EKF. Enquanto o erro obtido com o EKF permanece aproximadamente na mesma faixa de valores o erro da hodometria cresce muito.	85
4.24	Cenário onde foi realizado o Experimento 2.	86
4.25	Resultado da localização no Experimento 2.	87
4.26	Cenário onde foi realizado o Experimento 3.	89
4.27	Resultado da localização no Experimento 3.	90
A.1	Foto do adaptador USB, compatível com a tecnologia Bluetooth, que foi utilizado como <i>beacon</i> neste trabalho.	100
A.2	Foto nó sensor micaZ, compatível com a tecnologia 802.15.4/Zigbee, que foi utilizado como <i>beacon</i> neste trabalho.	100
A.3	Ponto de acesso Cisco AIR-AP1131AG-A-K9 utilizado como <i>beacon</i> neste trabalho.	101
A.4	Outro modelo de ponto de acesso Cisco, o AIR-AP1242AG-A-K9. Também foi utilizado como <i>beacon</i>	101
A.5	Receptor USB-Wi-Fi utilizado neste trabalho.	102
A.6	Dispositivo Bluetooth utilizado como receptor.	103
A.7	Placa de programação MIB 520 utilizada.	103
A.8	Laser Sick LMS 200.	104
A.9	Robô Móvel Pioneer P3-AT.	105

Lista de Tabelas

2.1	Exemplo de um “mapa” de assinaturas, considerando o sinal de RSSI recebido de diferentes <i>beacons</i>	20
2.2	Quadro comparativo dos trabalhos que utilizam múltiplas tecnologias sem fio para localizar.	32
3.1	“Mapa” de assinaturas do sinal de RSSI recebido de diferentes <i>beacons</i>	40
3.2	Elementos do algoritmo K-NN e sua aplicação ao problema de localização utilizando mapa de assinaturas.	41
3.3	Número de <i>beacons</i> utilizados para fazer a análise.	48
4.1	Valores estimados para os parâmetros do modelo de propagação para cada uma das três tecnologias.	60

Lista de Acrônimos

AOA	<i>Angle of Arrival</i> (Ângulo de chegada)
AP	<i>Access Point</i> (Ponto de acesso)
EKF	<i>Extended Kalman Filter</i> (Filtro de Kalman Estendido)
GDOP	<i>Geometric Dilution of Precision</i> (Diluição geométrica da precisão)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de posicionamento global)
K-NN	<i>K-Nearest Neighbour</i> (K-Vizinhos mais próximos)
MAC	<i>Medium Access Control</i> (Controle de acesso ao meio)
MIB520	<i>Mote Interface Board 520</i> (Placa de interface com motes - modelo 520)
NLOS	<i>Non-line-of-sight</i> (Sem linha de visada)
PAN	<i>Personal Area Network</i> (Rede de área pessoal)
RF	<i>Radiofrequency</i> (Radiofrequência)
RFID	<i>Radiofrequency Identification</i> (Identificação por radiofrequência)
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i> (Indicador da Potência do Sinal Recebido)
RTOF	<i>Round Trip Time of Flight</i> (Tempo de ida e volta)
SSID	<i>Service Set Identifier</i> (Identificador de acesso a serviços)
TDOA	<i>Time Difference of Arrival</i> (Diferenças entre tempos de chegada)
TOA	<i>Time of Arrival</i> (Tempo de chegada)
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (Barramento Serial Universal)
UWB	<i>Ultra Wide Band</i> (Banda ultra curta)
VFH	<i>Vector Field Histogram</i> (Histograma de campos vetoriais)
WLAN	<i>Wireless Local Area network</i> (Rede local sem fio)

Sumário

Agradecimentos	ix
Resumo	xiii
Abstract	xv
Lista de Figuras	xvii
Lista de Tabelas	xxi
1 Introdução	1
1.1 Definição do Problema	3
1.2 Motivação	4
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo Geral	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
1.4 Contribuições	6
1.5 Organização do Texto	6
2 Localização em Ambientes Internos Utilizando Radiofrequência	9
2.1 Introdução	10
2.2 Componentes de um sistema de localização que utiliza Radio Frequência	13
2.3 Métodos Para Realizar Localização Utilizando RF	14
2.3.1 Utilização de Distância ou Ângulo Para Estimar a Localização	14
2.3.2 Proximidade	19
2.3.3 Análise de Cena	19
2.4 Exemplos de Sistemas de Localização Baseados em RF	21
2.4.1 Sistemas que utilizam Ethernet Sem Fio	22

2.4.2	Sistemas que utilizam Bluetooth	25
2.4.3	Sistemas que utilizam 802.15.4/Zigbee	27
2.5	Localização Utilizando Múltiplas Tecnologias RF	29
2.6	Localização Utilizando RF - Aplicação em Robótica Móvel	32
2.7	Sumário	35
3	Localização Baseada em Múltiplas Tecnologias RF Usando Mapa de Assinaturas	37
3.1	Metodologia	38
3.1.1	Visão Geral	38
3.1.2	Coleta de dados	38
3.1.3	Criação do Banco de Dados (Mapa de Assinaturas)	39
3.1.4	Integração dos Mapas de Múltiplas Tecnologias RF	40
3.1.5	Algoritmo de Localização	40
3.2	Avaliação Experimental	42
3.2.1	Aparato Experimental	42
3.2.2	Coleta de Dados	44
3.2.3	Resultados e Discussão	45
3.3	Sumário	54
4	Localização Baseada em Múltiplas Tecnologias RF Usando Modelos de Propagação	57
4.1	Metodologia	58
4.1.1	Visão Geral	58
4.1.2	Modelagem da propagação do Sinal de RF	58
4.1.3	Estimação da posição do robô	63
4.2	Avaliação Experimental	69
4.2.1	Experimentos Simulados	69
4.2.2	Experimentos Reais	82
4.2.3	Discussão	91
4.3	Sumário	93
5	Considerações Finais	95
5.1	Conclusões	95
5.2	Publicações Resultantes Deste Trabalho	97
5.3	Trabalhos Futuros	98
	Apêndice A Especificações Técnicas dos Dispositivos Utilizados	99

A.1	<i>Beacons</i> Compatíveis com Bluetooth	99
A.2	<i>Beacons</i> Compatíveis com 802.15.4/Zigbee	100
A.3	Pontos de Acesso Wi-Fi	101
A.4	Receptor Wi-Fi	102
A.5	Receptor Bluetooth	102
A.6	Placa de Interface com Nós Sensores MIB 520	103
A.7	Sensor Laser	104
A.8	Robô Móvel Pioneer P3-AT	104
Apêndice B Breve introdução às unidades de medida dB e dBm		107
B.1	dB	107
B.2	dBm	107
Referências Bibliográficas		109

Capítulo 1

Introdução

*Pensamos para resolver problemas.
Sem o desafio dos problemas, o pensamento ficaria dormindo, inerte.
O pensamento, assim, acontece quando um "não saber" nos desafia.*

Rubem Alves

Localização é um problema relevante em diversas áreas da computação [Win et al., 2011]. Em robótica, por exemplo, localizar um robô consiste em identificar sua posição com relação a um mapa conhecido. Um robô só pode ser considerado autônomo de fato, se conseguir localizar-se no ambiente em que está [Cox, 1989]. Localização também é essencial para aplicações sensíveis ao contexto¹, uma vez que a posição de um usuário é uma das mais importantes informações de contexto que pode ser utilizada [Han et al., 2008]. Nessas e em outras áreas a informação de localização é fundamental.

O problema da localização em ambientes externos pode ser resolvido de forma razoável utilizando-se o sistema de posicionamento global (*Global Positioning System* - GPS, em inglês). Entretanto, o sinal GPS é muito fraco em ambientes internos devido a falta de linha de visada entre os satélites e o receptor. Diante do grande número de aplicações que podem se beneficiar das informações de localização em

¹Aplicações sensíveis ao contexto são aquelas que adaptam seu comportamento dependendo de características dinâmicas (do ambiente, do usuário, etc) [Harter et al., 1999].

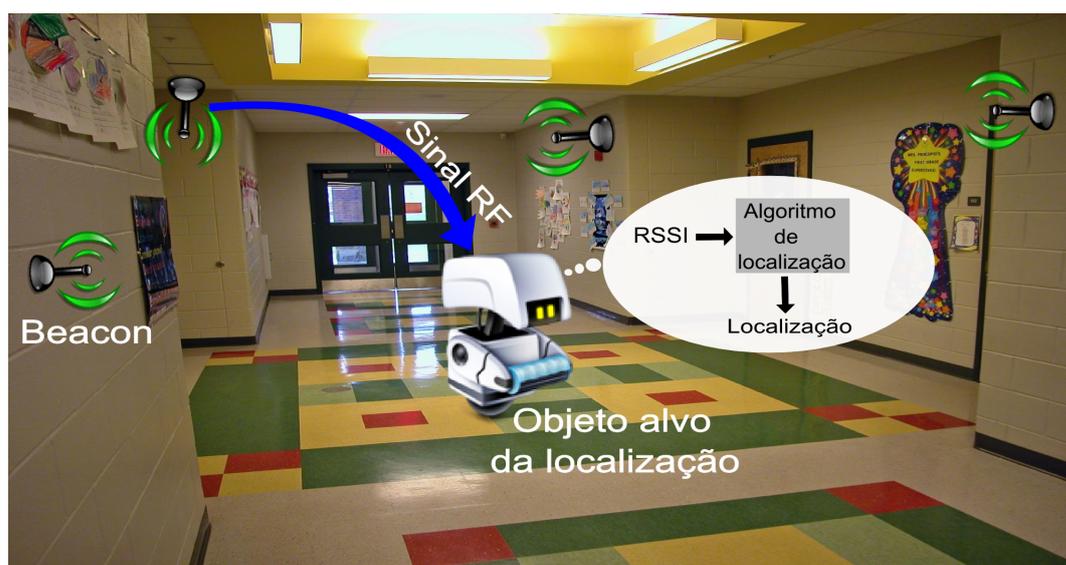


Figura 1.1. Localização utilizando RSSI. O processo pode ser dividido em duas etapas. Primeiro, o usuário (ou objeto alvo da localização) recebe o sinal RF dos *beacons* distribuídos no ambiente. Em seguida, um algoritmo de localização utiliza o valor da potência do sinal recebido para estimar a posição do usuário. O usuário pode ser um robô ou uma pessoa portando um dispositivo computacional com interface compatível com a mesma tecnologia dos *beacons*.

ambientes internos, a criação de sistemas de localização que funcionem nesses ambientes é essencial [Moayeri et al., 2011].

Recentemente, devido aos avanços tecnológicos e à grande utilização de dispositivos sem fio em prédios industriais, comerciais e campi universitários, sistemas de localização que utilizam o sinal sem fio de radiofrequência (RF) foram propostos como uma possível solução para o problema de localização em ambientes internos [Bahl & Padmanabhan, 2000; Youssef & Agrawala, 2005; Chintalapudi et al., 2010]. Já existem, inclusive, soluções comerciais disponíveis (três sistemas muito conhecidos são [Ekahau, 2010], [SkyHook, 2011] e [Google Latitude, 2011])².

O modo mais comum de fazer localização baseada em sinal RF é utilizar a potência do sinal recebido (*Received Signal Strength Indication* - RSSI, em inglês) de um transmissor presente no ambiente. A ideia é utilizar a relação existente entre o RSSI e a distância entre transmissor e receptor. A Figura 1.1 ilustra, conceitualmente, como esse processo de localização ocorre. Na figura, são mostrados dispositivos compatíveis com tecnologias RF (chamados de *beacons*) distribuídos em um ambiente interno. O usuário recebe sinais RF dos *beacons* e

²O sistema Skyhook e o Google latitude também podem utilizar informações de satélite e torres de celular, além daquelas obtidas de dispositivos compatíveis com a tecnologia Wi-Fi.

utiliza o RSSI associado a esses sinais como entrada de um algoritmo de localização³ que irá gerar uma estimativa final de sua posição.

Nos últimos 11 anos, diversos sistemas de localização baseados no conceito ilustrado na Figura 1.1 foram propostos e implementados. Em geral, esses sistemas são baseados em uma das diversas tecnologias RF existentes (e.g., Bluetooth ([Diaz et al., 2010]), Zigbee ([Yao et al., 2007]), Wi-Fi ([Chintalapudi et al., 2010]), etc.). Poucos trabalhos⁴ dedicaram-se a fazer um estudo mais detalhado da utilização de múltiplas tecnologias RF para fazer a localização. Sendo assim, a proposta desse trabalho é investigar as vantagens e desafios de utilizar múltiplas tecnologias RF para fazer localização em ambientes internos. Mais especificamente, as tecnologias Bluetooth, Zigbee e Wi-Fi serão utilizadas. Essas tecnologias foram escolhidas por sua crescente disponibilidade⁵. A definição do problema é apresentada na próxima seção.

1.1 Definição do Problema

O problema de localização abordado nesta dissertação pode ser definido da seguinte forma:

Seja um ambiente interno I e um robô R , cuja posição é desconhecida, inserido nesse ambiente. Considere que R possui encoders (hodometria) e um conjunto de sensores $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{n_s}\}$. Considere também que existe um conjunto $B = \{B_1, B_2, \dots, B_{n_b}\}$ de n_b beacons distribuídos no ambiente I . Suponha que a posição (x_{B_j}, y_{B_j}) , de cada beacon B_j , $1 \leq j \leq n_b$, seja conhecida. A tarefa consiste em obter a posição $P_R = (x_R, y_R)$ ⁶ do robô R usando as informações obtidas dos beacons pelos sensores considerando que (i) cada beacon é um dispositivo com funcionalidade sem fio que implementa um, e somente um, dos seguintes padrões: Zigbee, Wi-Fi e Bluetooth; e (ii) os sensores S_1, S_2, \dots, S_{n_s} do robô estimam a potência (RSSI) de um sinal enviado pelos beacons.

³Obviamente, nem todo algoritmo de localização irá funcionar tomando como entrada valores de RSSI. Nesta dissertação, o termo refere-se a um conjunto limitado de algoritmos que aceitam como entrada esse tipo de informação.

⁴Os trabalhos que utilizam mais de uma tecnologia e que de alguma forma estão relacionados ao trabalho apresentado nesta dissertação são discutidos na Seção 2.5.

⁵Embora Zigbee não seja tão disponível como Wi-Fi e Bluetooth nos ambientes usuais, esta tecnologia está se tornando muito popular em anos recentes e acredita-se que será uma das tecnologias sem fio pervasivas do futuro [MIT, 2003].

⁶Neste trabalho, será considerado apenas o problema de localização em duas dimensões. A generalização para o caso 3D é um tema para trabalhos futuros.

É importante destacar que muitas questões podem ser avaliadas na investigação do problema da localização. Neste trabalho os esforços serão focados em uma questão específica:

- Quais as vantagens e desafios de se utilizar múltiplas tecnologias RF para realizar a localização?

Com o objetivo de investigar possíveis respostas para essa pergunta, serão implementados e avaliados dois métodos para realizar a localização:

1. Método baseado em mapa de assinaturas (apresentado no Capítulo 3)
2. Método baseado em um modelo de propagação do sinal de RF (apresentado no Capítulo 4)

1.2 Motivação

A principal motivação deste trabalho é o fato de que localizar um usuário é fundamental para um grande número de aplicações e atividades. Portanto, é sempre necessário investigar melhor aspectos envolvidos na resolução deste importante problema. Além disso, é possível identificar outras duas motivações secundárias. Primeiro, a proliferação de dispositivos compatíveis com tecnologias RF nos prédios e ambientes internos indica um futuro em que essas tecnologias serão ubíquas e, portanto, utilizá-las para realizar localização nesses ambientes é uma opção interessante. Por exemplo, a Figura 1.2 mostra a distribuição de pontos de acesso compatíveis com a tecnologia Wi-Fi ao redor do mundo, de acordo com um banco de dados do serviço de localização Skyhook. São mais de 250 milhões de pontos de acesso registrados. Diante dessa tendência de alta disponibilidade e do baixo custo (em relação a outras soluções para o problema da localização), a utilização dessas tecnologias para localizar dispositivos móveis (por exemplo, robôs) em ambientes internos torna-se muito atrativa. Como existem múltiplas tecnologias é necessário entender os aspectos envolvidos na utilização conjunta dessas tecnologias para realizar a localização. Segundo, grande parte dos dispositivos eletrônicos possuem mais de uma interface sem fio atualmente. Sendo assim, mecanismos de localização que se beneficiem dessa diversidade de interfaces são desejáveis e devem ser estudados em todos os seus aspectos.

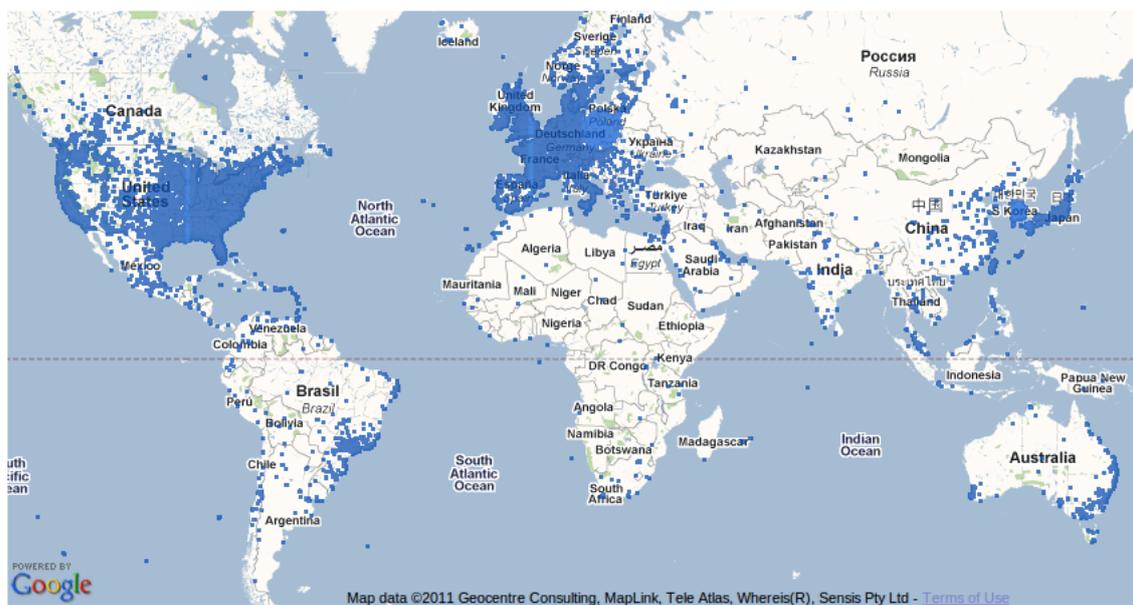


Figura 1.2. Amostra da distribuição de pontos de acesso Wi-Fi no mundo. Os pontos azuis representam a posição de pontos de acesso Wi-Fi que fazem parte do banco de dados do serviço de localização SkyHook. O banco de dados é constituído por mais de 250 milhões de pontos de acesso. Reproduzido de [SkyHook Coverage, 2011].

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é avaliar as vantagens e desafios da utilização de múltiplas tecnologias RF para realizar a localização de robôs móveis em ambientes internos.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral do trabalho será necessário alcançar os seguintes objetivos específicos:

1. Implementar e avaliar o método de mapa de assinaturas, adaptando-o para a utilização de múltiplas tecnologias RF. Avaliar quais os principais fatores que influenciam a qualidade da localização obtida utilizando esse método.
2. Implementar e avaliar um método de localização baseado em modelo de propagação do sinal de RF. Avaliar quais os principais fatores que influenciam a qualidade da localização obtida utilizando esse método.

3. Comparar os dois métodos, nos casos em que isso for possível e pertinente.

1.4 Contribuições

As principais contribuições desta dissertação são:

- Avaliação da combinação de três tecnologias sem fio baseadas em RF, introduzindo dispositivos compatíveis com Zigbee. Outros trabalhos geralmente são baseados apenas nas tecnologias Wi-Fi e/ou Bluetooth ou Wi-Fi e RFID. A combinação de três tecnologias permite avaliar melhor o potencial e os desafios da utilização de múltiplas tecnologias sem fio para fazer localização.
- Demonstração de que a interferência entre as tecnologias Wi-Fi e Bluetooth pode levar a uma perda de exatidão na localização.
- Proposta de um processo de integração de mapas de diferentes tecnologias RF⁷. O processo consiste em concatenar os mapas de cada tecnologia.
- Estudo da influência de diversos parâmetros na qualidade da localização.

1.5 Organização do Texto

Além do capítulo de introdução, esta dissertação contém mais quatro capítulos, organizados da forma apresentada a seguir.

Capítulo 2. Esse capítulo está dividido em duas partes. Na primeira parte são apresentados conceitos fundamentais que serão utilizados neste trabalho. São discutidos sistemas de localização baseados em RF, os principais métodos utilizados para fazer localização e os algoritmos mais relevantes. Na segunda parte, é apresentada uma revisão bibliográfica de trabalhos relacionados à localização baseada em RF. Primeiro são apresentados trabalhos que utilizam apenas uma tecnologia RF para realizar a localização. A seguir, trabalhos que utilizam múltiplas tecnologias são apresentados. Por fim, é discutida a aplicação de localização baseada em RF à robótica móvel.

Capítulo 3. Nesse capítulo é apresentado o desenvolvimento, implementação e avaliação experimental do método baseado em mapa de assinaturas. Inicialmente, é descrita uma visão geral da metodologia utilizada. Os procedimentos realizados

⁷O processo de integração é utilizado apenas no método baseado em mapa de assinaturas.

para fazer coleta de dados, o algoritmo de localização utilizado e o cenário no qual ocorreram os experimentos são apresentados. A seguir, os resultados experimentais são analisados. As análises mostram que (i) a exatidão da localização aumenta quando o número de *beacons* RF utilizados aumenta; (ii) o método de mapa de assinaturas é relativamente robusto; (iii) a combinação de tecnologias pode gerar localização com menos erros que a utilização das tecnologias individualmente e (iv) a interferência entre as tecnologias pode levar a uma diminuição na qualidade da localização (especificamente, são apresentados resultados considerando as tecnologias Bluetooth e Wi-Fi).

Capítulo 4. Nesse capítulo é apresentado o desenvolvimento, implementação e avaliação experimental do método baseado em modelos de propagação. Inicialmente, é descrita uma visão geral da metodologia utilizada. Em seguida, o modelo de propagação utilizado (modelo com atenuação pela distância) é introduzido. Depois, é mostrado como os métodos de trilateração e o filtro de Kalman Estendido utilizam o resultado da aplicação desse modelo de propagação para gerar a estimativa final de localização do robô. As análises dos resultados foram divididas em duas partes. Na primeira parte foi feito um estudo, em simulação, dos fatores que mais influenciam a qualidade dos resultados. Os principais fatores associados ao erro de localização são (i) o número de *beacons* utilizados; (ii) a configuração geométrica dos *beacons* e (iii) a exatidão do modelo de propagação do sinal de RF (que pode ser diretamente associado à qualidade da estimação de distância entre os *beacons* e o objeto alvo da localização). Na segunda parte, considera-se a utilização de múltiplas tecnologias. É mostrado um exemplo de situação em que a utilização de múltiplas tecnologias é benéfica. Por fim, são apresentados resultados de três experimentos reais.

Capítulo 5. São apresentadas as considerações finais, conclusões e algumas possíveis extensões deste trabalho.

Capítulo 2

Localização em Ambientes Internos Utilizando Radiofrequência

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre localização em ambientes internos utilizando radiofrequência. Os objetivos deste capítulo são:

1. Oferecer os conceitos básicos necessários para o entendimento do trabalho apresentado nesta dissertação
2. Apresentar trabalhos relevantes na área de localização em ambientes internos baseada em RF, focando especialmente naqueles que utilizam RSSI.

O capítulo está organizado como apresentado a seguir. Inicialmente, na Seção 2.1, é apresentada uma visão geral de sistemas de localização em ambientes internos que utilizam tecnologias sem fio. Como o trabalho é focado na tecnologia de radiofrequência, as outras alternativas (infra-vermelho, ultrassom, UWB, etc.) são apenas mencionadas. A seguir, na Seção 2.2, são descritos os componentes básicos de um sistema de localização baseado em RF. Após identificar e descrever os componentes, serão apresentados, na Seção 2.3, os métodos mais usados. Na Seção 2.4, serão apresentados trabalhos que desenvolveram sistemas de localização baseados nas três tecnologias que serão utilizadas neste trabalho: Ethernet sem fio (Wi-Fi), Zigbee e Bluetooth. Logo após, na Seção 2.5, são apresentados alguns trabalhos que utilizam múltiplas tecnologias sem fio para realizar a localização baseada em RF em ambientes internos. Especial atenção é dada a esses trabalhos, uma vez que estão relacionados de forma mais próxima ao trabalho apresentado

nesta dissertação. Na Seção 2.6 é discutida a aplicação de localização baseada em RF em casos em que o usuário é um robô móvel, como ocorre nesta dissertação. Nessa seção também são apresentados alguns trabalhos relevantes sobre o tema. A Seção 2.7 finaliza este capítulo com a apresentação de um sumário.

2.1 Introdução

O conhecimento da localização de um usuário ou objeto é fundamental para várias aplicações de diversas áreas da computação [Hightower & Borriello, 2001; Vossiek et al., 2003; Liu et al., 2007; Lakafosis & Tentzeris, 2009]. Na robótica, por exemplo, a informação de localização de um robô é fundamental para permitir que ele seja, de fato, autônomo [Cox, 1989].

Em ambientes externos o problema da localização é resolvido de forma razoável usando GPS (Global Positioning System). Infelizmente, em ambientes internos, o sinal de GPS não tem potência suficiente para permitir que seja feita a localização. Desta forma, é necessário desenvolver outros tipos de solução para localizar um usuário em ambientes internos.

Geralmente as abordagens utilizadas para realizar a localização em ambientes internos utilizam tecnologias sem fio. Como mostrado na Figura 2.1 as soluções sem fio já desenvolvidas para sistemas de localização em ambientes internos utilizam diferentes tecnologias. As primeiras soluções propostas utilizavam sistemas baseados em infravermelho e ultrassom [Want et al., 1992; Harter et al., 1999; Priyantha, 2005].

Por exemplo, em [Want et al., 1992] é apresentado o sistema *Active badge*. O *Active badge* utiliza infravermelho para realizar localização em um prédio. Cada usuário carrega consigo *badges* que transmitem informações sobre a localização do usuário para um servidor central. O servidor processa essa informação e a torna disponível para outras aplicações. As informações são coletadas por sensores que são espalhados pelo ambiente. A localização é feita relacionando a localização do usuário à localização (sala) do sensor que reportou o sinal daquele usuário. A localização de cada *badge* pode ser buscada no servidor por aplicações remotas. A Figura 2.2 mostra um diagrama do *badge* e dos sensores que são implantados no ambiente.

Outro exemplo é o sistema *Active Bat*[Harter et al., 1999]. Esse sistema utiliza ultrassom para realizar a localização. O sistema é semelhante ao *Active Badge*. Vários sensores são instalados no teto do ambiente. Um dispositivo carregado pelo usuário

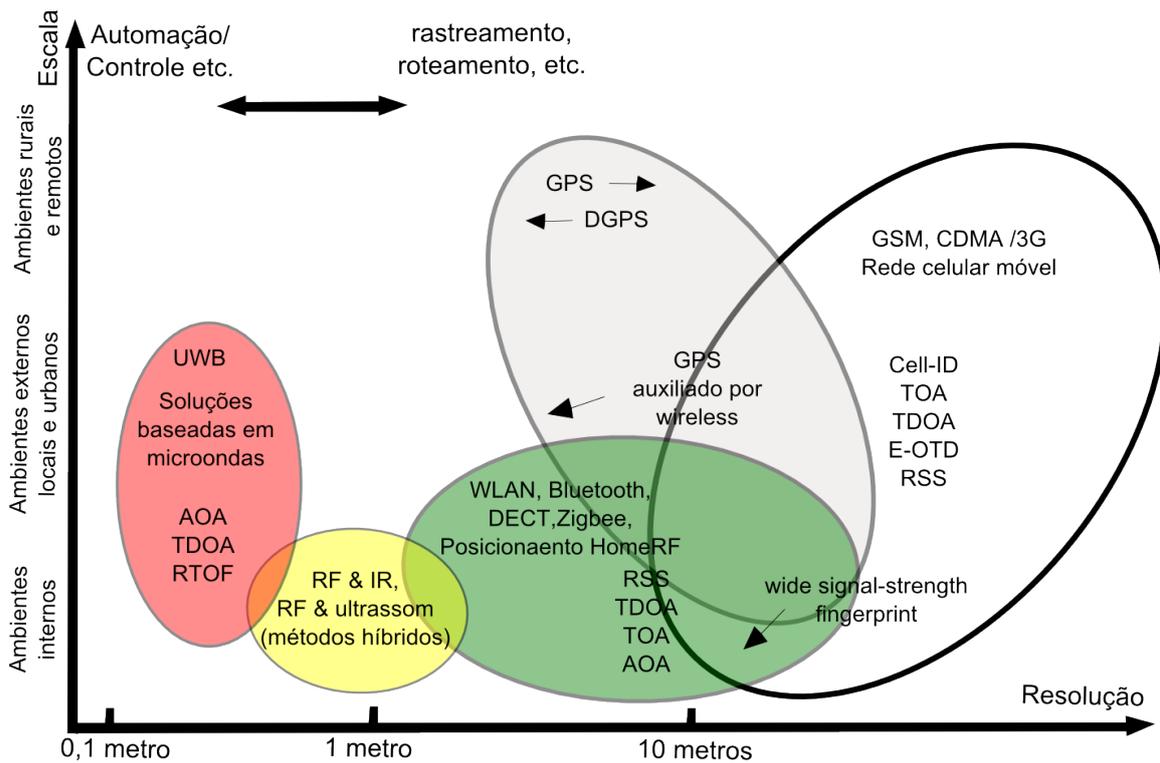


Figura 2.1. Sistemas de localização baseados em tecnologias sem fio. Está fora do escopo deste trabalho uma discussão detalhada de todas essas abordagens. Serão discutidos apenas sistemas baseados em radiofrequência. Adaptado de [Liu et al., 2007, Figura 6].

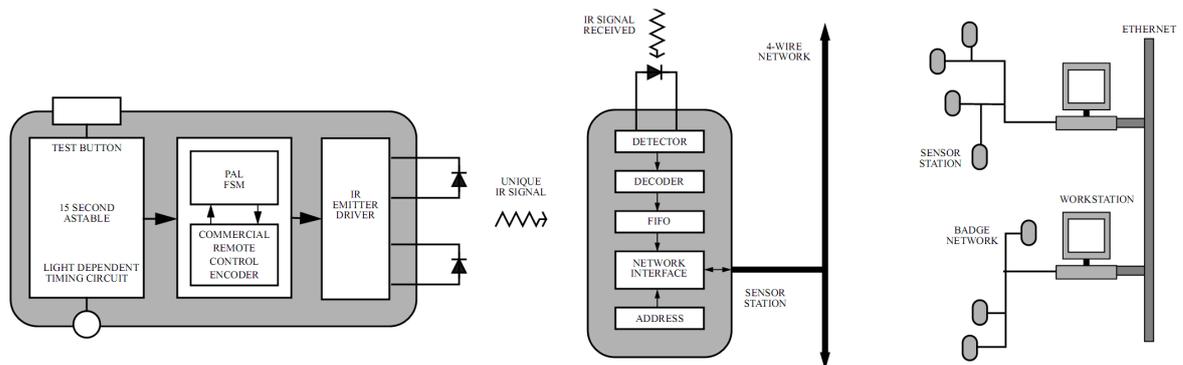


Figura 2.2. Sistema *Active Badge* de localização. (esquerda) Diagrama do *badge* carregado pelo usuário. (direita) Diagrama dos sensores e representação da rede por onde o sinal passa até o servidor. Reproduzido de [Want et al., 1992].

emite sinais ultrassom que são coletados pelos dispositivos sensores. Quando pelo menos três sensores coletam o sinal, é possível fazer trilateração e a posição do usuário é determinada com exatidão. A Figura 2.3 mostra o dispositivo carregado pelo usuário e os dispositivos instalados no teto para detectarem os sinais ultrassom.

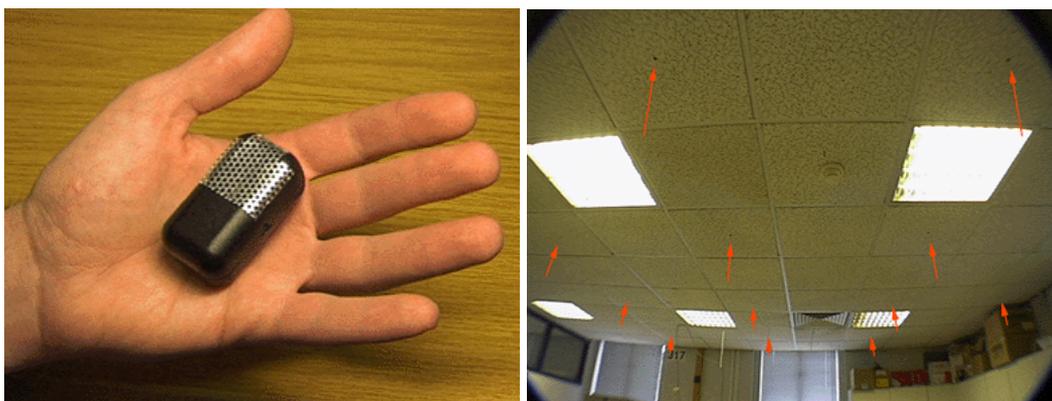


Figura 2.3. Sistema *Active Bat* de localização. (esquerda) O sensor que o usuário deve carregar. (direita) Sensores colocados no teto para detectar o sinal emitido pelo sensor carregado pelo usuário. Reproduzido de [Harter et al., 1999].

A maior desvantagem desses tipos de sistemas é que seu custo de implantação e manutenção pode ser proibitivo, principalmente se o sistema for implementado em larga escala. Assim, embora essas soluções possam ser úteis para aplicações específicas, elas não servem como solução para ambientes maiores e/ou nos quais não seja possível implantar a infraestrutura necessária para seu funcionamento.

Mais recentemente, soluções baseadas em radiofrequência começaram a ser desenvolvidas [Bahl & Padmanabhan, 2000; Haeberlen et al., 2004]. A criação de novos sistemas baseados em radio frequência é atrativa porque dispositivos que utilizam essa tecnologia estão se multiplicando nos prédios, campi universitários e outros ambientes internos. A presença deste tipo de infraestrutura no ambiente reduz o custo de implantação da solução de localização, uma vez que não é necessário estruturar o ambiente, como ocorre nas soluções baseadas em infravermelho e ultrassom.

Ao longo deste capítulo serão utilizados diversos conceitos. Alguns desses conceitos são especialmente relevantes e, conseqüentemente, é importante estabelecer com clareza e precisão os seus significados. Sendo assim, estes conceitos serão definidos a seguir. Após as definições, na Seção 2.2 são apresentados os componentes básicos de um sistema de localização baseado em RF.

Definição 1. Os termos “usuário” e/ou “objeto alvo” referem-se a entidade que está sendo localizada.

Definição 2. Um beacon é uma entidade de comunicação do sistema de localização cuja localização é conhecida. Em muitos métodos de localização, outras entidades utilizam as informações fornecidas pelos beacons para poder se localizar.

2.2 Componentes de um sistema de localização que utiliza Radio Frequência

A Figura 2.4 mostra os componentes de um típico sistema de localização que utiliza radiofrequência.

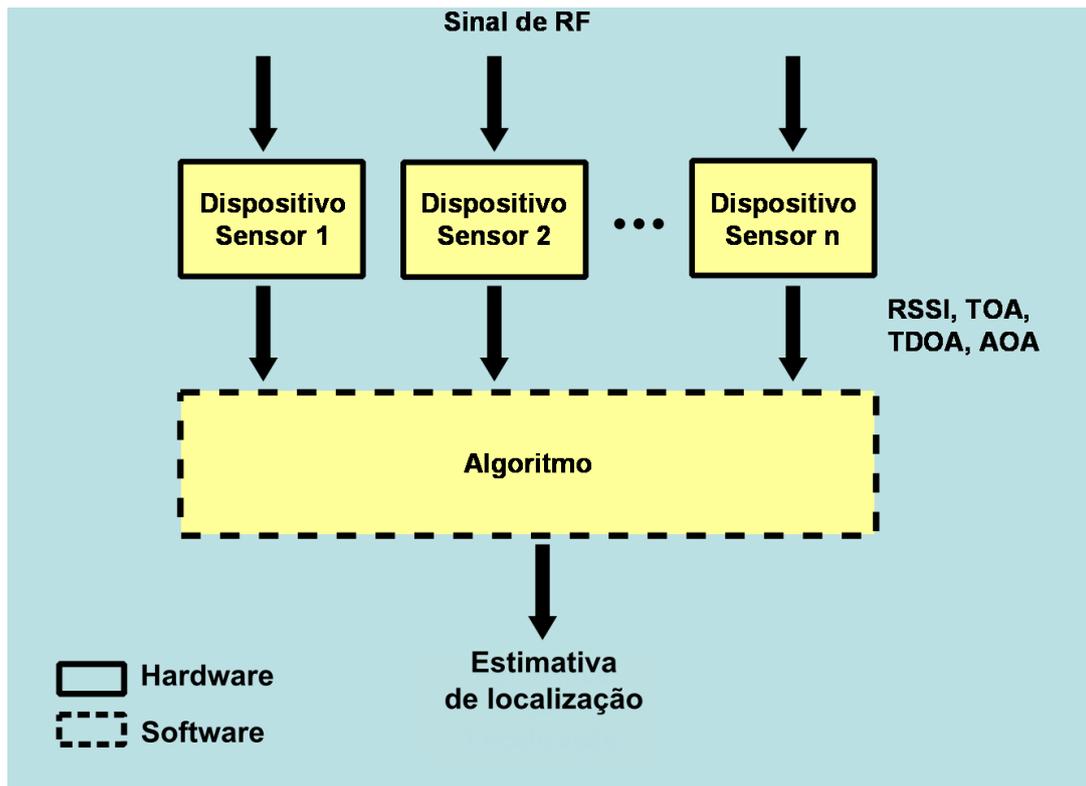


Figura 2.4. Componentes de um sistema de localização baseado em radiofrequência. A figura é baseada em [Pahlavan et al., 2002, Figura 1].

Inicialmente, os dispositivos coletam o sinal de radiofrequência, que é então utilizado para estimar a distância ou ângulo (dependendo da métrica utilizada - RSSI, TOA, TDOA, AOA) entre o objeto alvo e outros objetos cuja localização é conhecida. Essa informação estimada é utilizada pelo algoritmo de localização para estimar a posição do objeto alvo. Nem todos os métodos exigem que a distância ou ângulo sejam inferidas para realizar a localização. Na Seção 2.3.3 será descrito o método de mapa de assinaturas que não utiliza nenhuma informação de distância ou ângulo.

Como mostrado na Figura 2.4, existem diferentes técnicas para fazer a estimação de localização utilizando-se o sinal de radiofrequência. Essas técnicas serão descritas na próxima seção.

2.3 Métodos Para Realizar Localização Utilizando RF

Segundo [Liu et al., 2007], os sistemas podem ser classificados, de acordo com a técnica utilizada, em três tipos: baseado em distância ou ângulo, análise de cena e baseado em proximidade.

2.3.1 Utilização de Distância ou Ângulo Para Estimar a Localização

Os métodos que utilizam medidas de distância ou ângulo fazem uso de propriedades geométricas para estimar a localização de um objeto ou pessoa. Geralmente, pode-se identificar dois métodos baseados nessa ideia: trilateração e triangulação.

2.3.1.1 Trilateração

Trilateração é um método geométrico que permite calcular a posição de um ponto cuja posição não é conhecida utilizando-se as distâncias entre esse ponto e outros três pontos conhecidos. Um dos desafios práticos que ocorrem neste tipo de abordagem é estimar com precisão a distância entre os pontos. Muitas técnicas já foram propostas para fazer essa estimativa. Algumas delas são (i) tempo de chegada (TOA - do inglês, *Time Of Arrival*), (ii) diferença do tempo de chegada (TDOA - do inglês, *Time Difference of Arrival*), (iii) tempo de ida e volta (RTOF - do inglês, *Round Trip Time of Flight*) e (IV) utilização da potência do sinal recebido, ou, RSSI.

Tempo de chegada - TOA. Nesta abordagem calcula-se o tempo que o sinal de radiofrequência demora para percorrer a distância entre emissor e receptor. Como a velocidade de propagação do sinal é conhecida e constante (velocidade da luz), a distância entre emissor e receptor pode, então, ser calculada no receptor. A Figura 2.5 ilustra o conceito utilizado na técnica de TOA. Uma das dificuldades deste método é a necessidade de sincronização entre os relógios do emissor e receptor. Na maioria das vezes essa sincronização é uma tarefa não trivial. No caso da Figura 2.5, após as distâncias D_1 , D_2 e D_3 serem estimadas, a estimativa final de localização é obtida utilizando métodos geométricos e/ou de otimização.

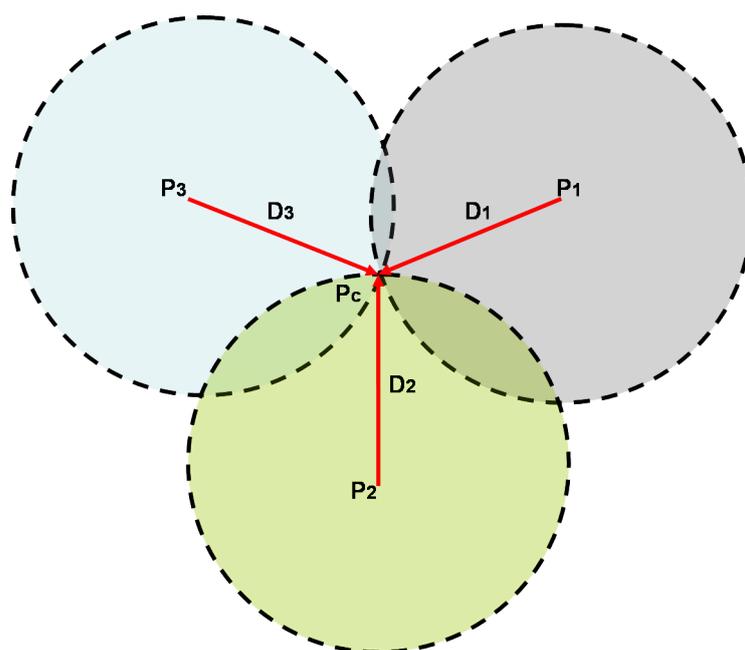


Figura 2.5. Localização baseada em medição do tempo de chegada. O objeto alvo, P_c , estima as distâncias D_1 , D_2 e D_3 entre ele e os três *beacons* P_1 , P_2 e P_3 , baseado no tempo que o sinal leva para percorrer as distâncias. Os relógios de P_c e dos *beacons* devem estar sincronizados para que o método funcione.

Diferença entre os tempos de chegada - TDOA. Diferença entre tempos de chegada é uma técnica baseada no cálculo da diferença entre os tempos de chegada de um sinal enviado por um emissor a múltiplos receptores com localização conhecida. Em geral o objeto alvo da localização é o emissor, cujo sinal é recebido por três ou mais sensores, que devem estar sincronizados entre si. Utilizando as diferenças entre os tempos de chegada é possível calcular a localização exata do emissor. Uma outra forma de técnica TDOA existente é a utilização da diferença entre o tempo de chegada de múltiplos sinais (de naturezas diferentes) de um emissor em um mesmo receptor. No sistema *cricket*, apresentado em [Priyantha, 2005], o emissor envia dois sinais, simultaneamente, para o receptor. Um dos sinais é um sinal de RF e o outro é um sinal de ultrassom. Como o sinal de RF propaga-se mais rápido no ar, ele chega primeiro ao receptor. Após algum tempo, o sinal de ultrassom chega e o receptor usa a diferença entre os tempos de chegada para estimar a distância entre o emissor e receptor. Posteriormente essa distância estimada é utilizada para calcular a posição do emissor.

Tempo de ida e volta - RTOF. RTOF funciona de forma similar ao TOA. Contudo,

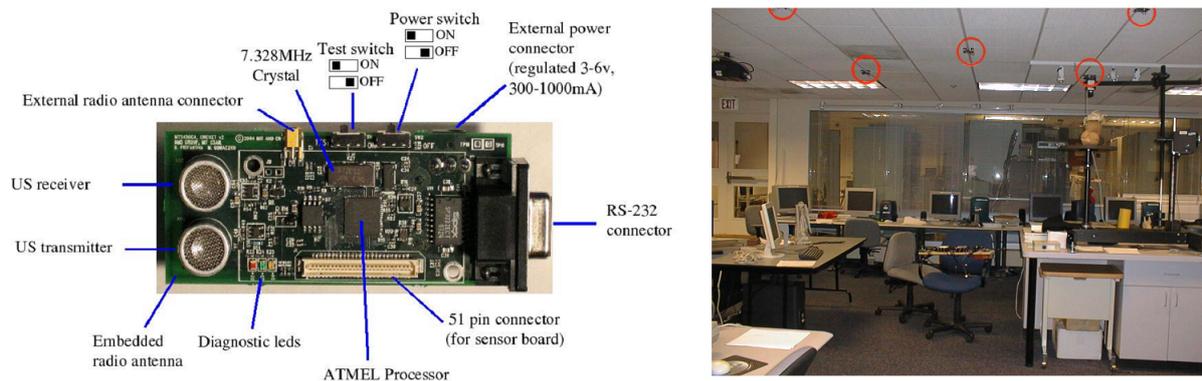


Figura 2.6. Sistema *Cricket* de localização. (esquerda) *Cricket* hardware. (direita) Um exemplo de distribuição de nós receptores no teto de um laboratório. Os nós receptores obtêm a localização do nó emissor após calcular o TDOA entre o sinal de RF e o sinal de ultrassom enviados pelo emissor e fazer trilateração. Reproduzido de [Priyantha, 2005].

o método considera o tempo de ida e volta do sinal (ver Figura 2.7) e não apenas o tempo de ida. Desta forma, a necessidade de sincronização entre transmissor e receptor é reduzida. Um dos problemas deste método é o cálculo do atraso que pode acontecer devido ao tempo necessário para que o receptor receba o sinal e o envie de volta. Embora esse atraso possa ser desconsiderado em sistemas que operam em grande escala, para sistemas de pequeno alcance, um pequeno atraso pode gerar grandes erros na estimativa da distância entre emissor e receptor. Por este motivo, esta técnica não é adequada para sistemas de pequeno alcance, a menos que seja possível estimar, com boa exatidão, o atraso causado pelo processamento de informações no receptor.

RSSI. O RSSI pode ser utilizado para fazer localização de dispositivos que enviem sinais de radio frequência. Quando um emissor envia um sinal, o receptor calcula a potência no qual o sinal é recebido e utiliza este valor para estimar a distância entre ele e o emissor. Usualmente, são utilizados dois tipos de técnicas para realizar a tarefa de localizar o usuário usando RSSI. A primeira é baseada na utilização de modelos matemáticos de propagação do sinal. Estes modelos tentam relacionar a distância entre o transmissor e receptor à potência do sinal recebido. A segunda é baseada na utilização de um mapa de assinaturas do sinal de radiofrequência. Também foram feitas tentativas de combinar as duas abordagens [Kwon et al., 2004]. A abordagem baseada em modelos de propagação será descrita a seguir e

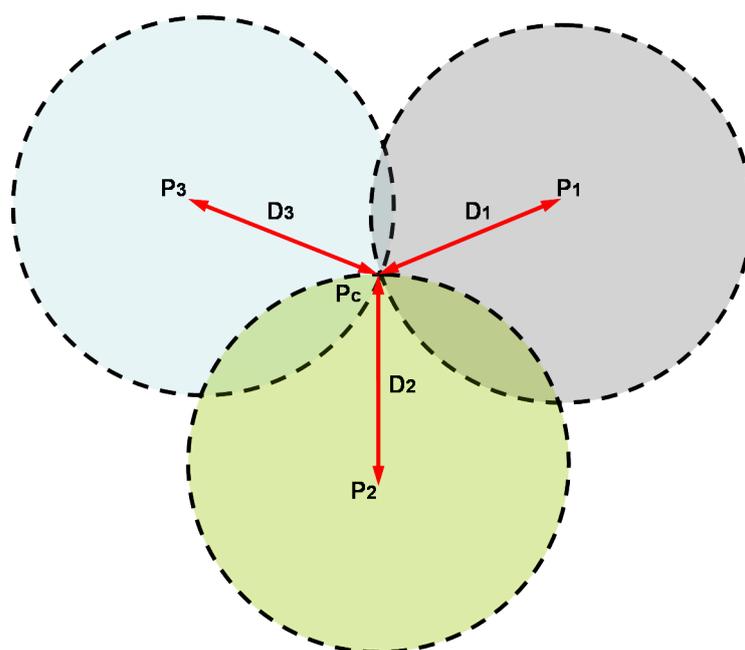


Figura 2.7. Localização baseada em medição do RTOF. O método funciona de forma similar ao TOA. A diferença é que o objeto alvo, P_c , envia um sinal que é “ecoado” pelos *beacons* de volta para ele. P_c utiliza o tempo de ida e volta para estimar a distância entre ele e os *beacons*. Dessa forma, a necessidade de sincronização é reduzida.

a abordagem baseada em mapas de assinaturas será descrita na Seção 2.3.3.

Nos métodos baseados na utilização de um modelo de propagação, o objetivo é utilizar modelos que relacionem o RSSI à distância entre transmissor e receptor. Existe uma correlação entre RSSI e distância, de modo que, em geral, quanto maior a distância entre transmissor e receptor, menor é o RSSI de uma mensagem recebida. Entretanto, a relação entre RSSI e distância não é facilmente modelável, devido a fenômenos que influenciam o sinal de radio, como *multipath*, pouca probabilidade de haver linha de visada entre o emissor e transmissor e características específicas do ambiente, como objetos se movendo e superfícies reflexivas. Tais fenômenos são particularmente mais pronunciados em ambientes internos [Liu et al., 2007]. Sendo assim, embora a utilização de modelos de propagação seja uma opção viável e de baixo custo, a qualidade da localização obtida utilizando-se tais modelos muitas vezes não é satisfatória. Dentre as alternativas propostas para minimizar este problema destacam-se o pré-processamento do sinal de RSSI [Cabrera-Mora & Xiao, 2008] e modificações no hardware do receptor [Graefenstein & Bouzouraa, 2008]. A primeira opção processa o sinal de RSSI coletado com o objetivo de “suavizar” suas variações e torná-lo mais adequado à utilização do modelo. A segunda realiza

diversas mudanças no nó sensor para reduzir o ruído e outros efeitos intrínsecos ao meio sem fio.

2.3.1.2 Triangulação

Triangulação é o método geométrico que permite calcular a posição de um objeto baseado nos ângulos formados entre esse objeto e outros objetos de posição conhecida. Especificamente, no caso da utilização de sinais de RF a técnica utilizada é para fazer triangulação é chamada de ângulo de chegada (AOA - do inglês, *Angle Of Arrival*). Essa abordagem estima a posição do objeto alvo utilizando o ângulo (ou direção) no qual o sinal de RF enviado pelo objeto é recebido em, no mínimo, outros 2 receptores (3, para o caso 3D). A Figura 2.8 ilustra o conceito utilizado na técnica de AOA.

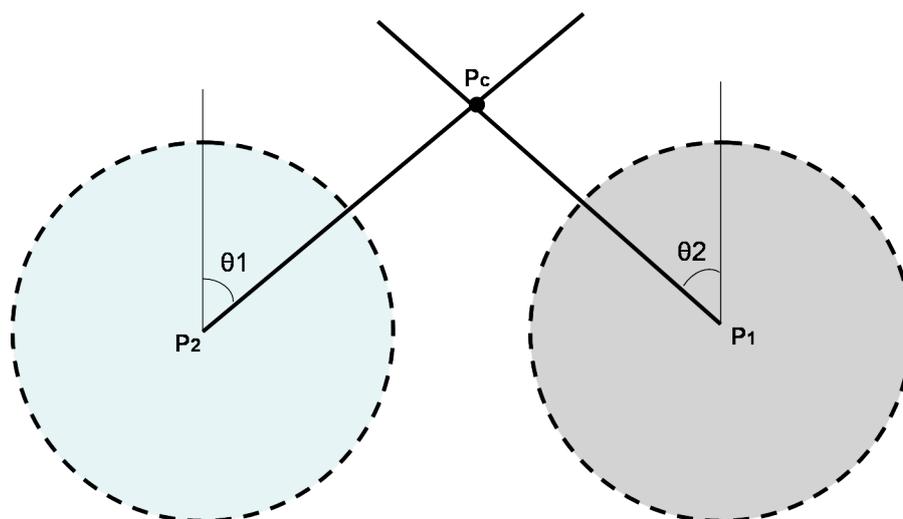


Figura 2.8. Localização baseada na medição do ângulo no qual o sinal enviado pelo objeto alvo é recebido em outros dois sensores. A localização do objeto alvo é obtida calculando-se a interseção das linhas direcionais (representando a direção na qual o sinal de RF foi recebido) com ângulos θ_1 e θ_2 que conectam o objeto aos receptores.

A vantagem deste método é que nenhum tipo de sincronização é necessária para que ele funcione. As principais desvantagens são a necessidade de hardware específico (antenas direcionais ou arranjo de antenas) que, geralmente, tem custo elevado [Rohrig & Muller, 2009] e a degradação da qualidade da localização quando o objeto alvo está muito distante dos receptores [Liu et al., 2007].

2.3.2 Proximidade

A abordagem baseada em proximidade não utiliza, diretamente, distâncias ou ângulos. Nos sistemas baseados em proximidade a localização do objeto alvo é associada com a posição do sensor mais próximo do objeto. O sistema *Active Badge* [Want et al., 1992], apresentado anteriormente na Seção 2.1, é um exemplo de sistema baseado em proximidade. A maior vantagem deste tipo de abordagem é a sua simplicidade de implementação. A desvantagem é que, para obter uma localização com boa resolução, é necessário a instalação de muitos sensores no ambiente, o que aumenta o custo de implantação e manutenção do sistema. Entretanto, dependendo dos requisitos da aplicação, esta abordagem pode ser uma opção viável e satisfatória.

2.3.3 Análise de Cena

Antes de descrever o método de análise de cena é importante estabelecer a seguinte definição.

Definição 3. Seja $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{n_c}\}$ o conjunto de valores da característica c do ponto p no ambiente I . Então, C é chamado de assinatura de p em I com relação à característica c .

O método de análise de cena utiliza a assinatura de determinados pontos do ambiente para realizar a localização. Em localização baseada em RF, a assinatura de um ponto p' no ambiente corresponde ao vetor de valores de RSSI que se obtêm em p' . Cada valor do vetor é obtido de um *beacon* diferente. Ou seja, a assinatura de um ponto no ambiente consiste no vetor v que contém os valores de RSSI coletados naquele ponto para cada *beacon* RF disponível. Desta forma, cada ponto tem sua assinatura e a ideia do método é criar um mapa de assinaturas de diversas posições do ambiente.

Definição 4. Seja $M = \{C_{(x_1, y_1)}, C_{(x_2, y_2)}, \dots, C_{(x_{m_c}, y_{m_c})}\}$ o conjunto de assinaturas $C_{(x_i, y_i)}$ de todos os pontos (x_i, y_i) , $1 \leq i \leq m_c$, do ambiente I , com relação à característica c . M é chamado de mapa de assinaturas de I , com relação à característica c .

A Tabela 2.1 mostra um exemplo do “mapa” de assinaturas de um ambiente considerando o RSSI como característica. Cada linha da tabela representa a assinatura no local do ambiente representado pelas coordenadas (x_i, y_i) . Por exemplo, na posição (x_3, y_3) , o RSSI do sinal recebido do *beacon* B_1 foi -48, de B_2 foi -60 e assim sucessivamente.

Tabela 2.1. Exemplo de um “mapa” de assinaturas, considerando o sinal de RSSI recebido de diferentes *beacons*. B_j , $1 \leq j \leq n$, representa um *beacon* e (x_i, y_i) , $1 \leq i \leq m$, representa as coordenadas de um ponto no ambiente.

Coord.	B_1	B_2	...	B_n
(x_1, y_1)	-45	-60		-88
(x_2, y_2)	-47	-56		-86
(x_3, y_3)	-48	-60		-87
...
(x_m, y_m)	-79	-70		-53

O mapa de assinaturas é criado numa fase do processo de localização usualmente chamada de fase de treinamento ou fase *offline*. Numa segunda fase, chamada de fase de testes ou fase *online*, o sistema será, de fato, utilizado. Nessa fase de testes, o usuário coleta a assinatura em uma posição qualquer do ambiente e, por meio da utilização de algoritmos, compara a assinatura que acabou de obter com as assinaturas presentes no mapa de assinaturas, previamente armazenado, na fase de treinamento. O algoritmo retorna como posição mais provável aquela que mais se aproxima da posição medida na fase de teste. A Figura 2.9 resume o método baseado em mapa de assinaturas, ilustrando as fases de treinamento e testes.

Em geral, os métodos baseados em mapa de assinaturas são mais exatos que os métodos baseados em modelos de propagação. Entretanto, o grande trabalho manual exigido para completar a fase de treinamento é um impedimento para a utilização do método em larga escala [Haeberlen et al., 2004]. Outros fatores que podem dificultar a aplicação do método são a mudanças no ambiente ou na posição dos *beacons*. Nesses casos um novo mapa de assinaturas deverá ser criado.

Diferentes algoritmos podem ser utilizados para realizar localização utilizando mapa de assinaturas. Uma comparação entre vários algoritmos é apresentada em [Honkavirta et al., 2009].

Em sistemas baseados em mapa de assinaturas o ambiente é um fator relevante que afeta a qualidade dos resultados. Por isso, comparar diferentes implementações utilizadas em diferentes trabalhos é uma tarefa não trivial. Sendo assim, recentemente, uma taxonomia foi proposta para classificar sistemas baseados em localização via radio usando mapa de assinaturas [Kjaergaard, 2007]. O objetivo é facilitar comparações entre diferentes métodos e implementações.

Sumário. A Figura 2.10 apresenta um sumário dos métodos baseados em radiofrequência discutidos anteriormente. A utilização de cada método depende da aplicação. Cada um tem suas vantagens e desvantagens. Para escolher um método

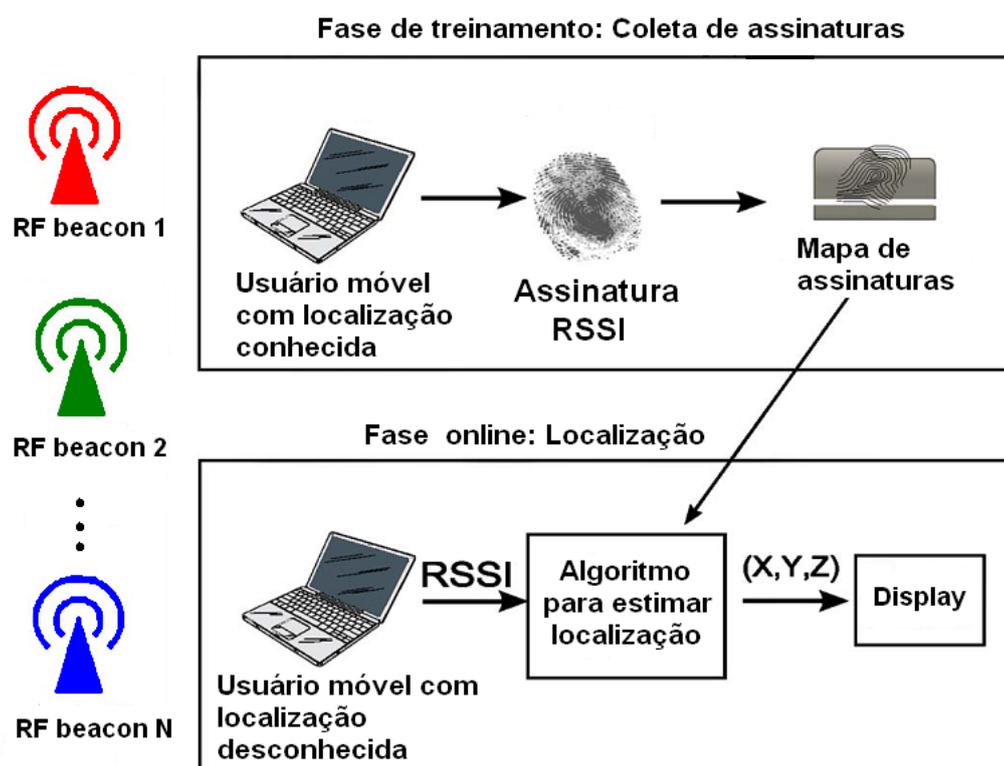


Figura 2.9. Funcionamento do método de mapa de assinaturas. Adaptado de [Dawes & Chin, 2011].

vários critérios devem ser considerados como, custo, exatidão desejada e facilidade de implantação e manutenção.

O trabalho apresentado nesta dissertação utiliza tanto a abordagem baseada em mapas de assinaturas quanto a abordagem baseada em modelos de propagação do sinal. Utilizando as duas abordagens será avaliada a utilização de múltiplas tecnologias de radiofrequência para realizar localização em ambientes internos. A seguir, alguns sistemas de localização baseados em radiofrequência serão apresentados.

2.4 Exemplos de Sistemas de Localização Baseados em RF

Nas seções anteriores foram identificadas as técnicas mais importantes utilizadas para realizar localização baseada em radiofrequência. A seguir serão apresentados alguns exemplos de sistemas que fazem uso de tais técnicas utilizando diferentes tecnologias. Serão apresentados trabalhos que utilizam três tecnologias específicas:

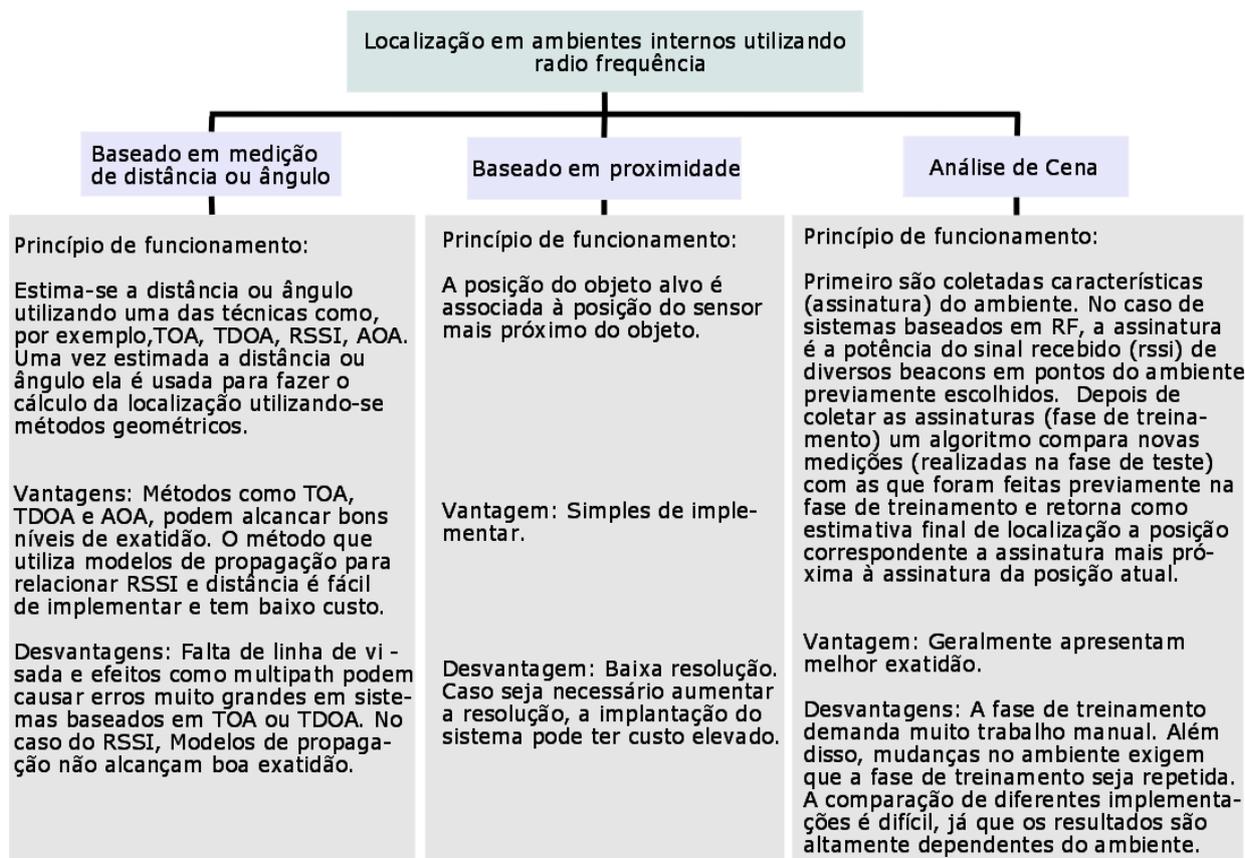


Figura 2.10. Sumário dos métodos de localização baseados em RF.

Ethernet sem fio, Bluetooth e Zigbee. Após a apresentação de alguns trabalhos que utilizam essas três tecnologias específicas, serão apresentados, na Seção 2.5, trabalhos que utilizam, simultaneamente, mais de uma tecnologia sem fio para realizar a localização. Também serão discutidos os desafios e benefícios de utilizar tal abordagem.

2.4.1 Sistemas que utilizam Ethernet Sem Fio

O primeiro sistema baseado em radiofrequência utilizado para realizar localização foi o sistema Ethernet sem fio. O sistema Ethernet sem fio, usualmente também chamado de Wi-Fi, é uma tecnologia desenvolvida para construir redes locais (WLAN - do inglês, *Wireless Local Area Networks*). A tecnologia Wi-Fi permite a criação de redes locais em prédios e campi universitários. Por causa disso, a tecnologia é utilizada em larga escala atualmente em muitos ambientes internos sendo uma opção muito atrativa para sistemas de localização. De fato, redes sem fio oferecem uma forma viável e barata de localização para dispositivos estáticos

e móveis [Rohrig & Muller, 2009]. Muitos sistemas e estudos foram desenvolvidos com objetivo de realizar localização em ambientes internos utilizando Wi-Fi. Alguns desses sistemas serão descritos a seguir.

O RADAR [Bahl & Padmanabhan, 2000] foi o primeiro sistema a utilizar o sinal sem fio para realizar localização em ambientes internos. O objetivo do sistema é alcançar localização com boa exatidão em prédios. O sistema usa o método de mapa de assinaturas (os autores chamam de "método empírico") e usa também a abordagem baseada em modelos de propagação de sinal. Segundo os autores, quando modelos de propagação de sinal são utilizados, o resultado obtido é menos exato do que quando utiliza-se mapas de assinaturas. Entretanto, métodos que utilizam modelos de propagação de sinal exigem muito menos esforço manual. O método empírico consegue alcançar exatidão da ordem de 2-3 metros enquanto o método de modelagem de propagação do sinal atinge uma exatidão de cerca de 4,3m. O RADAR foi o trabalho seminal na área de localização em ambientes internos baseada em RF.

Em [Haerberlen et al., 2004] são apresentados experimentos extensivos para avaliar a qualidade da localização obtida utilizando-se Wi-Fi. O diferencial do trabalho é a escala na qual os experimentos foram realizados. O trabalho também é baseado em mapa de assinaturas. Como a criação dos mapas de RSSI demanda muito trabalho, os autores propõem diminuir a resolução (aumentando o tamanho de cada célula do grid). O objetivo é diminuir, também, a quantidade de treinamento necessária. Nesse caso, embora a exatidão diminua, os autores argumentam que diversas aplicações não exigem acurácia da ordem de 1-2 metros mas apenas uma exatidão que permita identificar corretamente a sala na qual o usuário se encontra. Segundo os autores, em 95% dos testes o sistema identifica corretamente a célula na qual o objeto de interesse está localizado.

O sistema Ekahau [Ekahau, 2010] foi um dos primeiros sistemas comerciais baseados em Ethernet sem fio a serem desenvolvidos. A Figura 2.12 mostra uma visão geral do sistema. O sistema monitora continuamente a localização de pessoas e objetos. A informação de localização é fornecida para usuários autorizados por meio de APIs que podem ser utilizadas remotamente. O sistema utiliza *tags* específicas anexadas aos objetos ou carregadas pelas pessoas que serão localizadas. Essas *tags* podem conter informações como nome e ID do objeto alvo. Além das *tags*, o sistema pode localizar e rastrear outros dispositivos compatíveis com a tecnologia Ethernet sem fio como, por exemplo, *notebooks* e PDAs. O sistema utiliza mapa de assinaturas e algoritmos probabilísticos executando em um servidor centralizado para realizar a localização.

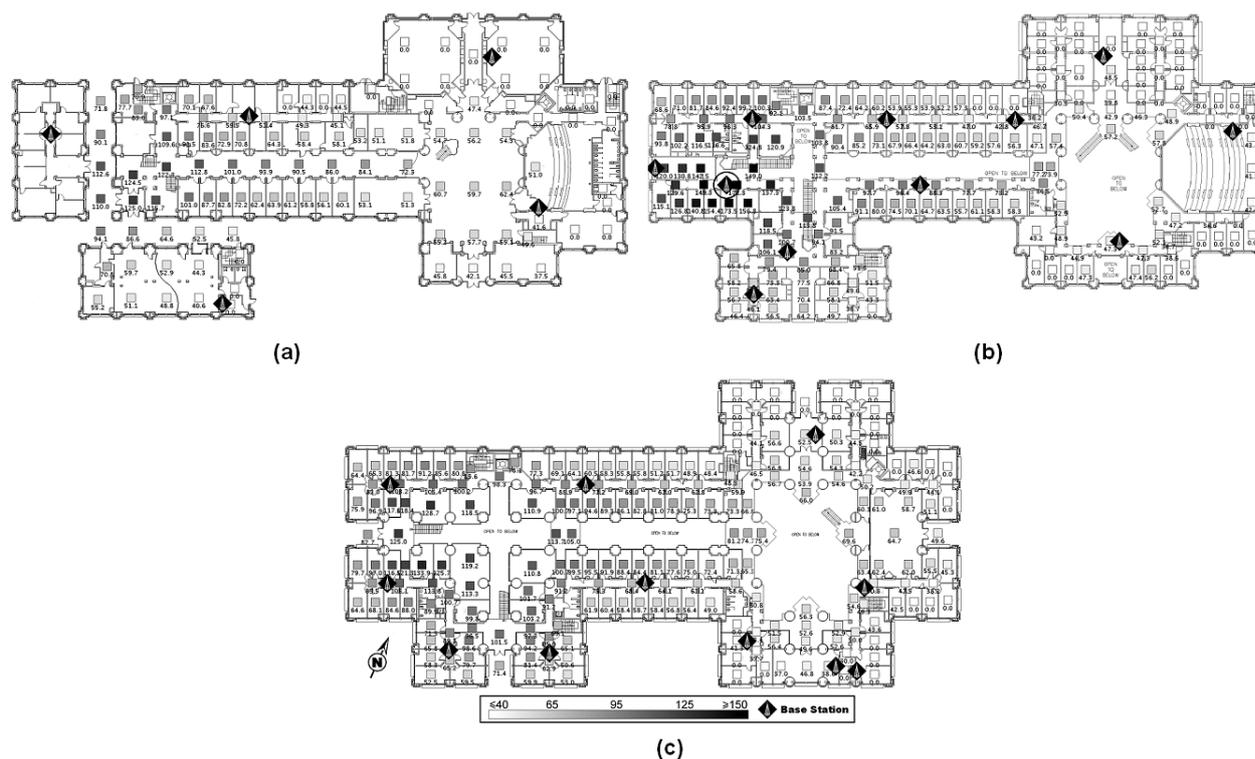


Figura 2.11. Resultados obtidos em [Haerberlen et al., 2004]. Os experimentos foram realizados em um prédio de três andares. (a) Primeiro andar. (b) Segundo andar. (c) Terceiro andar. Segundo os autores, o sistema obtêm resultados corretos em 95% dos casos. Esse trabalho demonstra que reduzir a resolução do sistema pode ser uma solução eficaz e eficiente em muitas aplicações.

Sumário. Os sistemas de localização que utilizam Wi-Fi são encontrados em maior número na literatura. Embora utilizem-se vários métodos para realizar localização, o método baseado em mapas de assinaturas é o mais comumente utilizado. Um dos problemas de utilizar essa tecnologia é a dificuldade de modificar sua posição no ambiente. Isso ocorre porque, geralmente, sua localização é calculada para prover maior cobertura do ambiente e não para servir aos propósitos de serviços de localização. As vantagens da utilização desta tecnologia são o maior alcance de transmissão, que permite que algoritmos de localização sejam utilizados em áreas maiores sem que seja necessário um grande número de *beacons*, e, como já foi dito, a crescente presença dessa tecnologia nos ambientes internos.

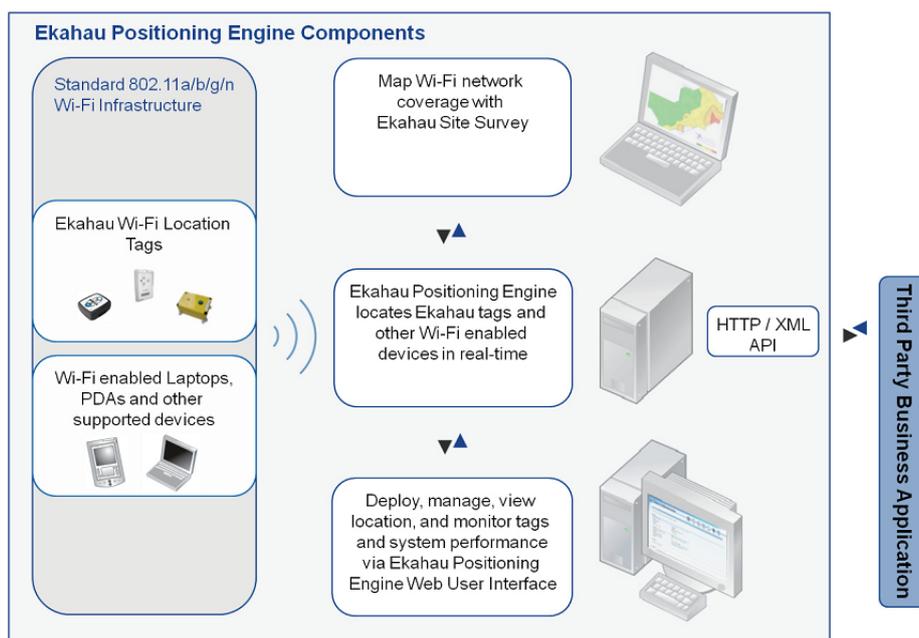


Figura 2.12. Visão geral do sistema de localização comercial Ekahau [Ekahau, 2010]. O sistema é baseado na tecnologia Wi-Fi sem fio. Os fabricantes alegam que o sistema tem exatidão com resolução que permite identificar a sala na qual o objeto alvo está. O sistema já foi implantado em vários ambientes no mundo.

2.4.2 Sistemas que utilizam Bluetooth

Bluetooth é uma tecnologia desenvolvida para criação de redes pessoais (do inglês, *Personal Area Networks* - PAN). As principais características dessa tecnologia são alcance de comunicação limitado (10 metros para dispositivos classe 1) e baixo consumo de energia, embora o consumo ainda seja maior que o obtido em dispositivos compatíveis com 802.15.4/Zigbee.

Originalmente, o padrão foi criado pela Ericsson[®] em 1994. A ideia foi desenvolver uma alternativa sem fio para cabos de transmissão de dados RS-232 para possibilitar colaboração entre diferentes áreas como a indústria de computação e de telefones celulares.

Hoje, a administração e os contínuos desenvolvimentos do padrão estão sob responsabilidade de um grupo de várias companhias, o Bluetooth SIG (*Bluetooth Special Interest Group*). A tecnologia popularizou-se e, atualmente, praticamente todos os celulares e notebooks possuem interfaces Bluetooth.

Os sistemas de localização que utilizam Bluetooth são semelhantes aos sistemas baseados em Wi-Fi. A principal diferença é o alcance dos dispositivos e o número de dispositivos disponíveis no ambiente. Em geral, quando utiliza-se

Wi-Fi, o número de dispositivos é maior porque eles também funcionam como infraestrutura de rede. A seguir são apresentados alguns exemplos de sistemas de localização que utilizam Bluetooth.

[Rodriguez et al., 2005] desenvolveu um sistema de localização para ambientes internos baseado em mapas de assinaturas e trilateração. O sistema é centralizado. O usuário móvel envia informações sobre RSSI coletado de vários *beacons* Bluetooth para um servidor que calcula a posição do usuário e a envia de volta para ele. Os resultados de testes realizados em um laboratório de 10x5 metros apresentam erros entre 1,2 e 2,4 metros.

[Diaz et al., 2010] também é centralizado. Porém, diferente de [Rodriguez et al., 2005], o usuário é passivo no processo de localização. São os APs Bluetooth distribuídos no ambiente que coletam RSSI dos usuários. A resolução do sistema permite saber em qual sala o usuário se encontra. Outra diferença em relação ao trabalho anterior é que o método utilizado é baseado em modelos de propagação do sinal de radio (são utilizados três modelos). Os erros encontrados médios variam entre 2,3 e 4,6 metros, dependendo do modelo utilizado.

Embora a maioria das abordagens baseadas em mapas de assinaturas utilizem o RSSI como “a assinatura”, outras características podem ser usadas. Por exemplo, [Bargh & de Groote, 2008] utiliza a taxa de resposta ([Cheng et al., 2005]) de dispositivos Bluetooth como assinatura. A taxa de resposta é o número de vezes que um AP específico respondeu a uma consulta (realizada por um *broadcast*) dividido pelo número de consultas realizadas. Em cada ponto do ambiente a taxa de resposta de cada *beacon* é obtida e o conjunto de taxas de respostas de todos os *beacons* é utilizado como assinatura. A resolução utilizada permite estimar em qual sala um usuário está localizado. Os autores reportam que em 98% dos casos a solução retorna a localização correta do usuário quando a densidade de dispositivos Bluetooth é alta.

Sumário. Os sistemas de localização baseados na tecnologia Bluetooth têm muito potencial, já que a presença dessa tecnologia em dispositivos computacionais tem aumentado muito nos últimos anos. O baixo alcance dos dispositivos (classe 1), entretanto, pode ser um fator limitante na utilização de Bluetooth para construir sistemas de localização. Outra consideração muito importante é que a obtenção do RSSI pode aumentar a latência do sistema de localização devido ao tempo de requisição usado pelo dispositivo Bluetooth presente no objeto alvo. A configuração do tempo de requisição é de fundamental importância para manter essa latência em

níveis razoáveis [Hossain & Soh, 2007].

2.4.3 Sistemas que utilizam 802.15.4/Zigbee

802.15.4 e ZigBee são protocolos baseados em padrões. Basicamente, esses dois protocolos formam a infraestrutura necessária para o funcionamento de aplicações que executam em redes de sensores [Labiod et al., 2007]. O padrão 802.15.4 estabelece a camada física e a camada de acesso ao meio. Já o padrão ZigBee define a camada de rede. Desta forma, ZigBee é desenvolvido sobre a pilha do 802.15.4 e usa a camada física desta pilha.

O padrão é desenvolvido para rádios pequenos com baixo perfil de consumo. Adicionalmente, as aplicações devem ter baixa taxa de transferência de dados. As aplicações mais comuns desta tecnologia incluem sensoreamento ambiental [Hart & Martinez, 2006], aplicações industriais [Low et al., 2005; Flammini et al., 2009], assistência médica [Milenkovic et al., 2006; Ko et al., 2010; Alemdar & Ersoy, 2010] e ambientes inteligentes. Os dispositivos são simples para instalar e manter e têm alta confiabilidade (uma característica às vezes chamada de auto-cura - do inglês *self-healing*). Além disso, as aplicações devem ser escaláveis (milhares de dispositivos), uma vez que a tendência é que no futuro estes dispositivos tornem-se ubíquos [MIT, 2003]. As aplicações também requerem maior tempo de vida da bateria e consumo muito baixo. Uma descrição mais abrangente das características dos padrões 802.15.4/Zigbee é apresentada em [Baronti et al., 2007]. A Figura 2.13 apresenta um nó sensor Micaz, um exemplo típico de dispositivo compatível com o padrão Zigbee.

Todas as técnicas apresentadas anteriormente e outras técnicas podem ser usadas para localizar um nó sensor em um rede de sensores sem fio (ver [Mao et al., 2007]) cujos nós sensores utilizam Zigbee. A seguir são apresentados alguns estudos sobre localização RF utilizando 802.15.4/Zigbee.

A técnica de mapa de assinaturas combinada com algoritmos probabilísticos é utilizada em [Yao et al., 2007] para realizar localização em um escritório. Os autores reportaram resultados com erros médios de 0,5 metro em 70% dos casos.

Um dos problemas que podem surgir quando utiliza-se localização baseada em RF é o efeito que a interferência causa na qualidade dos resultados. Em um dos poucos estudos feitos pra investigar esse problema, [Lau et al., 2009] apresenta um sistema de localização baseado em Zigbee e mapas de assinaturas. Nesse sistema, a interferência causada por uma rede Wi-Fi é considerada na avaliação de um sistema de localização. A maior fonte de erros nesse caso, segundo os autores, é a alta perda

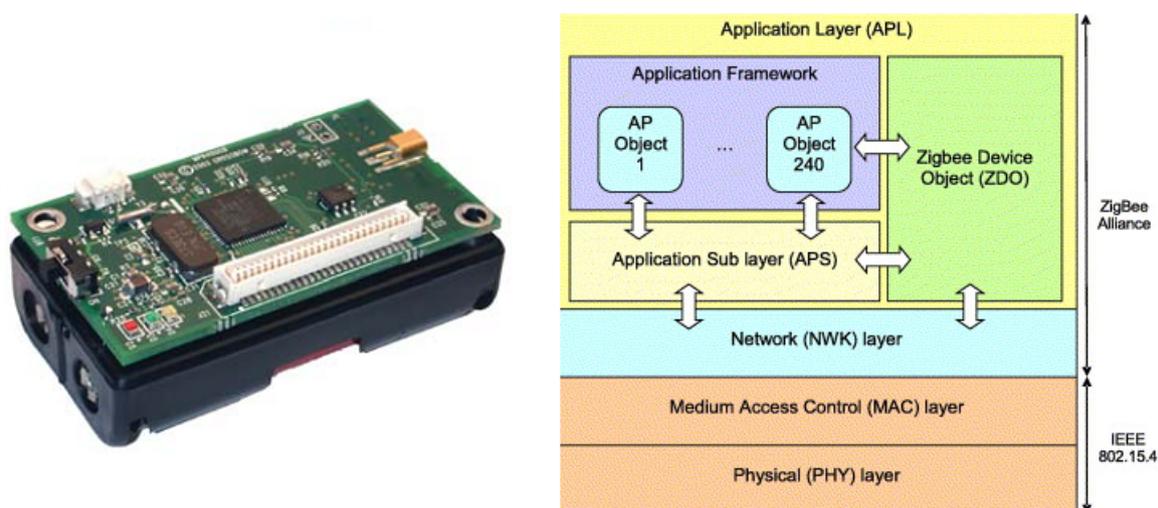


Figura 2.13. (esquerda) Nó sensor Micaz. Um exemplo de um dispositivo compatível com 802.15.4/ZigBee. (direita) A pilha 802.15.4/ZigBee [Baronti et al., 2007] mostrando a relação entre Zigbee e IEEE 802.15.4.

de pacotes enviados pelos *beacons* devido a interferência. A Figura 2.14 mostra o ambiente utilizado para fazer os experimentos e resultados que comprovam a degradação da qualidade da localização quando o tráfego gerado na rede Wi-Fi aumenta.

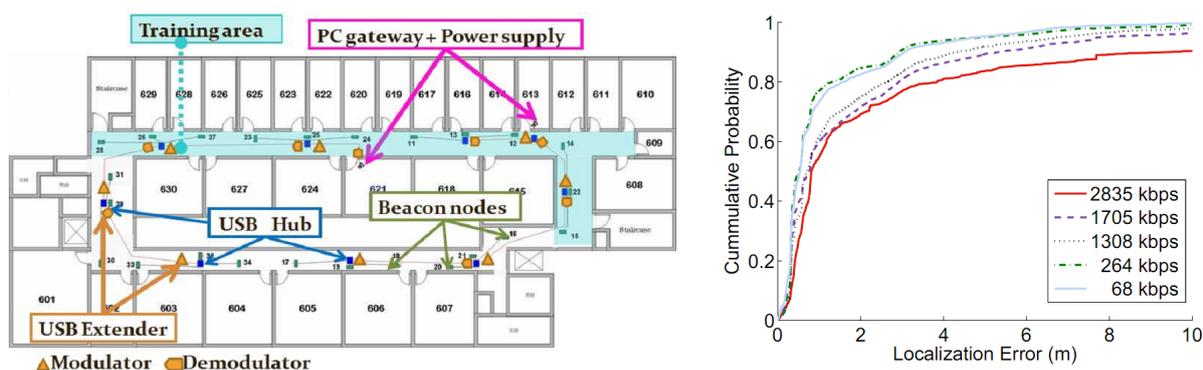


Figura 2.14. Influência da interferência entre Zigbee e Wi-Fi no resultado da localização. (esquerda) Ambiente e aparato experimental utilizado. (direita) Variação da distribuição acumulada do erro de localização em função do “ruído” causado por diferente taxas de transmissão da rede Wi-Fi. Quanto maior a taxa de transmissão, pior o desempenho do sistema de localização. Reproduzido de [Lau et al., 2009]. (Melhor visualizado em cores).

2.5 Localização Utilizando Múltiplas Tecnologias RF

Nesta seção será discutida a utilização de múltiplas tecnologias sem fio para realizar localização. Serão apresentados alguns trabalhos que utilizam a abordagem de múltiplas tecnologias para realizar localização em ambientes internos.

Quando o termo múltiplas tecnologias for utilizado nesse trabalho, ele estará se referindo a utilização de três tecnologias específicas, a saber: Wi-Fi, Bluetooth e 802.15.4/Zigbee. Embora existam diversas outras tecnologias sem fio, nessa dissertação iremos focar apenas nessas três tecnologias e nas oportunidades e desafios que a utilização dessas três tecnologias em conjunto apresentam quando são utilizadas para realizar localização.

Porque múltiplas tecnologias sem fio para localizar? A principal motivação para investigar localização usando múltiplas tecnologias sem fio é o recente crescimento da distribuição e utilização dessas tecnologias. Diversos dispositivos já apresentam múltiplas interfaces sem fio. Por exemplo, praticamente todo *notebook* produzido atualmente possui interfaces Ethernet sem fio e Bluetooth já embutidas. Diante desse quadro e, considerando que a utilização de radio para realizar localização é uma alternativa promissora e, portanto, alvo de grande número de pesquisas, utilizar múltiplas tecnologias baseadas em RF torna-se interessante e oportuno.

Outro motivo importante para se utilizar múltiplas tecnologias no processo de localização é a possibilidade de criar sistemas mais robustos, uma vez que, se uma das tecnologias estiver indisponível, as outras ainda podem ser utilizadas. A maneira pela qual essas tecnologias podem ser combinadas é uma questão importante. Por exemplo, o sistema pode utilizar apenas a tecnologia que estiver disponível. Outra possibilidade é utilizar as tecnologias em conjunto. Nesse caso, técnicas de fusão sensorial devem ser utilizadas para combinar as informações das múltiplas tecnologias.

A existência de múltiplas tecnologias sem fio baseadas em RF nos ambientes modernos é uma oportunidade que pode ser usada para criar sistemas de localização baseados em radio mais confiáveis, com maior disponibilidade e maior exatidão.

No contexto de múltiplas tecnologias sem fio, a maioria dos trabalhos já desenvolvidos abordam a utilização de duas tecnologias específicas: Ethernet sem

Fio e Bluetooth [Aparicio et al., 2008a,b]. Nesses trabalhos, o sistema de localização é avaliado comparando-se o comportamento do sistema quando utiliza-se apenas uma das tecnologias com o comportamento diante do uso das duas tecnologias.

Um método de fusão sensorial entre Bluetooth e Wi-Fi é apresentado em [Aparicio et al., 2008a]. O método é dividido em duas fases. Primeiro, as medidas obtidas dos dispositivos compatíveis com Bluetooth são usadas para selecionar em qual região encontra-se o objeto de interesse. Na segunda fase, as medidas do sinal Wi-Fi são utilizadas para localizar o objeto considerando apenas a região delimitada previamente utilizando-se o Bluetooth. Quando comparado ao caso que utiliza apenas Wi-Fi, o método que utiliza Wi-Fi e Bluetooth obtém um erro médio 40 centímetros menor. Contudo, os resultados não são conclusivos. Segundo os autores, a melhora da qualidade da localização quando utiliza-se múltiplas tecnologias deve-se a remoção de *outliers*¹ (devido a prévia seleção de regiões por meio das medidas obtidas dos dispositivos Bluetooth). As figuras 2.15 e 2.16 mostram os pontos de treinamento e teste e os resultados obtidos nesse trabalho, respectivamente.

Um estudo mais abrangente sobre os efeitos de cada tecnologia na qualidade da localização é realizado em [Pandya et al., 2003]. Os autores também utilizam Wi-Fi e Bluetooth. Os experimentos realizados avaliam qual o impacto de cada tecnologia na qualidade de localização. É utilizado mapa de assinaturas para cada uma das tecnologias. O trabalho avalia a influência de diferentes algoritmos de localização e do número de APs utilizados. Utilizando-se Bluetooth atinge-se melhores resultados devido ao seu alcance mais limitado, segundo os autores. Em alguns casos os autores reconhecem que os resultados não são conclusivos. Enquanto em [Aparicio et al., 2008a] é apresentada uma abordagem *multi-layer*, o trabalho apresentado em [Pandya et al., 2003] utiliza um tipo de integração mais simples, em que as informações de cada tecnologia são combinadas por meio de um simples cálculo de média.

Em [Mahtab Hossain et al., 2007] várias contribuições são apresentadas. O sistema de localização também é baseado em mapa de assinaturas. O principal objetivo do trabalho é avaliar técnicas de escolha de *anchors* para realizar a localização. As tecnologias utilizadas também são Bluetooth e Wi-Fi. Uma segunda contribuição é mostrar que técnicas de interpolação podem ser usadas com sucesso para reduzir o tempo da fase de treinamento em sistemas baseados em mapa de assinaturas. Embora utilize múltiplas tecnologias e dê importantes contribuições,

¹Um *outlier*, é uma observação que está significativamente mais distante de outros membros da amostra em que ela ocorre.



Figura 2.15. Pontos de treinamento e pontos nos quais ocorreram testes em [Aparicio et al., 2008a]. (Melhor visualizado em cores).

Points	1	2	3	4	5	6	TOTAL
WIFI	2.39	1.34	3.28	3.21	2.48	3.45	2.69 m
BTWIFI	2.39	1.83	2.42	2.74	2.15	2.42	2.32 m

Figura 2.16. Erros obtidos em cada ponto utilizando-se apenas Wi-Fi e uma combinação de Wi-Fi e Bluetooth. Reproduzido de [Aparicio et al., 2008a].

o foco do trabalho não é fazer um estudo aprofundado do potencial e dos desafios apresentados pela utilização de múltiplas tecnologias sem fio.

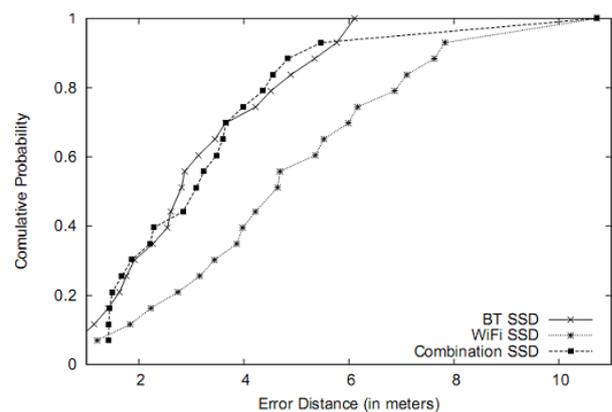
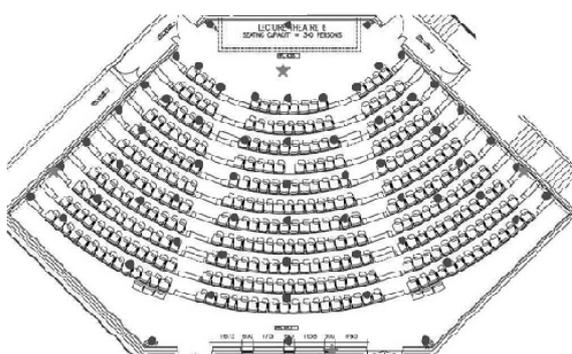


Figura 2.17. (esquerda) Ambiente em que os experimentos foram realizados em [Mahtab Hossain et al., 2007]. (direita) Resultados utilizando apenas Bluetooth, apenas Wi-Fi e uma combinação das duas tecnologias.

[Gwon et al., 2004] apresenta dois algoritmos para realizar localização considerando múltiplas tecnologias e múltiplos algoritmos. O objetivo principal do trabalho é fazer a fusão de informações provenientes de diferentes fontes (tecnologias e algoritmos) para aumentar a exatidão da estimativa de localização. As tecnologias utilizadas são Wi-Fi e Bluetooth.

A Tabela 2.2 mostra um quadro comparativo dos trabalhos que utilizaram múltiplas tecnologias sem fio baseadas em RF para realizar localização.

Tabela 2.2. Quadro comparativo dos trabalhos que utilizam múltiplas tecnologias sem fio para localizar. Todos os trabalhos utilizam Wi-Fi e Bluetooth.

Trabalho	Tecnologia	Técnicas	Resultados	Algoritmo
Pandya et al. [2003]	Wi-Fi + BT	Mapa de assinaturas	$\leq 5m$	Compara diversos algoritmos
Gwon et al. [2004]	Wi-Fi + BT	Mapa de assinaturas	$\leq 3m$	SELFLOC
Mahtab Hossain et al. [2007]	Wi-Fi + BT	Mapa de assinaturas	$\leq 4m$ em 70% dos casos	K-NN e Modelo Bayesiano
Aparicio et al. [2008a,b]	Wi-Fi + BT	Mapa de assinaturas (Wi-Fi) e Modelo de propagação (BT)	$\leq 3m$	Distância Min-Max

2.6 Localização Utilizando RF - Aplicação em Robótica Móvel

Um robô deve saber sua localização para ser autônomo. Assim, em robótica, o problema da localização também é fundamental e a comunidade de pesquisadores e desenvolvedores em robótica também tem pesquisado e feito uso da localização utilizando RF.

Uma importante diferença em relação aos trabalhos que não utilizam robôs é a necessidade de um modelo para acomodar um usuário móvel e dinâmico. Para englobar esta nova característica, diversas técnicas são utilizadas. A mais comum é utilizar algum tipo de filtro que possa considerar também as medidas anteriores realizadas pelos robôs.

Uma vez que o trabalho apresentado nesta dissertação é focado na utilização de robôs, nesta seção serão apresentados alguns trabalhos que utilizaram RF para localizar e/ou rastrear robôs móveis.

A maioria dos trabalhos que utilizam RF para realizar localização em robótica utiliza filtro de Kalman [Kurth et al., 2003; Kurth, 2004; Djughash et al., 2006; Olson et al., 2006; Menegatti et al., 2009] ou filtro de partículas [Raghavan et al., 2010]. A seguir alguns trabalhos são discutidos em mais detalhes.

Filtro de Kalman. Em [Menegatti et al., 2009] é feita a localização do robô usando apenas hodometria e estimativas de distância obtidas a partir do RSSI das mensagens enviadas por nós sensores compatíveis com 802.15.4/Zigbee. É utilizado EKF e os sensores também são localizados. Como o sinal de RSSI contém muito ruído, os autores utilizam uma técnica de pré-processamento de RSSI antes de utilizar o EKF para fazer a estimativa final da localização do robô e dos sensores. A Figura 2.18 mostra o *setup* experimental e o gráfico de um dos resultados obtidos. Segundo os autores, o erro varia entre 0,5 e 1 metro. Não são consideradas múltiplas tecnologias RF.

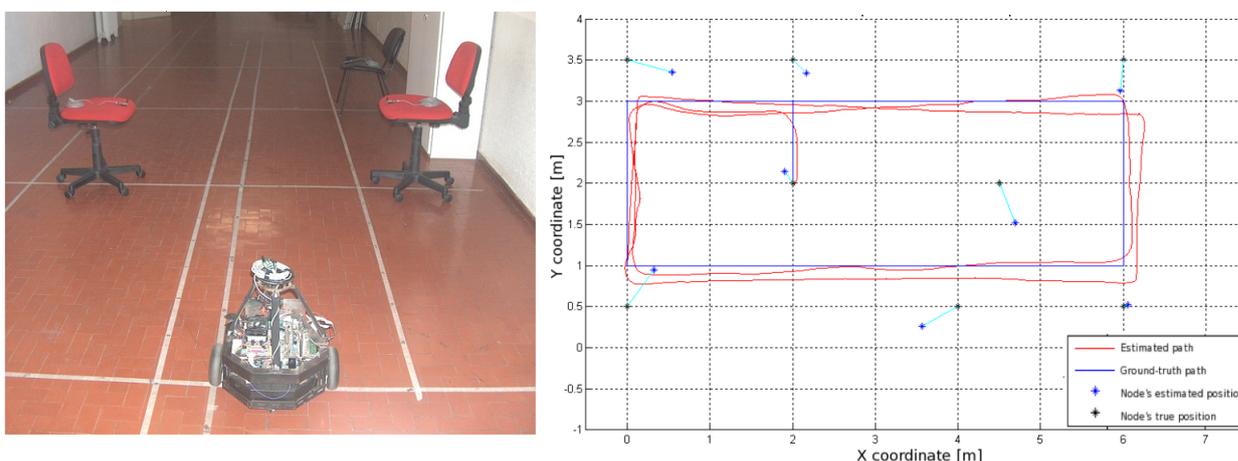


Figura 2.18. Range-only SLAM usando rádio. (esquerda) Robô móvel executando experimento. (direita) Resultados de localização do robô e nós sensores. O erro médio obtido para localização do robô foi de cerca de 1 metro. Reproduzido de [Menegatti et al., 2009]. (Melhor visualizado em cores).

Em [Djugash et al., 2006] a tecnologia Zigbee é utilizada. São usados dois tipos de sinal (sonar e RSSI) para estimar a distância entre o robô e os nós sensores. Também é utilizado EKF para obter a estimativa de localização. A formulação do EKF utilizada é simples, porém permite obter resultados razoáveis. Uma característica interessante deste trabalho é que também são utilizadas informações de distância entre os nós sensores para fazer a localização. O trabalho considera apenas uma topologia específica de nós sensores e não faz nenhum estudo de como a variação da topologia afeta a qualidade da localização. Uma desvantagem da abordagem utilizada no trabalho é que o sonar não atravessa obstáculos e, portanto, é exigido linha de visada entre os sensores.

A falta de linha de visada entre emissor e transmissor pode gerar erros em mecanismos de localização que utilizam RF. O trabalho apresentado em [Rohrig & Muller, 2009] utiliza uma versão modificada de EKF para tentar minimizar o problema de falta de linha de visada (NLOS - do inglês, *Non-line-of-sight*). A Figura 2.19 mostra os resultados obtidos utilizando o EKF antes e depois da técnica proposta. Uma pequena melhoria é observada quando utiliza-se uma das formas de tratamento de NLOS proposta pelos autores.

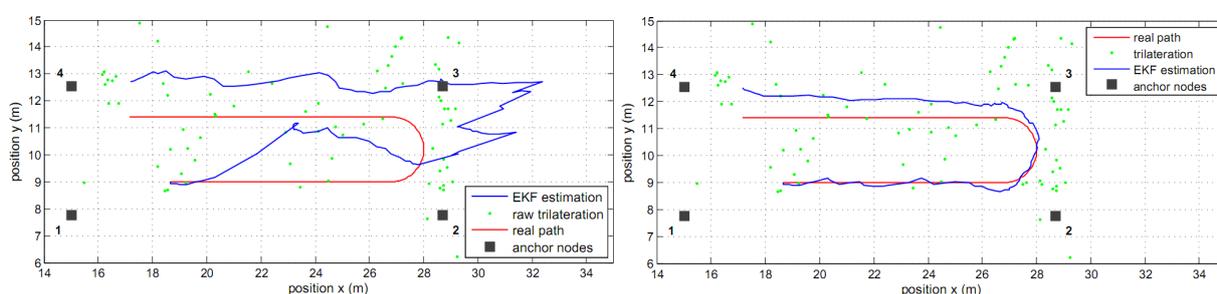


Figura 2.19. Melhoria de qualidade de localização quando utiliza-se tratamento para NLOS. (esquerda) EKF sem tratamento de NLOS nas observações. (direita) EKF com tratamento de NLOS. Reproduzido de [Rohrig & Muller, 2009].

Filtro de partículas. Em [Raghavan et al., 2010] um robô é localizado utilizando o RSSI de mensagens enviadas por dispositivos compatíveis com Bluetooth. O algoritmo de localização utilizado é composto de duas fases: (1^o) trilateração e (2^o) filtro de partículas. Os valores de RSSI são processados pelo algoritmo de trilateração. Os resultados da trilateração são a entrada do filtro de partículas que fornece a estimativa final de localização. A Figura 2.20 mostra o principal resultado obtido.

A teoria básica que fundamenta a localização usando radio, as técnicas mais utilizadas e alguns trabalhos já desenvolvidos, considerando apenas uma tecnologia e também múltiplas tecnologias foram apresentadas. A seguir, serão apresentadas as características do trabalho relatado nessa dissertação e como ele se relaciona com os conceitos e com outros trabalhos relatados.

Enquanto este trabalho utiliza muitos conceitos e abordagens dos trabalhos apresentados anteriormente, existem também algumas importantes diferenças. Primeiro, a abordagem considera a utilização de robôs. Dentro desse contexto,

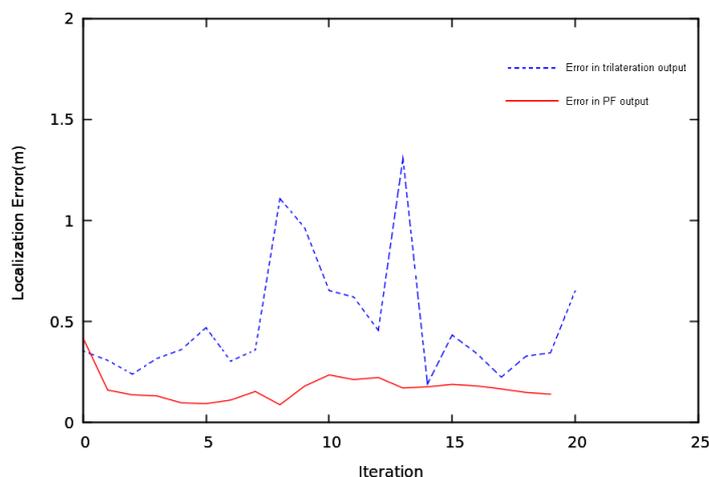


Figura 2.20. Erro de localização obtido utilizando-se trilateração e filtro de partículas. Reproduzido de [Raghavan et al., 2010].

é importante avaliar a utilização de múltiplas tecnologias em situações em que o usuário, no caso, o robô, se move continuamente pelo ambiente. Esse tipo de cenário representa de forma mais fidedigna as situações que envolvem robôs móveis.

Segundo, além de Wi-Fi e Bluetooth, também é utilizada a tecnologia Zigbee. A utilização de três tecnologias tem mais condições de revelar as oportunidades e desafios presentes na utilização de múltiplas tecnologias RF para realizar localização.

Terceiro, é apresentada uma discussão mais profunda das oportunidades e desafios encontrados na utilização de múltiplas tecnologias para realizar localização. Diferentemente dos outros trabalhos, são utilizados dois métodos para avaliar localização baseada em RF. O primeiro método é baseado em mapas de assinaturas e o segundo é baseado em modelos de propagação do sinal de RF. A razão para utilizar dois métodos é permitir uma avaliação mais completa dos aspectos envolvidos na utilização de múltiplas tecnologias RF para realizar a localização.

2.7 Sumário

Neste capítulo foram apresentados conceitos importantes sobre localização utilizando radiofrequência. O capítulo foi dividido em duas partes. Na primeira parte foi apresentada uma visão geral de sistemas de localização baseados em tecnologias sem fio. A seguir, foram descritos os componentes básicos de um sistema de localização baseado em RF. Esses componentes são: dispositivos que

coletam o sinal de RF, métricas utilizadas e algoritmos de localização.

Também foram apresentados os três principais métodos utilizados para realizar localização utilizando RF. São eles:

1. Métodos baseados em medição de distância ou ângulo (Seção 2.3.1).
2. Métodos baseados em proximidade (Seção 2.3.2).
3. Métodos baseados em análise de cena (Seção 2.3.3).

Cada método tem vantagens e desvantagens. Os métodos baseados em medição de distância ou ângulo podem alcançar boa exatidão. Entretanto, o custo para utilizá-los pode ser alto, uma vez que em muitos casos é necessário o desenvolvimento ou aquisição de *hardware* adicional. Outra desvantagem é que esses métodos só funcionam bem quando existe linha de visada entre o emissor e o(s) receptor(es). Em ambientes internos isso raramente ocorre. Os métodos baseados em proximidade são simples de implementar mas, geralmente, oferecem baixa resolução. Por fim, os métodos baseados em análise de cena têm como vantagem o fato de serem relativamente mais exatos e, como principal desvantagem, o tempo gasto na fase de treinamento do sistema de localização.

Na segunda parte do capítulo foram apresentados exemplos de sistemas de localização baseados em Wi-Fi, Bluetooth e Zigbee, assim como sistemas de localização que utilizam uma combinação das tecnologias Wi-Fi e Bluetooth e a aplicação de localização baseada em RF à robótica móvel.

Ao final do capítulo foram discutidas a abordagem que será utilizada nesta dissertação e as diferenças entre o trabalho aqui relatado e os trabalhos descritos anteriormente.

Capítulo 3

Localização Baseada em Múltiplas Tecnologias RF Usando Mapa de Assinaturas

Mapa: Lista, relação;

Assinatura: [...]Aspecto Característico [...] que se obtém em aparelho próprio, segundo irradiação de energia; Marca, desenho ou modelo próprio de alguém.

Dicionário Houaiss

Neste capítulo serão investigados aspectos envolvidos na localização baseada em múltiplas tecnologias RF utilizando um método apresentado na Seção 2.3.3, do Capítulo 2, o mapa de assinaturas. Os objetivos deste capítulo são:

1. Descrever como o método baseado em mapas de assinaturas foi utilizado para realizar localização usando múltiplas tecnologias RF.
2. Apresentar e discutir os resultados experimentais obtidos com a aplicação desse método.

O capítulo está organizado como descrito a seguir. Na Seção 3.1 serão descritos a visão geral e o detalhamento de cada etapa do método proposto. A coleta de dados dos dispositivos RF, a forma como as informações obtidas dos dispositivos

de diferentes tecnologias foram integradas e o algoritmo de localização utilizado (K-NN) para produzir a estimativa final de localização serão descritos nessa seção. Na Seção 3.2, serão descritos o arcabouço experimental utilizado e os resultados obtidos. Também serão discutidos diversos aspectos relativos aos resultados. A Seção 3.3 encerra este capítulo com a apresentação de um sumário.

3.1 Metodologia

Nesta seção será discutida a metodologia utilizada. Primeiro, será apresentada uma visão geral do método utilizado. Em seguida, é mostrado os procedimentos de coleta de dados, como as informações de cada tecnologia são combinadas e o algoritmo de localização utilizado.

3.1.1 Visão Geral

A visão geral do método utilizado neste trabalho é apresentada na Figura 3.1. O método é dividido em duas fases: fase *offline* de treinamento (chamada de Fase A) e fase *online* de localização (chamada de Fase B). Inicialmente, na fase de treinamento, o sinal de RF proveniente dos *beacons* distribuídos no ambiente é recebido pelos dispositivos que utilizam RF embarcados no robô (Etapa 1A). O RSSI é então calculado a partir destes sinais. Na etapa seguinte, (2A), os valores de RSSI são armazenados em um banco de dados (o mapa de assinaturas). Esse mapa será utilizado na fase *online* de localização. Cada tecnologia possui um mapa de assinaturas próprio. Esses mapas são integrados na Etapa 3A. Na fase *online* de localização, os dispositivos RF embarcados no robô calculam o RSSI do sinal de RF recebido dos *beacons* (1B). A seguir, é criada a assinatura do sinal de RSSI no ponto em que robô está localizado. Na Fase 2B, essa assinatura é comparada com as assinaturas presentes no mapa por um algoritmo de localização. Finalmente, na Fase 3B, o algoritmo produz como resultado a estimativa de localização do robô. Cada uma das etapas será descrita com mais detalhes nas próximas seções.

3.1.2 Coleta de dados

O processo de coleta de dados é feito por meio de *logs* das informações de RSSI¹ em arquivos texto. Para utilizar a informação de RSSI posteriormente, é necessário saber qual dos *beacons* está associado a cada valor de RSSI. Dessa forma, no

¹Cada dispositivo das três tecnologias fornece a informação do RSSI.

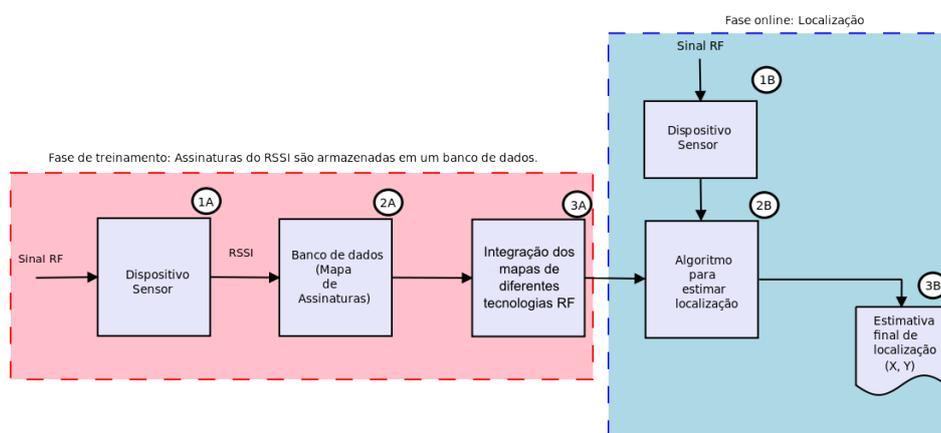


Figura 3.1. Diagrama do método utilizado para realizar localização baseada em mapa de assinaturas de múltiplas tecnologias RF.

momento da coleta de dados, a identificação do emissor do sinal RF é armazenada juntamente com a informação de intensidade do RSSI. A identificação do dispositivo consiste em um número inteiro, no caso dos nós sensores, ou em endereços MAC, no caso dos dispositivos compatíveis com Bluetooth e pontos de acesso Wi-Fi.

Na fase de treinamento, além das informações de RSSI, também é armazenado o valor real da localização de cada ponto – coordenadas (x, y) – na qual os valores de RSSI são coletados. Essa informação será utilizada como *ground truth* para avaliar a qualidade dos resultados de localização.

3.1.3 Criação do Banco de Dados (Mapa de Assinaturas)

Os valores de RSSI coletados durante a fase de treinamento são utilizados para construir o mapa de assinaturas. O mapa de assinaturas é uma matriz que relaciona a localização de um ponto no ambiente ao valor de RSSI coletado de cada *beacon* naquele ponto.

Para cada tecnologia RF, um mapa de assinaturas diferente é construído. O mapa é composto por tuplas da forma $[(x_i, y_i)(RSSI_1, RSSI_2, RSSI_3, \dots, RSSI_{n_t})]$, em que (x_i, y_i) representa uma posição no *grid* e, $RSSI_j$, $1 \leq j \leq n_t$, é um valor de RSSI para cada *beacon* da tecnologia $t \in \{\text{Zigbee, Bluetooth, Wi-Fi}\}$, distribuído no ambiente. Para cada ponto de treinamento uma tupla de valores de RSSI para cada tecnologia é coletada.

A Tabela 3.1 mostra o resultado final do mapa de assinaturas para uma tecnologia específica.

Tabela 3.1. “Mapa” de assinaturas do sinal de RSSI recebido de diferentes *beacons*. B_i , $1 \leq i \leq n$, representa um *beacon* e (x_j, y_j) , $1 \leq j \leq m$, representa as coordenadas de um ponto no ambiente.

Coord.	B_1	B_2	...	B_n
(x_1, y_1)	-35	-60		-83
(x_2, y_2)	-47	-66		-78
(x_3, y_3)	-68	-40		-87
...
(x_m, y_m)	-55	-30		-59

3.1.4 Integração dos Mapas de Múltiplas Tecnologias RF

Para integrar as tecnologias, os mapas de assinaturas de cada tecnologia são combinados. Essa combinação consiste da concatenação dos mapas de cada tecnologia individual. Por exemplo, no caso em que as três tecnologias são combinadas, o resultado final seria similar ao apresentado na Figura 3.2. Esse mapa

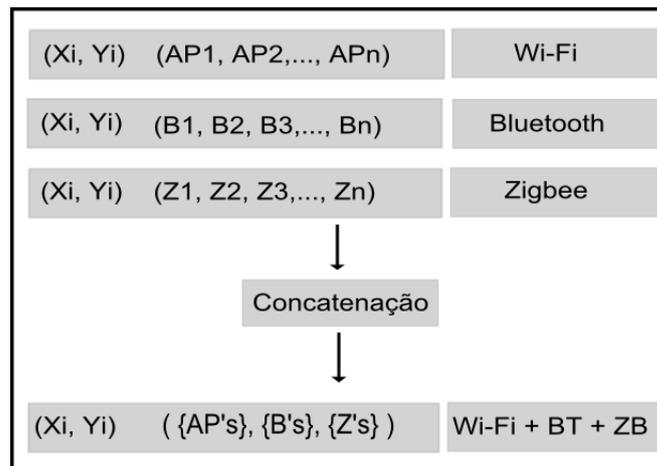


Figura 3.2. Concatenação de mapas de assinaturas de múltiplas tecnologias.

final concatenado é utilizado por um algoritmo para estimar a localização final do robô. O algoritmo usado para realizar a localização e também seu funcionamento são apresentados na próxima seção.

3.1.5 Algoritmo de Localização

Como descrito na Seção 2.2 do Capítulo 2, um dos componentes de um sistema de localização baseado em RF é o algoritmo de localização. O algoritmo de

localização utilizado neste trabalho foi o K-NN, um algoritmo simples de entender e implementar, mas que, não obstante sua simplicidade, produz bons resultados² e, por isso, é utilizado nas mais diversas aplicações.

Dado um conjunto de dados de treinamento, o algoritmo encontra, nesse conjunto, um grupo de K objetos mais próximos (segundo alguma métrica de similaridade) do objeto que está sendo testado. O K-NN possui três componentes principais: (i) um conjunto de entidades armazenadas em um banco de dados, (ii) uma métrica de distância (ou similaridade) para calcular a distância entre as entidades e (iii) o valor de K (o número de vizinhos a serem considerados) [Wu et al., 2008]. A Tabela 3.2 mostra como esses componentes são utilizados no problema tratado nesta dissertação.

Tabela 3.2. Elementos do algoritmo K-NN e sua aplicação ao problema de localização utilizando mapa de assinaturas.

Elemento	Aplicação
Entidades armazenadas	Valores de RSSI coletados em cada ponto do ambiente
Métrica de distância	Distância Euclidiana
Valor de K (número de vizinhos)	Número de pontos do ambiente considerados

No contexto deste trabalho, o funcionamento do algoritmo pode ser descrito da seguinte forma: *Dado um conjunto de assinaturas de RSSI de diferentes pontos no ambiente, encontrar a assinatura que mais se aproxima da assinatura coletada na fase online de testes. Ao encontrar a assinatura mais próxima no banco de dados, o algoritmo fornece como estimativa de localização final a localização associada aquela assinatura.*

Como exemplo mais concreto, considere a Figura 3.3. O vetor de valores RSSI coletados no ponto no qual o robô está localizado é mostrado na parte superior da Figura 3.3. O conjunto de assinaturas já armazenado é mostrado na parte inferior. Quando a distância euclidiana entre as assinaturas é calculada, o ponto (x_3, y_3) é considerado o mais próximo. Assim, considerando $K = 1$, o algoritmo iria retornar como estimativa de localização esse ponto. Se $K = 2$, o valor retornado seria uma média entre os pontos (x_3, y_3) (ponto mais próximo) e (x_2, y_2) (segundo ponto mais próximo). Para cada valor de K , o procedimento é o mesmo. O valor de K é

²O K-NN foi considerado como um dos 10 melhores algoritmos de mineração de dados [Wu et al., 2008] pela comunidade acadêmica de pesquisadores da área na Conferência Internacional em mineração de dados do IEEE (do inglês, *International Conference on Data Mining - ICDM*), ocorrida em Dezembro de 2006.

um importante parâmetro para a eficácia do algoritmo e, geralmente, é ajustado empiricamente para obter o melhor resultado.

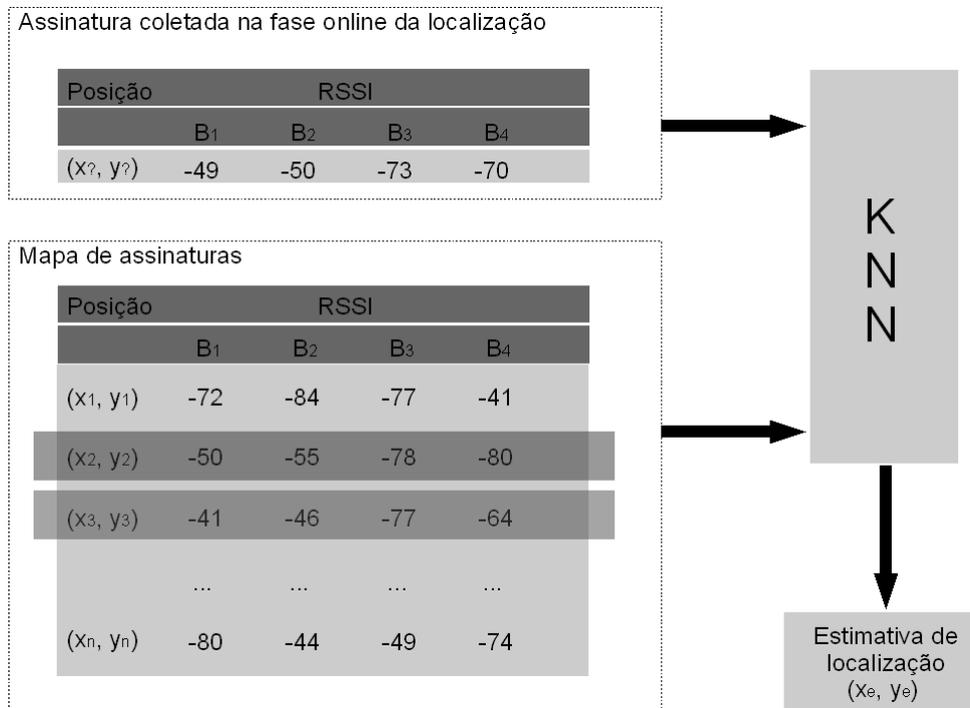


Figura 3.3. Algoritmo K-NN aplicado ao problema de localização utilizando mapa de assinaturas.

3.2 Avaliação Experimental

Nesta seção serão apresentados os resultados da avaliação experimental do método de mapa de assinaturas. Após a apresentação do aparato experimental e da forma como os dados foram coletados, os resultados são discutidos.

3.2.1 Aparato Experimental

Para realizar os experimentos foi utilizado um robô móvel Pioneer 3-AT³. Foram embarcados no robô dispositivos compatíveis com as tecnologias Bluetooth, ZigBee e Wi-Fi, como mostrado na Figura 3.4.

Para coletar dados de todas os dispositivos RF foi utilizado um *notebook* Toshiba[®] Satellite M55-S331 executando sistema operacional Linux, Kernel 2.6.24,

³Para maiores detalhes sobre a plataforma robótica utilizada, consultar o Apêndice A, Seção A.8.

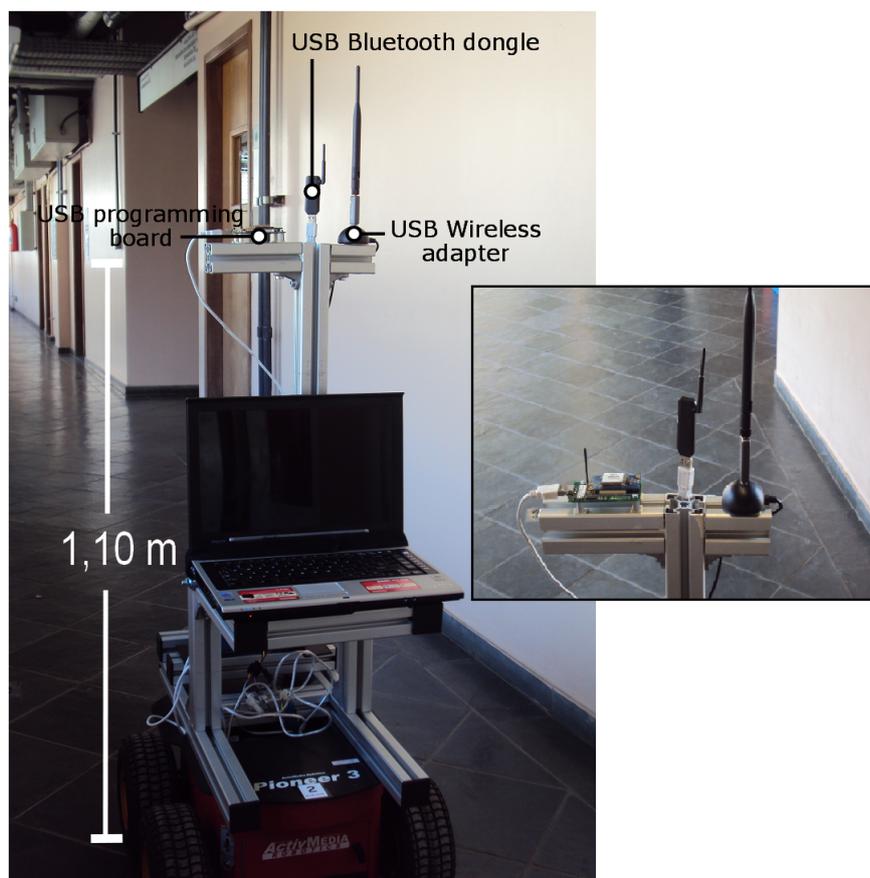


Figura 3.4. Robô e os dispositivos “sensores”. Foram embarcados no robô Pioneer P3-AT uma placa MIB520 para fazer interface com os nós sensores, um receptor Bluetooth e um receptor Wi-Fi.

distribuição Ubuntu 8.04 - (Hardy Heron), Abril 2008. A configuração de *hardware* era um processador Intel® Pentium® M, 1.73GHz e 495 MB de RAM. Um adaptador USB-*wireless* OvisLink AirLive® WN-360, um *dongle* Bluetooth Billionton®, versão 2.0, classe 1 e uma placa de programação USB MIB 520 (para coletar dados dos nós sensores) foram conectadas ao *notebook*.

Foram utilizados seis *dongles* USB Bluetooth, classe 2, Noteship Micro Adaptor, da Leadership® como *beacons*. Cinco *netbooks* Eee PC foram utilizados para alimentar os *beacons* Bluetooth. Cada *netbook* executava o sistema operacional Linux, Kernel 2.6.32, distribuição Ubuntu 10.04 LTS - (Lucid Lynx), Abril 2010. A configuração de *hardware* era um processador Intel® Atom N270, 1.60GHz (dois núcleos) e 1GB de RAM. O último *dongle* Bluetooth foi conectado a um *notebook* CCE Win, executando o mesmo sistema operacional dos *netbooks* com um processador Intel® Pentium Dual-Core e 2GB RAM.

Foram utilizados oito nós sensores Micaz. Cada um deles enviava pacotes com uma taxa de transmissão de 4Hz. A potência de transmissão foi configurada como -7dBm. Os pontos de acesso Wi-Fi são da Cisco® e foram coletados dados de doze deles (na Figura 3.5, é possível ver cinco pontos de acesso. Foram utilizados mais três no mesmo andar dos experimentos e quatro no andar acima do andar no qual os experimentos foram realizados).

Os experimentos foram realizados no terceiro andar do prédio no Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais. Um mapa da área do prédio onde os experimentos foram realizados é mostrada na Figura 3.5.

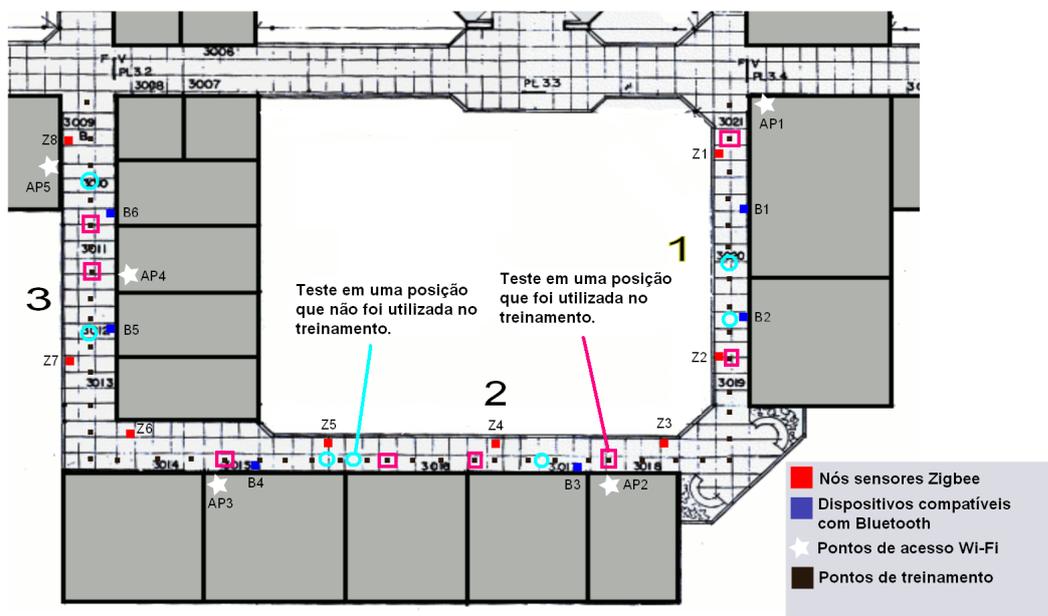


Figura 3.5. Ambiente no qual foram realizados os experimentos. Os pontos de treinamento e de testes aparecem em destaque. Oito pontos de teste eram idênticos aos pontos de treinamento. Os outros sete pontos eram diferentes dos pontos onde ocorreu treinamento. (Melhor visualizado em cores).

3.2.2 Coleta de Dados

Foram utilizados códigos específicos para coletar RSSI de cada uma das tecnologias. O RSSI dos dispositivos compatíveis com Bluetooth foi coletado usando a biblioteca Bluez, do sistema operacional Linux. Os dados dos nós sensores foram coletados utilizando a versão mais recente da aplicação RSSIDemo [RssiDemo, 2011]. A

aplicação RSSIDemo é uma aplicação desenvolvida em Java e nesC [Gay et al., 2003] para permitir a coleta de valores de RSSI de um nó sensor sem fio que utiliza o sistema operacional TinyOs [The TinyOS 2.x Working Group, 2005]. Para coletar os dados dos APs Wi-Fi foi utilizado o aplicativo *iwlist* do Linux⁴. Foram utilizados programas escritos nas linguagens *shell script* [Robbins & H. F. Beebe, 2005] e *awk* [Aho et al., 1987] para processar a saída do *iwlist* e fornecer as informações necessárias (RSSI e endereços MAC dos APs).

A seguir serão apresentados os métodos de coleta de dados nas fases de treinamento e teste nos experimentos. Neste trabalho é assumido que o ambiente permanece consistente entre as fases de treinamento e teste.

Fase *offline*. Foram utilizados 49 pontos de treinamento. Os pontos de treinamento são os pequenos pontos pretos mostrados na Figura 3.5. Para cada ponto foram coletados RSSI dos pontos de acesso Wi-Fi, dos dispositivos compatíveis com Bluetooth e dos nós sensores Zigbee. Os pontos de treinamento estavam separados por uma distância de 1,5 metros. Em cada posição, o robô ficava parado enquanto coletava 35 amostras do sinal dos APs Wi-Fi, 30 amostras dos nós sensores e 30 amostras dos dispositivos compatíveis com Bluetooth. O robô então era movido para o próximo ponto de treinamento e o procedimento de coleta de dados descrito era repetido.

Fase *online*. Na fase de testes, foram coletados amostras do sinal de RSSI em 15 pontos. Oito desses pontos foram os mesmos pontos treinados previamente e sete pontos foram pontos diferentes dos pontos que foram treinados (veja Figura 3.5). Na fase de testes foram coletados os mesmos números de amostras de RSSI coletados na fase de treinamento.

A Figura 3.6 mostra o robô coletando amostras de RSSI durante o experimento. Foi considerada apenas uma direção do robô nestes experimentos. Tanto a fase de treinamento como a fase de testes foram realizadas no mesmo dia, mas em diferentes horários (treinamento foi realizada no período da manhã-tarde e a fase de testes foi realizada no período tarde-noite). Para avaliar a exatidão do método, foi utilizada a distância euclidiana entre a verdadeira localização e a localização estimada.

3.2.3 Resultados e Discussão

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com os experimentos realizados. Serão apresentadas as seguintes análises: (i) erro médio de localização

⁴O *iwlist* é uma aplicação para redes sem fio padrão incluída na maioria das distribuições do sistema operacional Linux. Essa aplicação retorna algumas informações da rede sem fio.

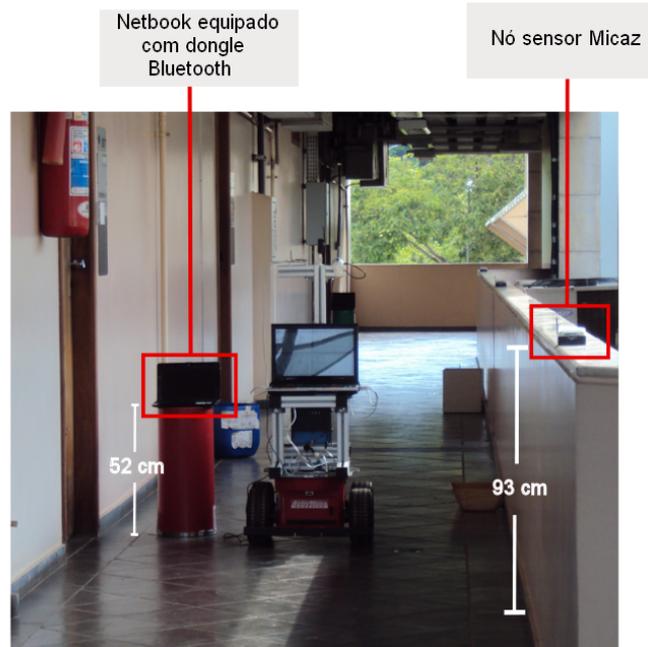


Figura 3.6. Robô coletando dados durante o experimento. O robô coleta RSSI dos *dongles* Bluetooth conectados aos *netbooks*, dos nós sensores Micaz e dos pontos de acesso Wi-Fi (não mostrados na figura).

(considerando todos os pontos de teste) para cada tecnologia e para cada combinação de tecnologias, considerando diferentes valores de K ; (ii) robustez do sistema (robustez será medida pela qualidade da localização em pontos nos quais não ocorreu treinamento); (iii) como a variação do número de *beacons* utilizados afeta o resultado e (iv) como a interferência entre as tecnologias pode reduzir o desempenho do sistema de localização.

3.2.3.1 Análise do Erro médio de Localização

Utilização de apenas uma tecnologia. A Figura 3.7 mostra o erro médio para cada tecnologia associado a diferentes valores de K . A tecnologia Wi-Fi obtém os melhores resultados e a tecnologia Bluetooth os piores. O sucesso da tecnologia Wi-Fi pode ser atribuído ao número de APs utilizados. Esse número aumenta a probabilidade de um acerto de localização. Como há muitos valores de referência de APs para cada posição, a variabilidade do RSSI de um AP específico tem menos impacto nos resultados. Isso acontece porque quando os valores de RSSI de um AP específico tem variabilidade alta entre as fases de treinamento e teste, o uso dos valores obtidos dos outros APs podem reduzir o erro. No caso dos dispositivos

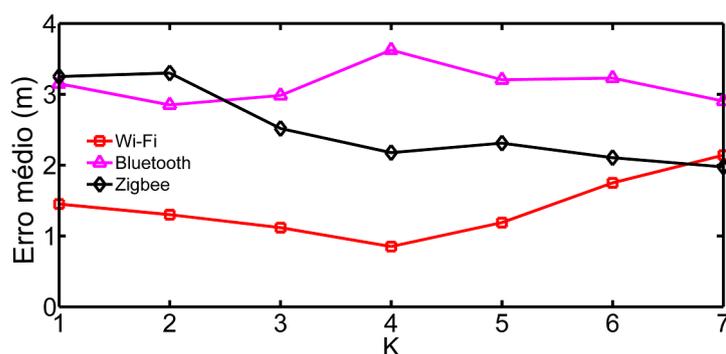


Figura 3.7. Erro médio considerando cada tecnologia para valores de K variando de 1 a 7.

compatíveis com Bluetooth e Zigbee, o alcance de comunicação é reduzido e isso implica que menos *beacons* (das respectivas tecnologias) serão detectados em cada posição de treinamento. Então, se algum deles tem uma variação alta, o impacto no resultado final será maior, já que não há muitos outros valores disponíveis (como no caso dos APs Wi-Fi) que podem ser usados para compensar o erro.

Em relação aos valores de K, para a tecnologia Wi-Fi, o erro decresce até o valor de $K = 4$ vizinhos. Depois disso, o valor de erro aumenta novamente. Isso ocorre porque para valores grandes de K, o algoritmo considera vizinhos que estão muito distantes da posição em que o robô se encontra e isso aumenta o erro da localização final. Para Zigbee é possível perceber uma tendência similar, exceto após $K=4$ o erro não aumenta mas permanece estável. Bluetooth é quase invariante ao valor de K.

Utilização de múltiplas tecnologias. A Figura 3.8 mostra o erro médio para cada combinação possível das tecnologias. Os casos que utilizam Wi-Fi produzem melhores resultados que aqueles que não utilizam essa tecnologia. Wi-Fi + Bluetooth e Wi-Fi + Zigbee têm desempenhos similares para $K \leq 4$. Para grandes valores de K, a combinação Wi-Fi + Zigbee tem desempenho melhor que a combinação Wi-Fi + Bluetooth. Mais especificamente, para valores de K de 2 até 4, o erro é cerca de 1 metro, que é um valor razoável considerando que o ambiente não é estruturado e os “sensores” usados não foram projetados para obter informações de localização.

A combinação Bluetooth + Zigbee tem desempenho melhor que cada uma dessas tecnologias operando individualmente. Portanto, é uma opção razoável utilizar a combinação se essas são as únicas tecnologias disponíveis. Apesar da

influência ruim do Bluetooth, a combinação de todas as três tecnologias obtêm bons resultados, como mostrado na curva em preto no gráfico da Figura 3.8.

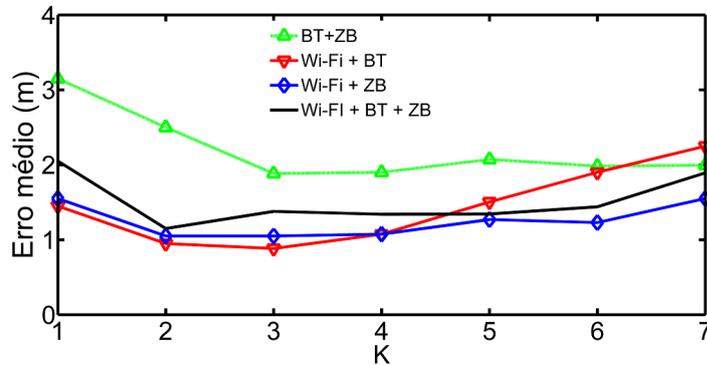


Figura 3.8. Erro médio considerando todas as combinações de tecnologias para valores de K variando de 1 a 7.

3.2.3.2 Análise da influência do número de *beacons* utilizados para realizar a localização

Nesta análise foi investigado como o número de *beacons* utilizados durante as fases de treinamento e testes afeta a qualidade da localização. Para fazer a análise foi utilizado o seguinte procedimento:

1. Para cada tecnologia foi avaliado o valor do erro médio, considerando um número, n_b , variável de *beacons* utilizados na fase de treinamento e testes. Os intervalos de valores para cada tecnologia é mostrado na tabela 3.3
2. Para cada tecnologia, foram escolhidos, aleatoriamente, n_b *beacons* para serem utilizados. O procedimento de escolha aleatória foi repetido 30 vezes para cada valor de n_b e a média dos resultados foi tomada como resultado final.

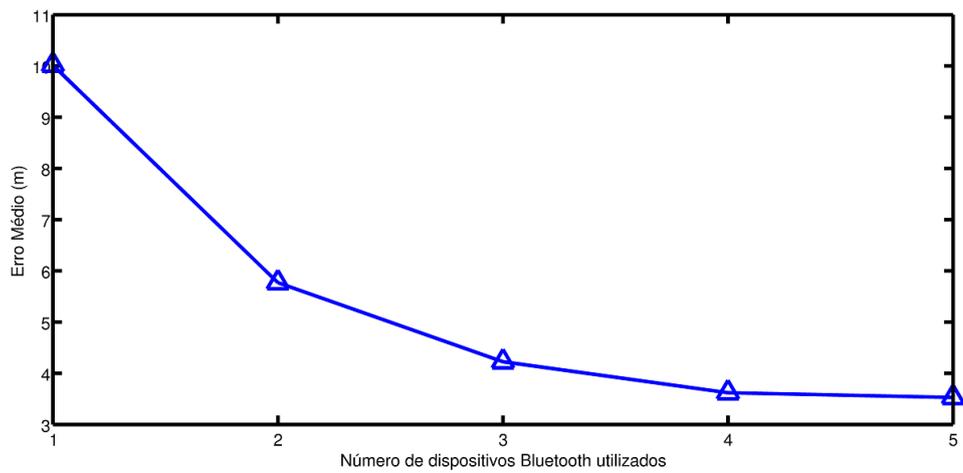
Tabela 3.3. Número de *beacons* utilizados para fazer a análise. Para cada tecnologia, n_b *beacons* foram utilizados. n_b foi variado de acordo com a informação mostrada na segunda coluna da Tabela.

Tecnologia	Número de <i>beacons</i> utilizados na análise
Bluetooth	$1 \leq n_b \leq 5$
Zigbee	$1 \leq n_b \leq 7$
Wi-Fi	$3 \leq n_b \leq 11$

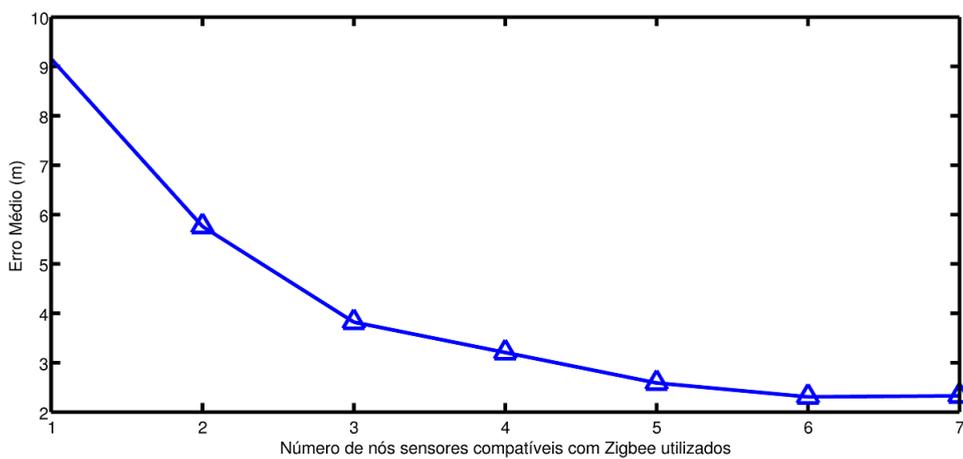
Essa média de 30 execuções deste procedimento foi utilizada para gerar a Figura 3.9. Como era esperado, quando o número de pontos de acesso utilizados diminui, o erro médio de localização aumenta. Isso ocorre para as três tecnologias utilizadas. Observando o gráfico para a tecnologia Wi-Fi é possível perceber que se o número de pontos de acesso disponíveis for aproximadamente igual ao número de dispositivos Bluetooth e Zigbee, a qualidade da localização não será melhor, como ocorreu nos casos mostrados na análise do erro médio. Isso confirma a hipótese de que o sucesso da tecnologia Wi-Fi para realizar a localização está associado à quantidade de pontos de acesso disponíveis dessa tecnologia. De forma geral, podemos dizer que quanto maior o número de pontos de acesso disponíveis, melhor a qualidade da localização. Entretanto, não se deve esperar que o desempenho melhore além de um determinado limite. Como mostrado em [Honkavirta et al., 2009], depois de um determinado limiar, não ocorre nenhuma melhoria com a adição de mais *beacons*.

3.2.3.3 Análise do comportamento do método quando as posições de teste são diferentes das posições nas quais ocorreu treinamento.

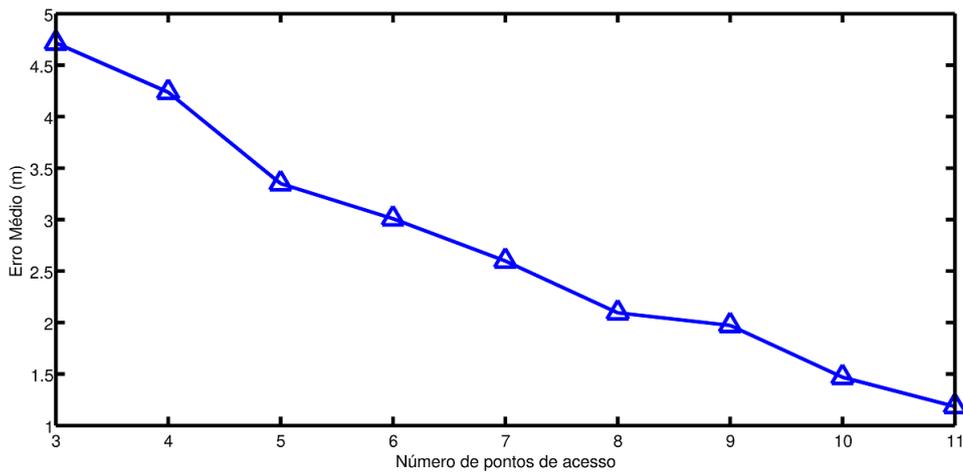
A Figura 3.10 mostra o erro médio para posições treinadas e não treinadas (para ver exatamente quais são os pontos treinados e não treinados ver Figura 3.5). O objetivo é verificar como o método de mapa de assinaturas comporta-se quando a posição de teste não é uma das posições utilizadas na fase de treinamento. Isso é importante porque em aplicações reais o objeto alvo dificilmente vai estar exatamente em um dos pontos de treinamento quando fizer uso do sistema de localização. O resultado mostra que, em geral, a qualidade da localização em posições que não foram previamente treinadas é comparável à qualidade obtida em posições que foram treinadas. Isso sugere que, embora o ambiente tenha sido discretizado e apenas alguns pontos específicos tenham sido treinados, o método forneceria bons resultados para outros pontos, na mesma região, diferentes daqueles mostrados na Figura 3.5.



(a) Bluetooth



(b) Zigbee



(c) Wi-Fi

Figura 3.9. Influência do número de *beacons* utilizados na qualidade da localização. (a) Análise considerando *beacons* Bluetooth. (b) Análise considerando *beacons* Zigbee. (c) Análise considerando *beacons* Wi-Fi. Para todas as tecnologias, quando o número de *beacons* aumenta, o erro médio de localização diminui.

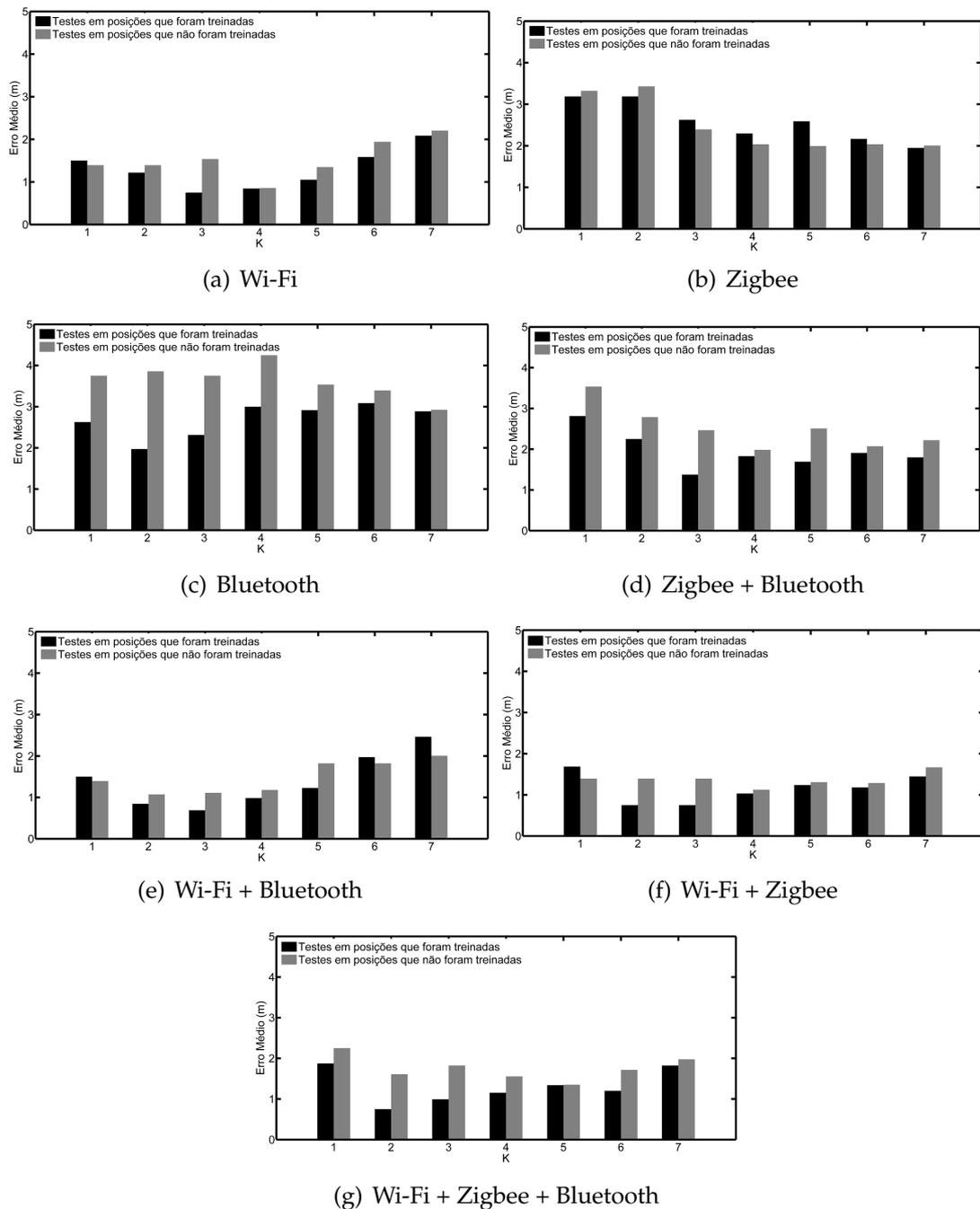


Figura 3.10. Erro médio de localização considerando posições treinadas e não treinadas para cada tecnologia (a)-(c) e para cada combinação de tecnologias (d)-(g). Em geral, os resultados em posições não treinadas são piores que os resultados em posições que foram treinadas. Entretanto, a diferença entre os erros médios para cada caso são pequenas, como mostrado na figura. O método consegue fornecer resultados razoáveis, mesmo em posições nas quais não houve treinamento.

3.2.3.4 Análise do Interferência entre as tecnologias

Neste trabalho não foi considerada o impacto da interferência entre as tecnologias na qualidade da localização. De fato, nenhum dos trabalhos anteriores considerou este fenômeno. Entretanto, enquanto o uso de múltiplas tecnologias RF para realizar localização crescer esse fator deve ser considerado e o impacto quantitativo da interferência entre as tecnologias deve ser mensurado. A Figura 3.11 mostra um exemplo dos problemas que podem surgir por causa da interferência. Foi realizado um experimento simples em que foram coletados o número de diferentes pontos de acesso que o adaptador de rede sem fio conseguia detectar⁵. Na primeira fase do experimento (primeiro terço do gráfico mostrado na Figura 3.11) não foram coletados dados do dispositivo compatível com Bluetooth. Na segunda fase, coletou-se dados do Bluetooth. O número de pontos de acesso detectados diminuiu imediatamente, como mostrado no segundo terço do gráfico. Finalmente, a coleta de dados dos dispositivos Bluetooth foi interrompida e o número de pontos de acesso Wi-Fi detectados pelo adaptador de rede sem fio aumentou novamente. Um simples experimento como esse mostra a relevância e necessidade de realização de mais pesquisas sobre o impacto que a interferência pode ter em sistemas de localização em ambientes internos baseados em RF que utilizam múltiplas tecnologias.

De fato, são necessários mais estudos para avaliar a influência de interferência entre as tecnologias RF. Qual o impacto quantitativo que essa interferência pode ter na qualidade da localização? Existe alguma solução para coexistência de tecnologias sem fio que pode eliminar esse impacto? Se os *beacons* das diferentes tecnologias estivessem posicionados no mesmo local (um dispositivo de cada tecnologia posicionado aproximadamente no mesmo local que os dispositivos das outras tecnologias) o resultado obtido seria melhor (mais exato) devido a utilização de mais *beacons* (mais de uma tecnologia significaria mais *beacons*) ou pior devido a interferência entre as tecnologias? Em outras palavras, o benefício de utilizar mais *beacons* (de múltiplas tecnologias) supera a perda que pode ser causada pela interferência entre eles? É necessário realizar mais investigações para tentar responder essas perguntas. Em [Lau et al., 2009], é mostrado que sistemas de localização baseados em Zigbee são afetados por interferência de sinais Wi-Fi, sendo que o 80° percentil do erro de localização aumenta de 1,6 para 3,9 metros quando

⁵Os pontos de acesso no prédio em que os experimentos foram realizados têm a funcionalidade de fazer *broadcast* de múltiplos SSID (do inglês - Service Set Identifier) para o mesmo dispositivo físico. O aplicativo *iwlist* retorna um endereço MAC diferente para cada SSID. Dessa forma, o número de dispositivos físicos disponíveis é menor que o mostrado no gráfico da Figura 3.11. O número real de pontos de acesso é 25 – Cisco® APs gerenciados pelo grupo de administradores de rede do departamento – mais os APs de alguns laboratórios de pesquisa e alguns de prédios adjacentes.

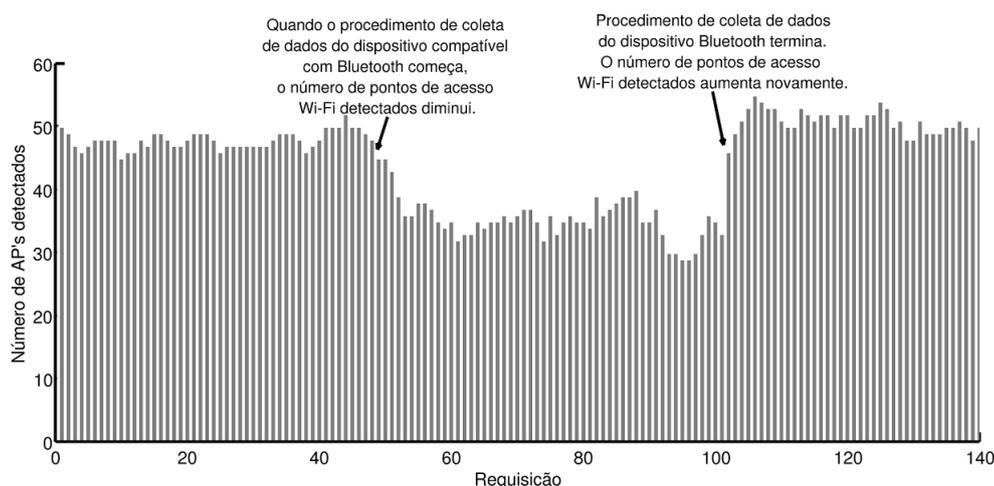


Figura 3.11. Resultado da interferência do sinal Bluetooth no número de APs Wi-Fi detectados pelo adaptador de rede sem fio. A coleta de dados dos dispositivos compatíveis com Bluetooth causa uma redução no número de pontos de acesso Wi-Fi detectados.

há interferência. A principal fonte de erros são as perdas de pacotes enviados pelos *beacons*. Como os autores concluem, é necessário construir sistemas de localização RF que sejam tolerantes à interferências.

3.2.3.5 Comentários Finais

Tempo de treinamento. A fase de treinamento demanda muito tempo para ser realizada. Isso é um fato que se repete em quase todos os trabalhos que realizam estudos de localização baseados em mapas de assinaturas. Dessa forma, o tempo de treinamento é um problema prático que afeta qualquer sistema baseado nessa técnica.

Para construir sistemas de localização efetivos, baseados em mapas de assinaturas, o tempo gasto na fase de treinamento deve ser reduzido. Existem diferentes abordagens para fazer isso. Uma das possibilidades é reduzir a resolução do sistema (como foi mostrado no Capítulo 2, no trabalho apresentado em [Haeberlen et al., 2004]). Uma segunda abordagem é utilizar técnicas de interpolação para reduzir o número de pontos de treinamento, sem perder a resolução. Uma terceira abordagem, mais promissora, mas que também apresenta grandes desafios de pesquisa, é a utilização de robôs para automatizar a coleta do RSSI na fase de treinamento.

Configuração geométrica dos *beacons* no ambiente. Não foram avaliadas diferentes configurações dos *beacons* no ambiente. Mais experimentos ainda precisam ser feitos para caracterizar como esse fator afeta a qualidade da localização quando o método baseado em mapa de assinaturas é utilizado.

Integração das tecnologias. Uma pergunta importante é “qual a melhor forma de utilizar múltiplas tecnologias RF para realizar localização”? Neste capítulo foi utilizado um método de concatenação dos mapas das diferentes tecnologias (Seção 3.1.4). Desenvolver e avaliar o desempenho de outros métodos comparando-os com o método de concatenação é um trabalho que ainda deve ser feito.

Generalidade do método baseado em mapa de assinaturas. O método utilizado neste capítulo é genérico o suficiente para acomodar diferentes diferentes tecnologias de RF (restritas aquelas que permitam a obtenção do RSSI), diferentes mecanismos de integração entre as tecnologias e diferentes algoritmos para fazer a comparação entre as informações obtidas na fase de treinamento e teste para estimar a posição do objeto alvo da localização (que não é restrito a robôs móveis). Essa é uma característica importante, já que os resultados obtidos podem ser aplicáveis a outros casos diferentes daquele instanciado neste capítulo.

3.3 Sumário

Neste capítulo foi apresentado o desenvolvimento e avaliação experimental do método de localização baseado em mapa de assinaturas.

A coleta dos valores de RSSI é uma parte fundamental para funcionamento do método. Ela é feita em dois momentos: (i) na fase de treinamento, quando os mapas de assinaturas são criados e (ii) na fase de testes, quando a localização, de fato, acontece.

Os mapas de assinaturas são criados a partir dos valores de RSSI coletados. Cada tecnologia possui seu próprio mapa. Para avaliar a combinação das tecnologias, um novo mapa é criado fazendo a concatenação dos mapas de cada tecnologia. O novo mapa é então utilizado para realizar a localização.

Após a criação do mapa, o algoritmo K-NN é utilizado para estimar a localização do robô. Não obstante sua simplicidade conceitual e de implementação, o K-NN fornece bons resultados, sendo considerado um dos 10 melhores algoritmos de mineração de dados pela comunidade de pesquisadores da área. Essa foi a principal razão pela qual ele foi escolhido para realizar a localização neste trabalho.

Para avaliar o método foram realizados experimentos em uma área de testes de tamanho considerável (33×22 metros) com 49 pontos de treinamento e 15 pontos de testes. Oito dos pontos de testes eram pontos nos quais houve treinamento. Os sete pontos restantes foram pontos nos quais não houve treinamento prévio.

Foram realizadas análises do (i) erro médio de localização, (ii) robustez do método, (iii) como a variação do número de pontos de acesso afeta a qualidade da localização e (iv) como a interferência entre as tecnologias pode causar uma perda no desempenho da localização. Os resultados dessas análises mostraram que a tecnologia Wi-Fi é a que produz os menores erros médios, enquanto a tecnologia Bluetooth produz os piores resultados. O sucesso da tecnologia Wi-Fi pode ser explicado pelo maior número de pontos de acesso utilizados. Isso foi comprovado pela análise da influência do número de pontos de acesso na qualidade da localização. Para todas as tecnologias, mais *beacons* levam a menores erros de localização. A utilização de múltiplas tecnologias gera uma situação em que mais *beacons* estão disponíveis para serem utilizados pelo algoritmo de localização. Como já foi dito, o maior número de *beacons* pode gerar resultados com erros menores. Portanto, a combinação das tecnologias tem grande potencial para melhorar a exatidão da localização. Também foi mostrado que o algoritmo K-NN é robusto, i.e., a qualidade da localização em pontos do ambiente que não foram treinados é comparável àquela obtida em pontos que foram treinados. Ao fim do capítulo algumas limitações e desafios foram discutidos. Na utilização do método de mapa de assinaturas, o tempo gasto na fase de treinamento é um fator limitante. É necessário diminuir esse tempo para tornar o método mais prático. Outra questão importante que merece atenção é como a interferência entre as tecnologias afeta o resultado da localização. Foi demonstrado, por meio de um experimento, que a simples coleta de dados simultânea das tecnologias Bluetooth e Wi-Fi reduz o número de APs Wi-Fi detectados. Isso é um fator relevante, uma vez que o número de APs utilizados tem impacto direto no erro de localização. Dessa forma, mais pesquisas são necessárias para caracterizar melhor como a interferência entre as tecnologias afeta a localização e para criar formas de superar esse problema.

No próximo capítulo será apresentado e avaliado o método de localização baseado em modelos de propagação. É um método completamente diferente do método apresentado neste capítulo. Vários aspectos do método serão avaliados e discutidos.

Capítulo 4

Localização Baseada em Múltiplas Tecnologias RF Usando Modelos de Propagação

Modelo: Representação de um fenômeno físico [...]

Propagar: Movimentar-se através de um meio, irradiar-se [...]

Dicionário Houaiss

No capítulo anterior foi apresentado o método que utiliza mapas de assinaturas. Esse método requer uma fase de treinamento para funcionar adequadamente. Neste capítulo serão estudados aspectos da localização baseada em múltiplas tecnologias RF utilizando um método que não requer nenhum treinamento prévio. Os objetivos deste capítulo são:

1. Apresentar o método utilizado para realizar localização utilizando múltiplas tecnologias RF, baseado em modelos de propagação.
2. Apresentar e discutir os resultados experimentais obtidos com a aplicação desse método.

O capítulo está organizado como descrito a seguir. Na Seção 4.1 será apresentada uma visão geral e detalhes de cada etapa do método proposto. A coleta

de dados de cada tecnologia RF, a técnica de trilateração e a forma como o filtro de Kalman Estendido (*Extended Kalman Filter*, em inglês) foi utilizado serão descritos nessa seção. Na Seção 4.2, serão descritos o arcabouço experimental utilizado e os resultados obtidos. Também serão discutidos diversos aspectos relativos aos resultados. A Seção 4.3 encerra este capítulo com a apresentação de um sumário.

4.1 Metodologia

Nesta seção será discutida a metodologia usada na abordagem que utiliza modelo de propagação do sinal de RF. Primeiro, é apresentada uma visão geral do método. A seguir, é descrito o modelo de propagação utilizado. Por fim, são apresentadas a técnica de trilateração e a forma como o EKF foi usado para estimar a localização.

4.1.1 Visão Geral

Figure 4.1 presents an overview of the RF propagation model-based localization method. In the first step the RF signal from the beacons distributed in the environment is received by the RF devices embedded in the robot. Then, the RSSI is calculated from these signals. In the next step, a RF propagation model is used to estimate the distance between the beacon signal transmitter and the robot. The distances generated by the model are used as input to the method that will estimate the location of the robot. We use EKF. The EKF uses the robot's odometer information and the location of the beacons, to estimate the final location of the robot (4B). Each of these steps is described in more detail in the following sections.

4.1.2 Modelagem da propagação do Sinal de RF

Um modelo matemático de propagação do sinal de RF representa a relação entre a potência do sinal recebido e a distância entre o transmissor e o receptor. Em outras palavras, o modelo é utilizado para explicar como o sinal de RF se propaga no meio (como sua energia é dissipada enquanto se propaga) e, conseqüentemente, qual será a potência desse sinal a uma determinada distância, d , da fonte emissora do sinal.

A propagação de um sinal RF é afetada por fatores como, por exemplo, reflexão, difração e espalhamento [Bahl & Padmanabhan, 2000; Rappaport, 2001]. Dependendo do tipo de ambiente considerado, a intensidade e variedade desses fatores é diferente. É fato bem conhecido que a propagação do sinal RF ocorre de forma bem distinta em ambientes internos e externos. Em geral, a criação de

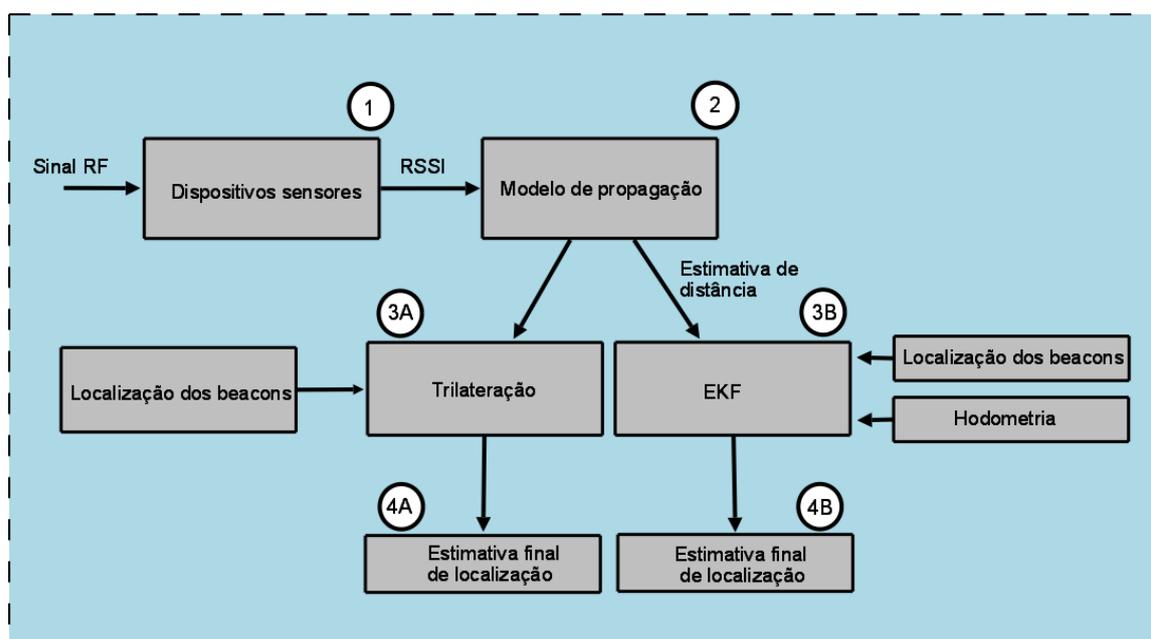


Figura 4.1. Diagrama do método utilizado para fazer localização baseado em modelos de propagação do sinal de RF.

modelos de propagação em ambientes internos é mais desafiadora. Isso ocorre porque, nesses ambientes, alguns dos fenômenos citados acima ocorrem de forma mais pronunciada, devido a maior presença de obstáculos (paredes, portas, janelas, etc.).

Diante desses desafios e das peculiaridades de cada ambiente, diversos modelos foram propostos na literatura para explicar como o sinal de RF se propaga em ambientes externos e internos. Está fora do escopo deste trabalho oferecer uma lista exhaustiva dos modelos existentes e/ou uma descrição de todos eles. Em [Rappaport, 2001, Cap. 3 e Cap. 4] são apresentadas informações abrangentes sobre diversos modelos e suas características. O leitor interessado poderá consultar essa referência.

Neste trabalho, será utilizado o modelo com atenuação pela distância (*log-distance path loss model*, em inglês). Os modelos de atenuação com a distância baseiam-se em diversas análises empíricas e teóricas que indicam que a potência média do sinal diminui de forma logarítmica com a distância. Modelos desse tipo são largamente utilizados na literatura ([Win et al., 2011]). Eles modelam a atenuação do sinal considerando a separação entre transmissor e receptor. A atenuação do sinal, uma grandeza positiva (expressa em dB¹), representa a diferença

¹Para maiores detalhes sobre o significado das unidades de medida dB e dBm, consultar o Apêndice B.

entre a potência com a qual o sinal foi transmitido e a potência com a qual o sinal é recebido. O modelo é descrito pelas equações 4.1² e 4.2 (para mais detalhes sobre o modelo ver [Rappaport, 2001, Cap. 3]).

$$P_r(d)(dBm) = P_t - P_{l_0}. \quad (4.1)$$

$P_r(d)$ é a potência do sinal recebido quando a distância entre transmissor e receptor é d , P_t é a potência de transmissão (em dBm) e P_{l_0} é a atenuação que o sinal de rádio sofre ao se propagar do transmissor até o receptor. P_{l_0} é expressa por

$$P_{l_0}(dB) = 10 \log[P_0(d_0)] + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma, \quad (4.2)$$

em que

d_0 = distância de referência,

$P_0(d_0)$ = atenuação na distância de referência d_0 ,

n = expoente de atenuação (varia de acordo com o ambiente no qual o sinal se propaga) e

X_σ = variável aleatória gaussiana, de média zero e variância σ^2 . Esta variável descreve o efeito de sombreamento (*shadowing*) causado por obstáculos no ambiente. Esse fenômeno faz com que, para uma mesma distância entre transmissor e receptor, a potência recebida seja diferente. Valores típicos de n e σ para diversos tipos de ambientes podem ser encontrados em [Andersen et al., 1995, Tabela 2].

Tabela 4.1. Valores estimados para os parâmetros do modelo de propagação para cada uma das três tecnologias.

Tecnologia	$P_t(dBm)$	$P_{d_0}(dB)$	$d_{0(m)}$	n
Bluetooth	0	45.57	0.1	2.0
Zigbee	-7	43.2	0.1	1.3
Wi-Fi	7	40	1	2.9

²Embora à primeira vista a subtração expressa na equação 4.1 possa parecer estranha, é possível subtrair P_{l_0} (expresso em dB) de P_t (expresso em dBm) porque P_{l_0} representa a atenuação (ou perda) que o sinal sofre entre o transmissor e receptor. Assim, a interpretação da equação é que o sinal com potência P_t é atenuado por uma magnitude P_{l_0} , resultando em um sinal recebido com potência P_r .

Como pode ser observado na Equação 4.2, o modelo possui alguns parâmetros. Para estimar esses parâmetros foram coletadas amostras de RSSI em experimentos nos quais foram utilizados dispositivos compatíveis com as tecnologias Wi-Fi, Bluetooth e Zigbee. Os dados obtidos foram ajustados³ ao modelo apresentado nas equações 4.1 e 4.2. A Tabela 4.1 mostra os parâmetros estimados para cada uma das tecnologias. Os gráficos da Figura 4.3 mostram os ajustes dos dados empíricos ao modelo de atenuação pela distância (sem considerar X_{σ}).

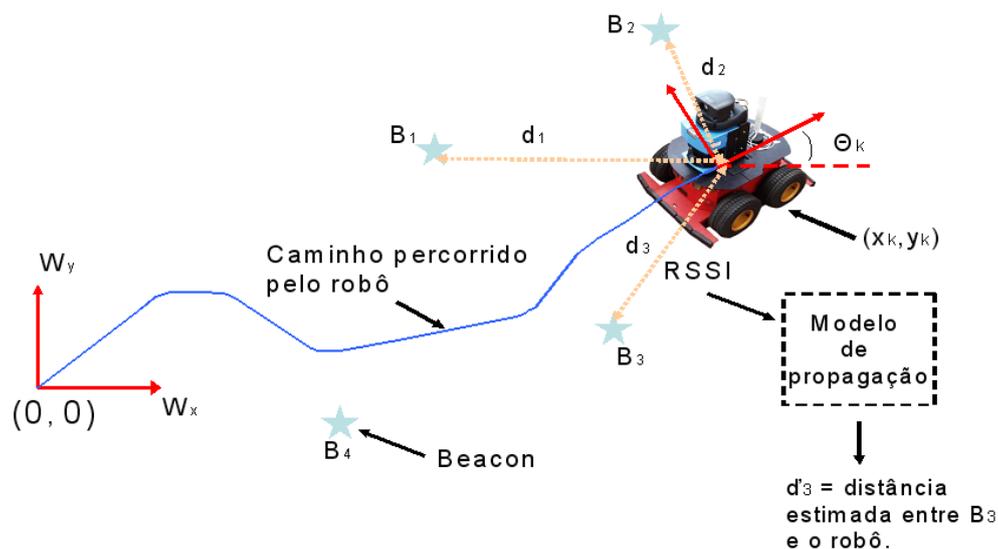
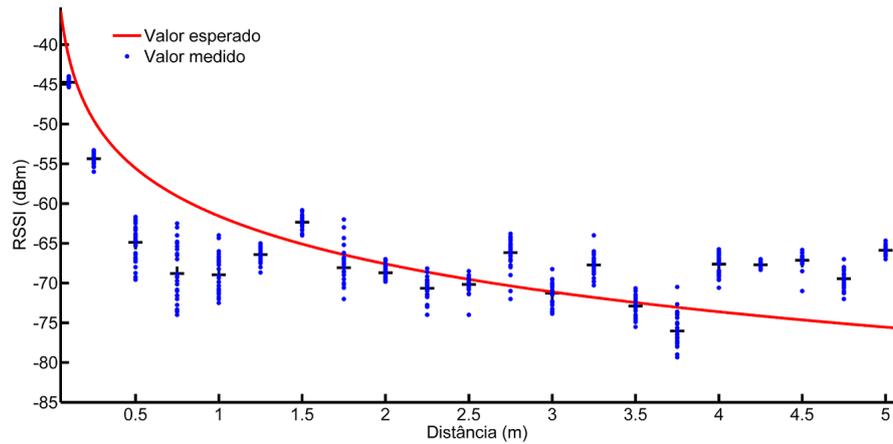


Figura 4.2. Modelo de propagação e a interação entre robô e *beacons*. Baseado em [Djugash et al., 2006, Figura 1]. (Melhor visualizado em cores).

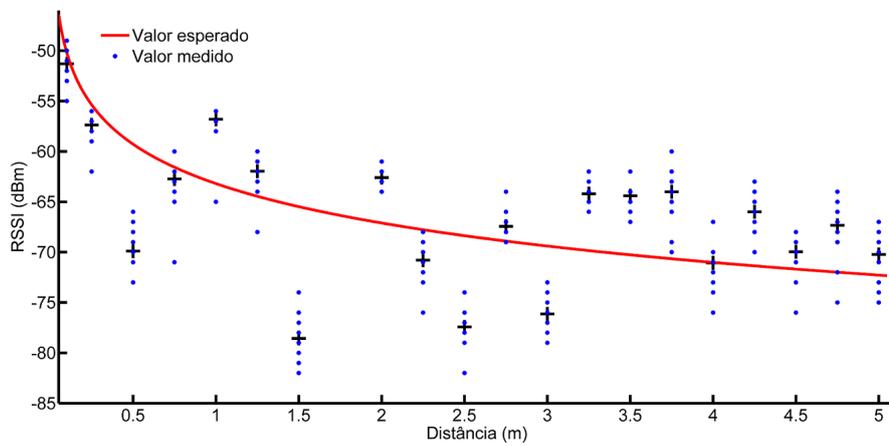
A Equação 4.2 é utilizada para estimar a potência do sinal recebido a partir da distância entre o transmissor e o receptor. Entretanto, no caso do problema tratado neste trabalho, o que deseja-se é a situação oposta, ou seja, a potência recebida é conhecida e deseja-se estimar a distância entre o transmissor e o receptor a partir dela. A inversa da função apresentada na Equação 4.2 é utilizada para gerar as estimativas de distâncias entre o robô e os *beacons*, a partir dos valores de RSSI coletados nos dispositivos embarcados no robô.

A Figura 4.2 ilustra, conceitualmente, o processo de estimação dessas distâncias a partir da utilização do modelo de propagação. Após a aplicação do modelo as distâncias estimadas são, então, fornecidas como entrada para o método que irá estimar a posição do robô.

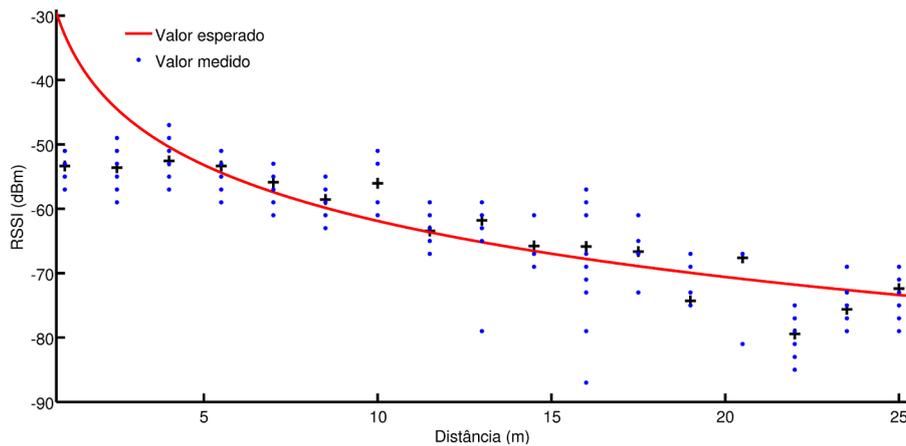
³O ajuste de curvas foi feito utilizando a ferramenta “cftool” do Matlab.



(a) Bluetooth



(b) Zigbee



(c) Wi-Fi

Figura 4.3. Valores de RSSI obtidos dos sinais recebidos por um (a) dispositivo Bluetooth, (b) dispositivo Zigbee e (c) ponto de acesso Wi-Fi. Os marcadores em forma de + indicam a média dos valores representados pelos pontos em azul. A curva mostra o ajuste realizado utilizando o modelo de atenuação pela distância considerando os parâmetros mostrados na Tabela 4.1.

4.1.3 Estimação da posição do robô

Nesta seção serão apresentados os métodos utilizados para fazer a estimativa da posição do robô. Foram utilizados dois métodos. O primeiro método é a trilateração, o segundo é o filtro de Kalman Estendido.

4.1.3.1 Trilateração

Trilateração é um método geométrico utilizado para localizar um objeto conhecendo-se a localização de três outros objetos (chamados de *landmarks*, ou *beacons*) e a distância entre esses objetos e o objeto alvo da localização. Para entender melhor como funciona a trilateração, considere a Figura 4.4.

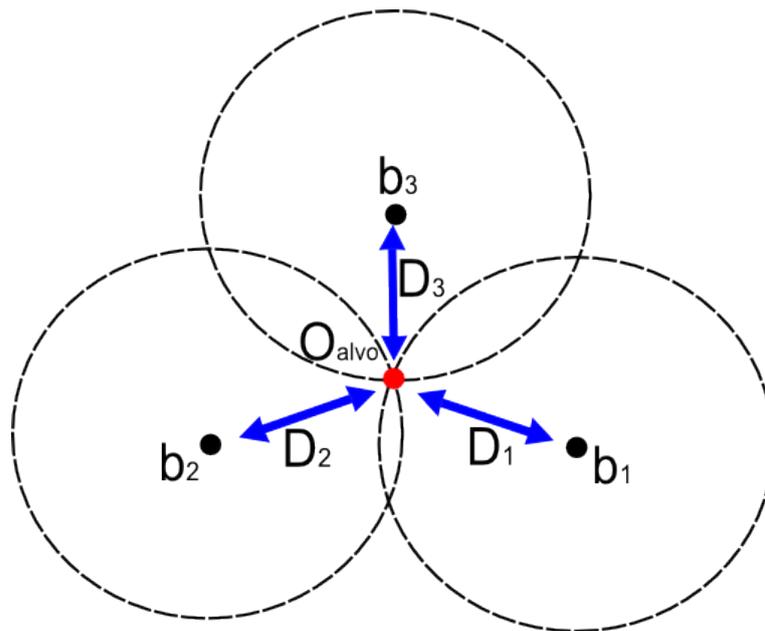


Figura 4.4. Trilateração. b_1 , b_2 e b_3 representam *beacons*. O_{alvo} é o objeto cuja localização deseja-se obter. D_1 , D_2 e D_3 são as distâncias entre O_{alvo} e b_1 , b_2 e b_3 , respectivamente. Se as posições de b_1 , b_2 e b_3 e as distâncias D_1 , D_2 e D_3 forem conhecidas é possível estimar a posição de O_{alvo} resolvendo o Sistema 4.3.

Se as distâncias D_1 , D_2 e D_3 e as posições dos *beacons*, b_1 , b_2 e b_3 , são conhecidas, então, é possível calcular a posição de O_{alvo} . Seja (x_i, y_i) o par ordenado que contém as coordenadas do *beacon* b_i , $1 \leq i \leq 3$, e, (x_o, y_o) , o par ordenado que contém as

coordenadas do objeto alvo O_{alvo} . Nesse caso, deveremos ter:

$$\begin{cases} (x_1 - x_o)^2 + (y_1 - y_o)^2 = r_1^2 \\ (x_2 - x_o)^2 + (y_2 - y_o)^2 = r_2^2 \\ (x_3 - x_o)^2 + (y_3 - y_o)^2 = r_3^2 \end{cases} \quad (4.3)$$

O ponto (x_o, y_o) deve satisfazer todas as equações dos círculos mostradas no Sistema 4.3. Assim, resolvendo o sistema, obtêm-se os valores de (x_o, y_o) .

Entretanto, o caso mostrado na Figura 4.4 não representa de forma fidedigna o que ocorre na prática. Como as medidas de distâncias têm uma incerteza a elas associada, geralmente os círculos não se interceptam como mostrado na figura. Devido a essas incertezas presentes nas medidas de distância, é mais provável que ocorram casos como aquele mostrado na Figura 4.5.

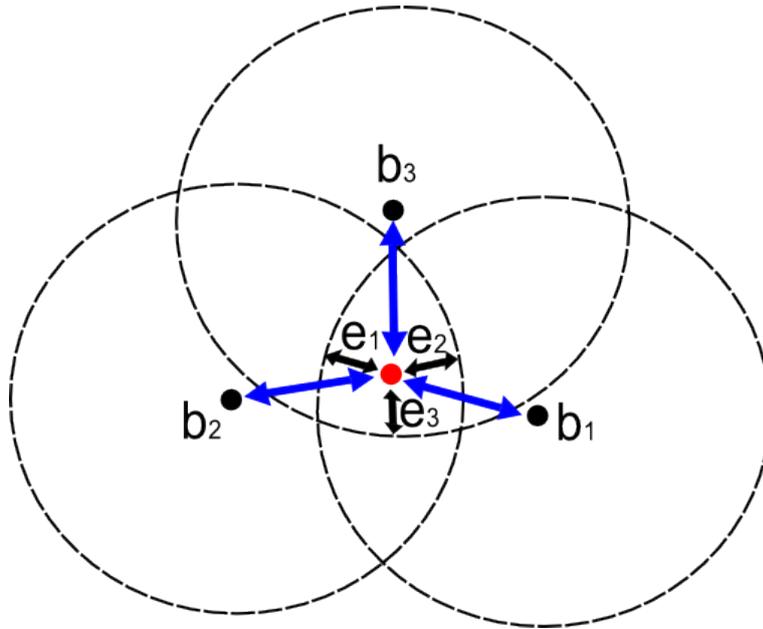


Figura 4.5. Devido aos erros presentes nas estimativas da distâncias obtidas por meio dos sensores, existe uma diferença entre as distâncias reais (D_1 , D_2 e D_3 , representadas pelas seta azuis) e os raios dos círculos (r_1 , r_2 e r_3 , não mostrados na figura). Os círculos não se interceptam em um único ponto e, portanto, não é possível estimar a localização do ponto desconhecido simplesmente resolvendo um sistema similar ao Sistema 4.3. Além do caso mostrado na figura, existem outros possíveis casos de “não-interseção” entre os círculos. Em [Gwon et al., 2004] são apresentados vários tipos de padrões de “não-interseções” que ocorrem quando utiliza-se trilateração em aplicações práticas, nas quais sempre há incerteza na estimação das distâncias.

Na Figura 4.5, o objeto alvo não pode ser localizado utilizando-se o método

apresentado acima, uma vez que não há ponto de interseção. Nesse caso, o que se faz é buscar minimizar a soma dos erros e_i mostrados na figura (e_i é a diferença entre o raio r_i e a distância entre a posição do *beacon* b_i e o ponto O_{alvo} (círculo vermelho) com coordenadas (x_0, y_0)). A nova formulação do problema é representada pelo Sistema 4.4:

$$\begin{cases} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 - r_1^2 = e_1 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 - r_2^2 = e_2 \\ (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 - r_3^2 = e_3 \end{cases} \quad (4.4)$$

Desta forma, o problema passa a ser um problema de otimização, cujo objetivo é encontrar (x_0, y_0) que minimiza a soma dos erros, e_i , $1 \leq i \leq n$ (em que n corresponde ao número de círculos), mostrados no Sistema 4.4.

Para resolver esse problema, é utilizado um método de otimização não linear. Nesta dissertação foi utilizado um método de otimização (mínimos quadrados) não linear do Matlab[®] 7.8 (*The Mathworks, Cambridge, MA, EUA*). A descrição do método pode ser encontrada no arquivo de ajuda da função *lsqnonlin* do Matlab⁴. Para cada *beacon* utilizado na trilateração, tem-se uma equação correspondente e, conseqüentemente, o número de equações utilizadas no Sistema 4.4 será igual ao número de *beacons* utilizados na trilateração.

Para que o método de otimização funcione, é necessário fornecer a ele um ponto inicial. Para calcular esse ponto, foi utilizado a média das coordenadas dos pontos mais próximos do objeto alvo, considerando as distâncias estimadas pelo modelo de propagação. O método de otimização é executado partindo do ponto inicial calculado e produz como resultado uma estimativa da localização do robô.

Além da trilateração foi utilizado um outro método para estimar a posição do robô, o filtro de Kalman Estendido. O método é apresentado na próxima seção.

4.1.3.2 Filtro de Kalman e Filtro de Kalman Estendido

Nas próximas seções serão descritos alguns conceitos básicos do filtro de Kalman e do filtro de Kalman Estendido. Depois disso, será mostrado como o filtro foi utilizado nesta dissertação.

⁴Para acessar o conteúdo do arquivo de ajuda é necessário digitar "help lsqnonlin" em um *prompt* do Matlab[®]. O arquivo de ajuda contém explicações sobre o funcionamento do método.

4.1.3.3 Filtro de Kalman

O Filtro de Kalman foi descrito pela primeira vez por R.E. Kalman em um artigo em 1960 [Kalman, 1960]. O filtro apresenta um solução para o problema de filtragem linear de dados discretos e é utilizado para várias aplicações desde então. A seguir será apresentada uma descrição breve ⁵ do filtro de Kalman e a forma como este filtro foi utilizado nesta dissertação.

O Filtro de Kalman é descrito por um conjunto de equações matemáticas que implementa um estimador de estados ótimo. O filtro é utilizado para resolver o problema de estimar o estado $x \in \mathbb{R}^n$ de um processo que funciona segundo o modelo linear estocástico

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1}, \quad (4.5)$$

com uma observação $z \in \mathbb{R}^m$ dada por

$$z_k = Hx_k + v_k. \quad (4.6)$$

As variáveis aleatórias w_k e v_k representam os ruídos do processo e das observações, respectivamente. A matriz A , de tamanho $n \times n$ relaciona o estado no tempo $k - 1$ ao estado no tempo k . A matriz B , de tamanho $n \times l$, relaciona a entrada de controle $u \in \mathbb{R}^l$ ao estado x . A matriz H , de tamanho $m \times n$ na equação de observação (4.8) relaciona o estado atual à observação z_k .

O filtro de Kalman estima o estado de um processo usando uma forma de controle em malha fechada: o filtro estima o estado do processo em um determinado tempo e depois obtém o *feedback* na forma de uma observação com ruído. Dessa forma, as equações do filtro de Kalman podem ser divididas em dois grupos: As equações de atualização do tempo e as equações de atualização das observações. As equações de atualização de tempo projetam o estado corrente e a estimativa de covariância do erro para obter as estimativas a priori para o próximo passo de tempo. As equações de atualização das observações fazem o *feedback*, ou seja, incorporam uma nova observação na estimativa a priori para obter uma estimativa a posteriori melhor.

Em geral, essa divisão das equações em dois grupos resulta em uma divisão

⁵Não é o objetivo desta seção servir como introdução completa ao filtro de Kalman. Uma referência que serve a esse propósito é [Welch & Bishop, 1995]. Grande parte do material apresentado nesta seção foi obtido nessa referência. Tratamentos mais abrangentes e profundos são apresentados em [Grewal & Andrews, 2001]. Por fim, [Welch, 2011] oferece diversos recursos e links disponíveis na internet sobre o filtro de Kalman e seus variantes.

do filtro em uma fase de predição (representada pelas equações de atualização de tempo) e uma fase de correção (representada pelas equações de atualização das observações) (ver Figura 4.6). Assim, o filtro de Kalman pode ser entendido como um algoritmo de predição-correção.

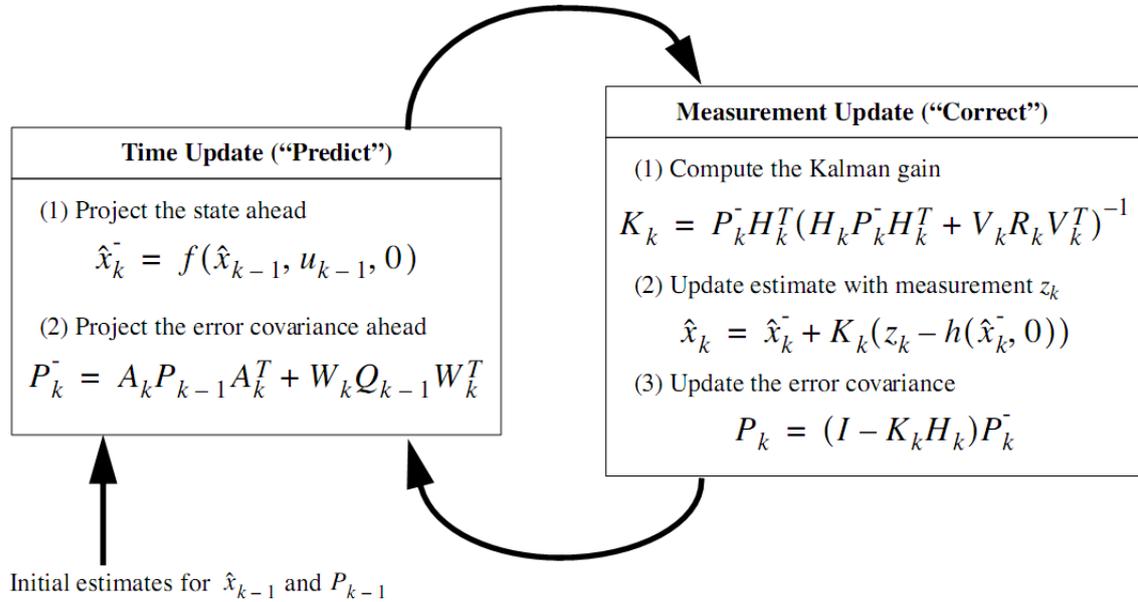


Figura 4.6. Operação do filtro de Kalman. Reproduzido de [Welch & Bishop, 1995].

4.1.3.4 Filtro de Kalman Estendido

Para utilizar o filtro de Kalman é necessário que o processo observado seja governado por uma equação estocástica linear. Quando o processo não é linear o filtro de Kalman, em sua forma original, não pode ser utilizado. Existem diversas variantes do filtro para casos não-lineares. O filtro de Kalman Estendido consegue lidar com processos não lineares. O filtro atua por meio de uma linearização em torno da média e da covariância do estado corrente do processo.

O EKF estima o estado $x \in \mathbb{R}^n$ do processo governado por uma equação estocástica não linear do tipo

$$\mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_k, \mathbf{w}_{k-1}), \quad (4.7)$$

com uma observação $z \in \mathbb{R}^m$ dada por

$$\mathbf{z}_k = h(\mathbf{x}_k, \mathbf{v}_k), \quad (4.8)$$

em que as variáveis aleatórias w_k e v_k representam o ruído de processo e observação, respectivamente. A função não linear f relaciona o estado do processo no tempo $k - 1$ ao estado no tempo k . Um tratamento matemático mais profundo do EKF pode ser encontrado em [Welch & Bishop, 1995]. Para os propósitos dessa dissertação, o importante é entender que como as equações que descrevem o processo (movimento do robô) não são lineares, não seria adequado utilizar o filtro de Kalman original. O EKF, por outro lado, consegue acomodar bem a não linearidade do processo em questão. Na próxima Seção será apresentado como o EKF foi formulado para resolver o problema tratado neste trabalho.

4.1.3.5 Formulação do EKF para o problema de localização baseada em RF

A formulação do EKF apresentada a seguir é semelhante à formulação apresentada em [Djugash et al., 2006].

Dinâmica do robô. Seja o estado do robô no tempo k representado pelo vetor \mathbf{x}_k . A dinâmica do robô pode ser descrita pelo seguinte conjunto de equações:

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} x_{k-1} + \Delta D_{k-1} \cos(\theta_{k-1}) \\ y_{k-1} + \Delta D_{k-1} \sin(\theta_{k-1}) \\ \theta_{k-1} + \Delta \theta_{k-1} \end{bmatrix} + \mathbf{w}_{k-1}, \quad (4.9)$$

em que \mathbf{w}_{k-1} é um vetor de ruído, ΔD_{k-1} é a distância percorrida e $\Delta \theta_{k-1}$ é a mudança de orientação, obtidas pelos sensores proprioceptivos do robô, por meio da hometria. Para cada vetor de controle $\mathbf{u}_k = [\Delta D_k, \Delta \theta_k]$, o EKF propaga a estimativa do estado do robô e a covariância do erro.

Modelo de Observação. O modelo de observação relaciona as observações ao estado estimado. Dessa forma, o modelo utilizado neste trabalho modela a relação entre a distância entre o robô e os *beacons* (observação) e a localização estimada do robô (estado estimado). O modelo de observação é representado pela Equação 4.10,

$$\hat{r} = \sqrt{(x_k - x_b)^2 + (y_k - y_b)^2} + v_k, \quad (4.10)$$

em que \hat{r} é a estimativa de distância entre o *beacon* do qual o sinal foi recebido, cuja localização é (x_b, y_b) , e a localização estimada do robô (x_k, y_k) . v_k é um vetor de ruído de observação, gaussiano de média zero.

4.2 Avaliação Experimental

Uma vez que todos os passos do método descrito neste capítulo foram apresentados, a seguir serão mostrados e discutidos os resultados obtidos com a utilização do método. Primeiro serão mostrados resultados obtidos em experimentos simulados e, em seguida, os resultados obtidos em experimentos reais.

Uma métrica utilizada para avaliar os resultados será o erro médio de localização, e_m , definido por

$$e_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (4.11)$$

em que (x_i, y_i) representa a posição real do robô, (\hat{x}_i, \hat{y}_i) representa a posição estimada e n é o número de iterações do método.

4.2.1 Experimentos Simulados

O ambiente Player/Stage [Gerkey et al., 2003] foi utilizado para realizar as simulações. As seguintes informações sobre as simulações são relevantes:

- Foram utilizados os cenários mostrados nas figuras 4.7 e 4.8.
- Todas as simulações apresentadas nesta Seção foram repetidas 10 vezes e todos os resultados mostram a média dessas 10 execuções.
- Um robô não-holonômico foi utilizado para fazer os caminhos mostrados em vermelho nas figuras 4.7 e 4.8.
- O caminho mostrado no Cenário 1 tem tamanho 20×10 metros, totalizando 60 metros de comprimento. O caminho do Cenário 2 tem aproximadamente 42 metros de comprimento.
- Nas figuras, o robô inicia no ponto indicado pelo triângulo verde e termina no ponto indicado pelo triângulo preto.
- Durante o percurso, em cada iteração, o robô armazena informações sobre sua hometria e os valores de distância obtidos pela aplicação do modelo de propagação aos valores de RSSI coletados dos *beacons*.
- Os resultados mostrados a seguir foram produzidos offline, ou seja, os dados foram processados após as simulações terem ocorrido.

- Para efeitos de comparação, as figuras 4.9 e 4.10 mostram os resultados da localização utilizando apenas as informações fornecidas pela hometria do robô, para os cenários 1 e 2, respectivamente. O erro de hometria considerado para todas as simulações foi configurado como 10% de erro de translação e 2% de erro de rotação.
- A velocidade do robô foi configurada em 0,4 m/s em todas as simulações.
- Todas as simulações foram realizadas em um computador Intel Core i5, 4 GB de RAM, executando sistema operacional Linux, distribuição Ubuntu 10.10 (Maverick Meerkat). Foram utilizados o ambiente de simulação Player/Stage versão 3.0.2/3.2.2 e o Matlab 7.8.0.347 (R2009a) para Linux.

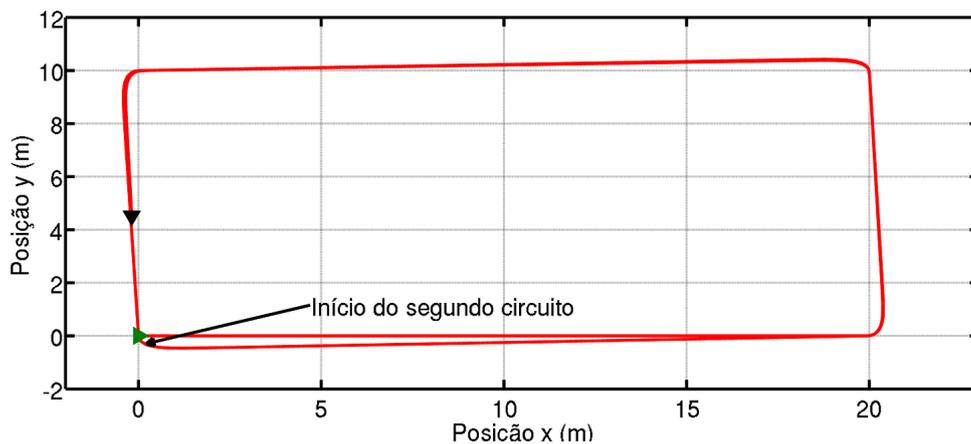


Figura 4.7. O caminho percorrido pelo robô, para o Cenário 1. O caminho é constituído por (aproximadamente) dois circuitos. O circuito começa na posição indicada pelo triângulo verde (0,0) e, seguindo na direção anti-horária, termina aproximadamente na posição indicada pelo triângulo preto (-0,18,4,52).

Módulos implementados. Os módulos de software implementados para fazer as simulações são descritos a seguir.

- **Movimento do robô.** Este método é responsável por fazer o controle do robô. O controlador foi implementado levando-se em consideração um robô não-holonômico. Foi desenvolvido em linguagem C/C++.
- **Modelo de propagação.** Módulo que simula a conversão da potência do sinal recebido para um valor de distância, utilizando o modelo apresentado na Seção 4.1.2. Desenvolvido em C/C++.

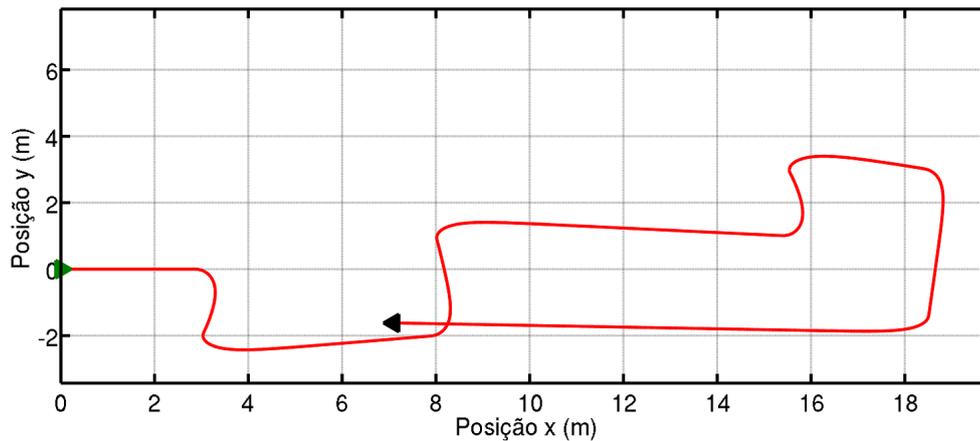


Figura 4.8. O caminho percorrido pelo robô, para o Cenário 2. O caminho começa na posição indicada pelo triângulo verde $(0,0)$ e termina aproximadamente na posição indicada pelo triângulo preto $(7.05, -1.62)$.

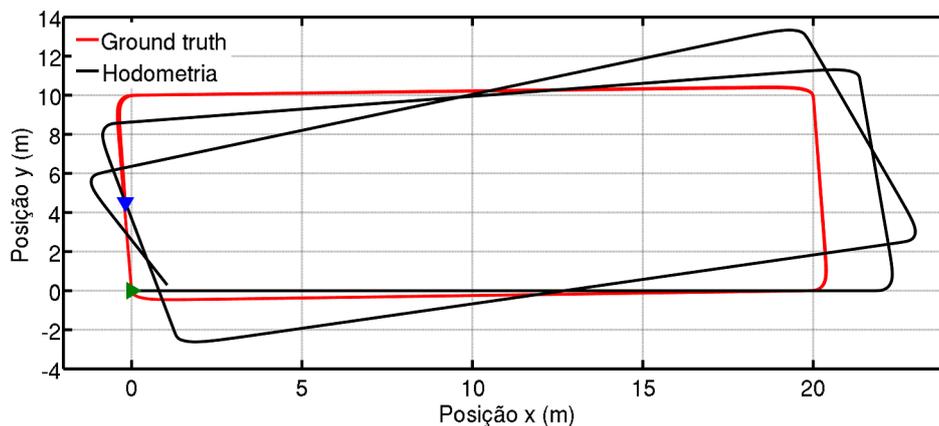


Figura 4.9. Resultado considerando apenas a odometria, para o Cenário 1.

- **EKF.** Implementação do Filtro de Kalman Estendido. Foi utilizada uma adaptação da implementação do EKF em Matlab disponível em [Matlab EKF, 2011].
- **Trilateração.** Implementa o processo de trilateração. Desenvolvido em Matlab.

Análises. As análises foram divididas em duas partes. Na primeira parte o objetivo foi compreender melhor quais os principais fatores que afetam a qualidade da localização. Apenas uma tecnologia RF foi considerada nesse momento. Foram analisados (i) a influência do valor de σ na exatidão da localização; (ii) como a topologia influencia os resultados de localização e (iii) os resultados obtidos utilizando (a) o método de trilateração e (b) o filtro de Kalman Estendido.

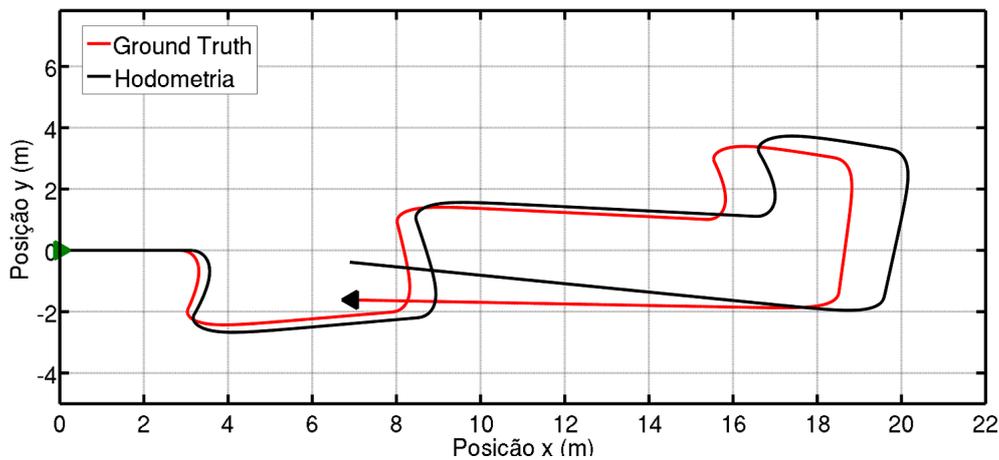


Figura 4.10. Resultado considerando apenas a hodometria, para o Cenário 2.

Na segunda parte, foram avaliados casos em que mais de uma tecnologia é utilizada. Nesse caso foi mostrado como as tecnologias podem ser usadas de forma complementar para prover resultados melhores do que aqueles obtidos pela utilização de apenas uma tecnologia.

4.2.1.1 Análise da influência do valor de σ^2

O objetivo dessa análise é investigar como o valor de σ^2 , na Equação 4.2 (reproduzida abaixo por conveniência), afeta os resultados finais de localização.

$$P_{lo}(dB) = 10 \log[P_0(d_0)] + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma$$

A análise será dividida em dois casos. O primeiro caso é aquele em que o valor de σ é muito pequeno e, para efeitos práticos, pode ser desconsiderado. A intenção é avaliar como o método de localização se comporta quando o modelo de propagação se aproxima do caso ideal. No segundo caso, serão considerados os cenários em que o valor de σ não pode ser desconsiderado.

(a) Análise do caso em que o valor de σ é muito pequeno e pode ser desconsiderado

As figuras 4.11-(a) e 4.11-(b) mostram os resultados da localização no caso em que o valor de σ é próximo de zero (o valor de σ foi definido como 0,01), para os cenários 1 e 2, respectivamente.

Isso ocorre porque o modelo de observação utilizado no filtro de Kalman descreverá com exatidão a observação real (distância entre robô e *beacons*). Dessa forma, como o modelo de observação é muito próximo da observação real, o resultado é muito bom. No caso da trilateração o resultado (não mostrado) também tem erro reduzido porque, como o erro nas medidas de distância entre o robô e os *beacons* é desprezível, o processo de otimização citado na Seção 4.1.3.1 gera resultados muito próximos do *ground truth*⁶.

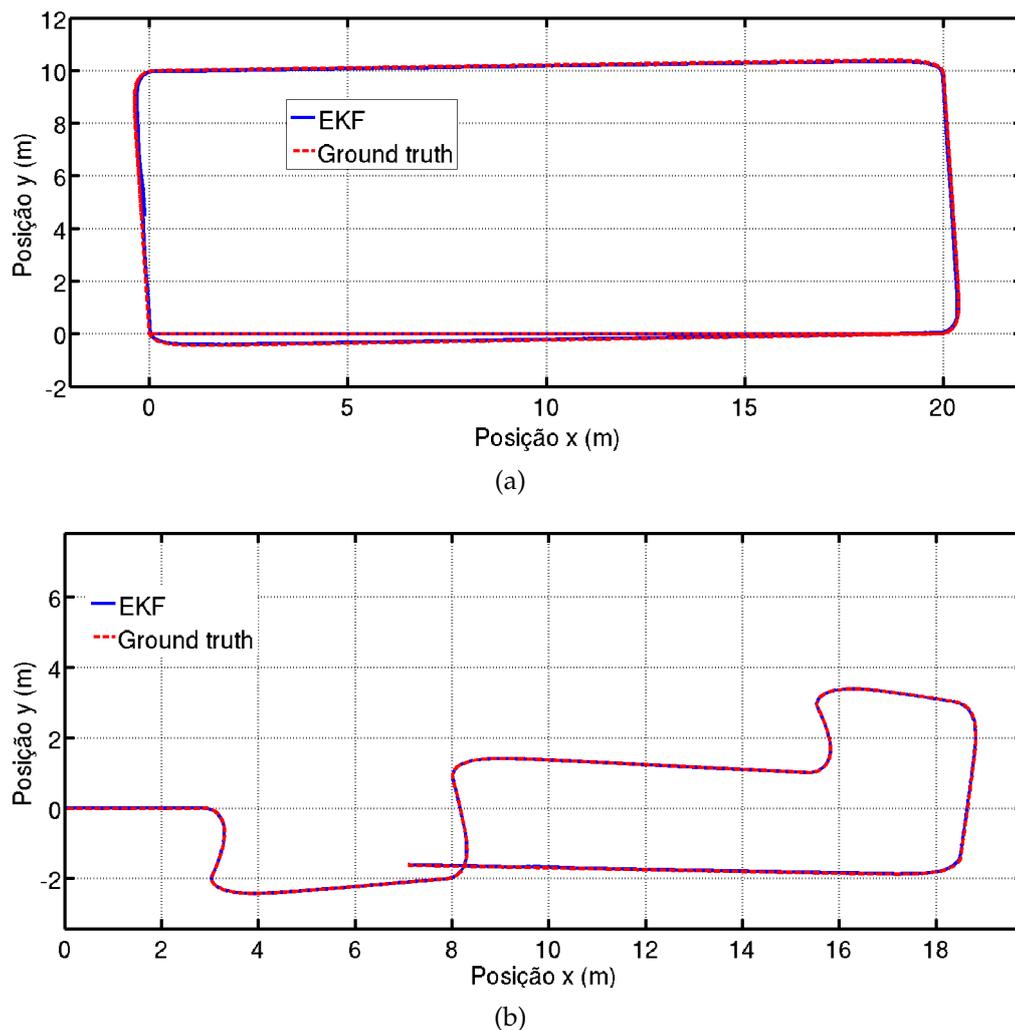


Figura 4.11. Resultado da localização, considerando valor de σ próximo de zero. O valor de σ foi definido como 0,01. (a) Resultado para o Cenário 1. (b) Resultado para o Cenário 2. O erro de localização é praticamente desprezível, devido à pequena variância da variável X.

É importante observar como os resultados apresentados nas figuras 4.11-(a) e

⁶O *ground truth* representa o valor real da posição do robô. Sinônimo de “padrão ouro” ou “valor de referência”.

4.11-(b) são melhores que os resultados obtidos utilizando-se apenas a hodometria (ver Figuras 4.9 e 4.10). Como o erro do sistema não é cumulativo, como no caso da hodometria, o erro permanece reduzido mesmo após o robô percorrer todo o percurso.

(b) Análise dos casos em que σ não pode ser desconsiderado

A Figura 4.12 mostra o erro médio e o 80° percentil do erro de localização associado a diferentes valores de σ^2 para o Cenário 1. Para valores pequenos de σ^2 (0,5, 2 e 4), o erro médio é reduzido ($0,5 \pm (0,01)$ m, $0,33 \pm (0,02)$ m e $0,53 \pm (0,04)$ m, respectivamente)⁷. As Figuras 4.13 e 4.14 mostram os resultados de localização para os casos em que $\sigma^2 = 0,5$ e $\sigma^2 = 4$, respectivamente. Para esses valores, a Figura 4.12 mostra que 80% dos valores de erro ficam abaixo de 1m. Dessa forma, podemos dizer que para valores pequenos de σ (menores que 4), o método é razoavelmente exato e preciso. Para $\sigma = 8$, o erro médio é aproximadamente 1,9 metros e o 80° percentil do erro é igual a 2,3 metros. Já para $\sigma^2 = 12$ e $\sigma^2 = 16$, o erro passa a ser maior (4 e 4,6 metros, respectivamente) enquanto o 80° percentil fica maior do que 5 metros.

Os resultados mostram que a utilização do modelo de propagação para fazer localização dependerá da intensidade dos efeitos discutidos anteriormente (multipath, reflexão, espalhamento). O valor de σ^2 pode ser entendido como um indicador da qualidade da estimação de distância entre o robô e os *beacons*, ou seja, o valor diz quão boa é a estimativa do modelo de propagação do sinal. Em aplicações reais, outros fatores além da distância afetam a atenuação do sinal quando ele se propaga. Para uma modelagem mais fidedigna, esses fatores devem também ser inseridos no modelo. O papel da variável aleatória X_σ é capturar o efeito desses outros fatores. O aumento do valor de σ leva a maiores incertezas nas estimativas de distância e, conseqüentemente, diminui a exatidão da localização obtida. De forma geral, quanto maior o valor de σ^2 , maior é a influência dos efeitos discutidos anteriormente e mais inexata torna-se a modelagem realizada. Conseqüentemente, o resultado da localização que faz uso do modelo piora (ver Figura 4.12).

4.2.1.2 Análise da Influência da topologia

Também foi avaliado como a topologia influencia a exatidão da localização. Como o termo “topologia” tem diferentes significados em diferentes áreas, antes de

⁷Os números entre parêntesis indicam o desvio padrão.

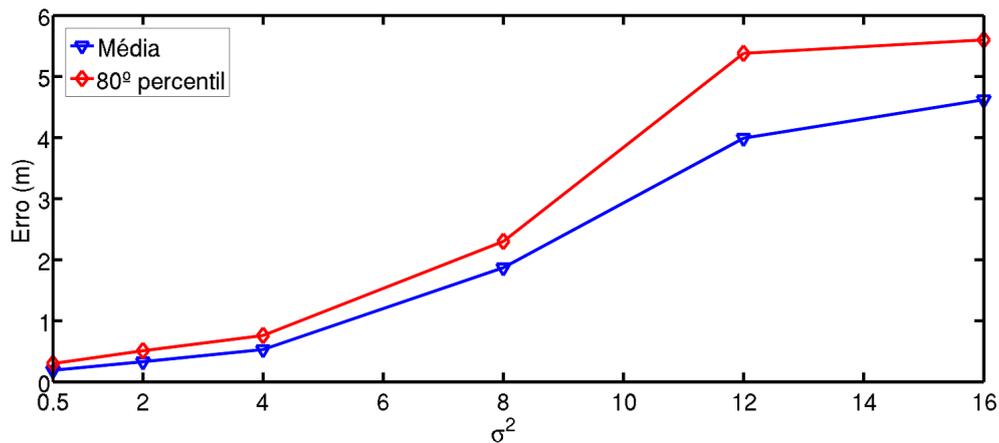


Figura 4.12. Influência do valor de σ na exatidão da localização. Quando o valor de σ aumenta a influência de fatores considerados aleatórios aumenta. Conseqüentemente, o modelo torna-se menos exato e o resultado da localização piora.

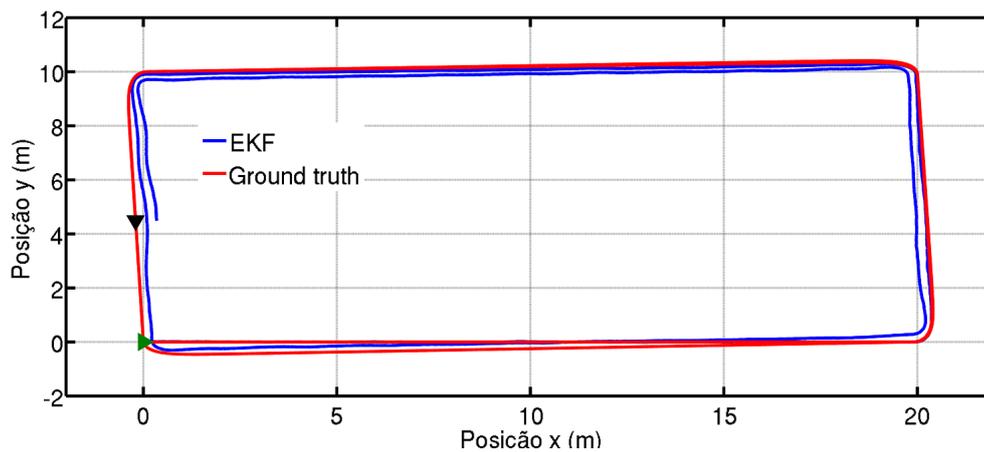


Figura 4.13. Resultado da localização considerando $\sigma^2 = 0.5$.

prosseguir, uma definição desse termo no sentido em que será utilizado neste trabalho é apresentada abaixo.

Definição 5. A topologia ou “configuração dos beacons” corresponde ao conjunto C de localizações (x, y) dos beacons no ambiente.

Para avaliar a influência da topologia foram realizadas simulações em que o número e a configuração dos *beacons* foi variado. Os resultados dessas simulações são mostrados a seguir.

(a) Variando o Número de Beacons

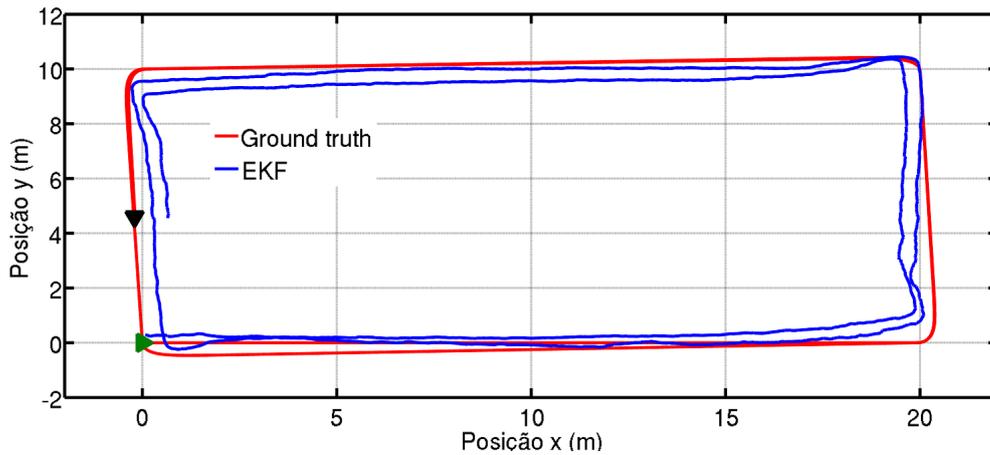


Figura 4.14. Resultado da localização considerando $\sigma^2 = 4$.

A Figura 4.15 mostra como o resultado da localização piora quando o número de *beacons* utilizados diminui. Quando isso ocorre, o robô obtém estimativas de distâncias de *beacons* que estão muito distantes dele. O aumento da distância reduz a qualidade da estimativa e, conseqüentemente, da localização obtida.

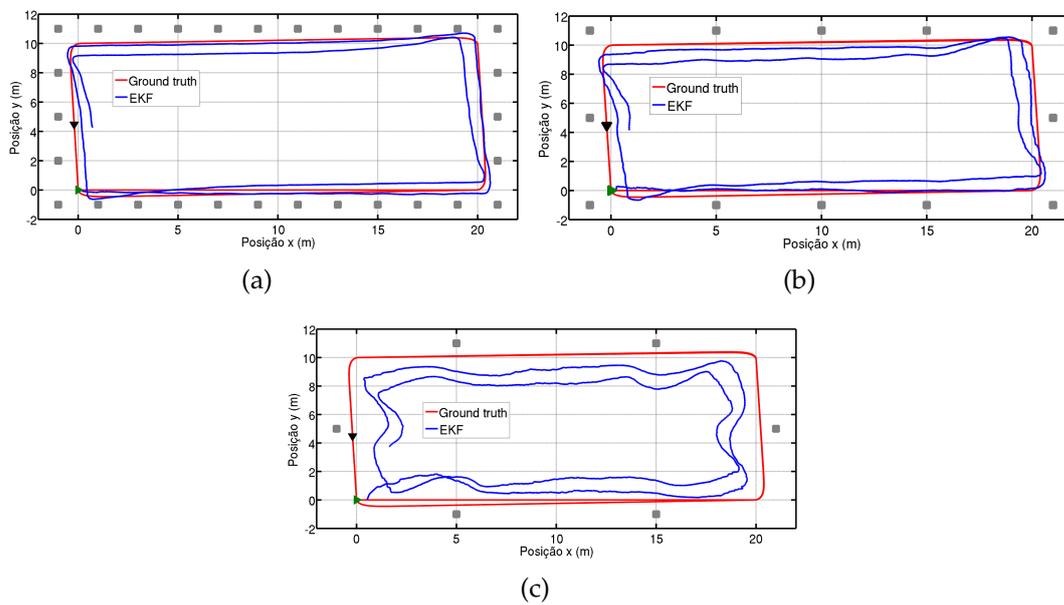


Figura 4.15. Resultado final da localização associado ao número de *beacons* utilizados. A qualidade da localização diminui quando o número de *beacons* utilizados é menor.

(b) Variando a Configuração dos Beacons

A Figura 4.16 mostra claramente como a qualidade da localização pode variar dependendo da configuração geométrica dos *beacons*.

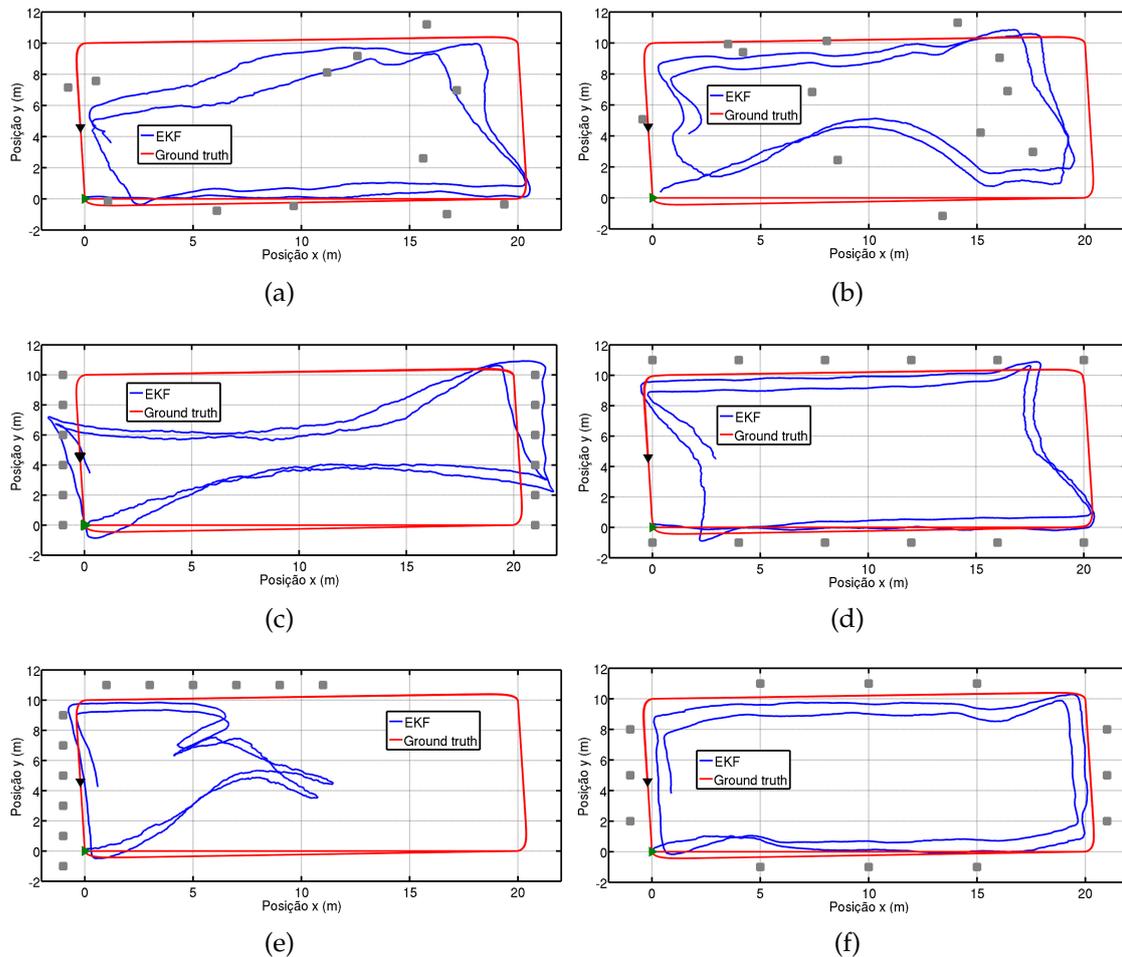


Figura 4.16. Resultado da localização utilizando diferentes topologias para os *beacons*. Os *beacons* são indicados pelos quadrados cinzas. Esta figura mostra como a topologia tem grande influência na qualidade da localização. (a) *Beacons* posicionados aleatoriamente (1); (b) *beacons* posicionados aleatoriamente (2); (c) *beacons* distribuídos igualmente nos dois segmentos mais curtos do caminho; (d) *beacons* distribuídos igualmente nos dois segmentos mais longos do caminho; (e) *beacons* distribuídos em dois segmentos adjacentes; (f) *beacons* distribuídos igualmente nos quatro segmentos do caminho. O melhor resultado é obtido no caso (f), quando os *beacons* são distribuídos de forma a gerar uma melhor cobertura do caminho. Em todos os casos foram utilizados os mesmos parâmetros de simulação. (Melhor visualizado em cores).

São mostradas seis configurações diferentes. As configurações 4.16-(a) e 4.16-(b) mostram os resultados considerando duas topologias aleatórias diferentes.

O resultado geral é bem diferente do caminho realmente seguido pelo robô (indicado pelo *ground truth*). Apenas em regiões com muitos *beacons* o resultado do método aproxima-se do *ground-truth* (por exemplo, parte inferior na Figura 4.16-(a) e parte superior na Figura 4.16-(b)). Nas configurações 4.16-(c) e 4.16-(d) os *beacons* são distribuídos em apenas dois dos quatro segmentos do caminho. Na Figura 4.16-(c) os *beacons* estão nos dois segmentos mais curtos e na Figura 4.16-(d) eles são distribuídos nos dois segmentos mais longos. Nos dois casos, o resultado piora quando o robô passa por regiões sem *beacons*. A Figura 4.16-(e) mostra um caso em que o erro de localização na maior parte do caminho é muito grande devido a concentração de *beacons* em uma pequena região. Finalmente, a Figura 4.16-(f) mostra o caso em que os *beacons* são distribuídos igualmente entre os quatro segmentos do caminho. Essa distribuição é a que produz as melhores estimativas de localização porque em todos os instantes existe algum *beacon* próximo ao robô. A qualidade da estimativa é função da distância. Logo, o robô obtém estimativas melhores nessa configuração.

Considere ainda o caso mostrado na Figura 4.17⁸. Como indicado na Figura, as estimativas de localização produzidas na região do extremo direito do caminho percorrido pelo robô (região tracejada) ficam mais distantes do *ground truth*, devido a ausência de *beacons*. Adicionando apenas três *beacons* na região produz a melhoria mostrada na Figura 4.18.

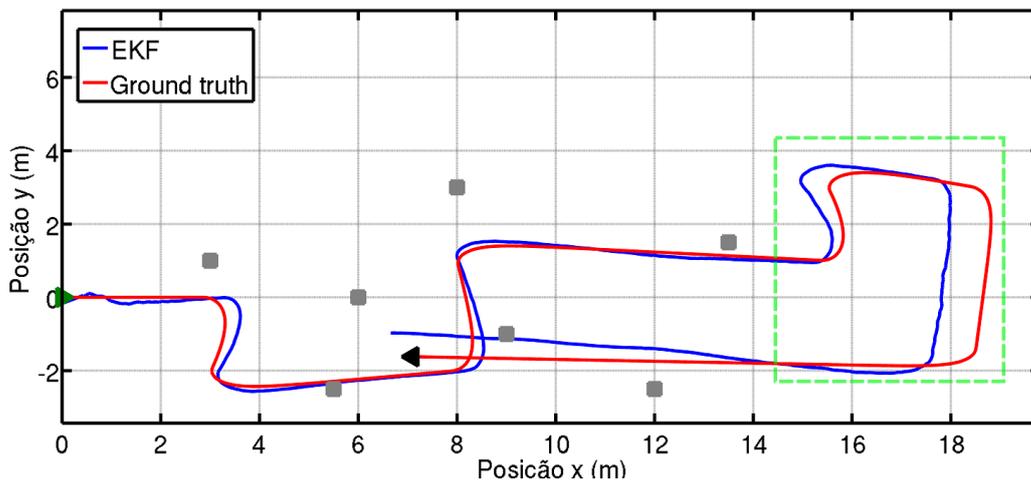


Figura 4.17. Resultado final da localização. A qualidade do resultado piora em áreas em que existem poucos *beacons* (região tracejada).

⁸A posição dos *beacons* na Figura 4.17 e o caminho percorrido pelo robô são semelhantes ao caso apresentado em [Djugash et al., 2006]. Neste trabalho também é possível perceber o efeito da falta de sensores no extremo direito do caminho percorrido pelo robô. Essa região apresenta o pior resultado (ver Figuras 5, 6 e 7 dessa referência para maiores detalhes).

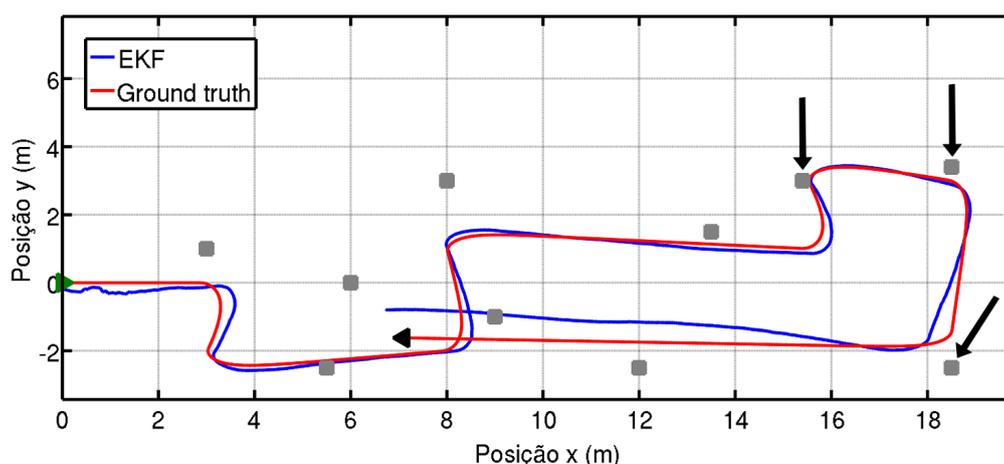


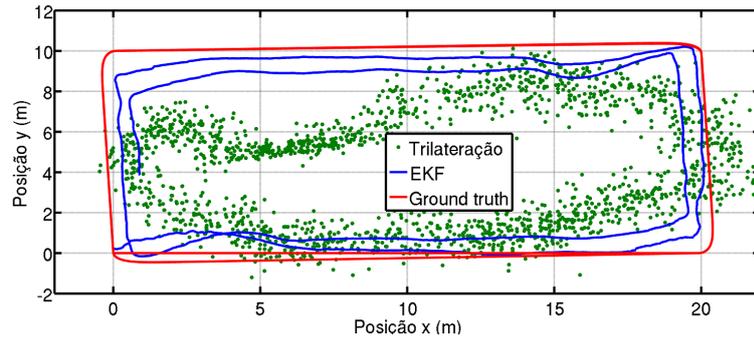
Figura 4.18. Resultado final da localização após a adição de *beacons* na região tracejada na Figura 4.17. Os sensores adicionados são indicados pelas setas. Repare como a qualidade do resultado melhora em relação ao caso mostrado na Figura 4.17.

Uma pergunta natural motivada pelos resultados mostrados nas figuras anteriores é: como determinar “quão boa” é uma topologia para fazer localização? A pergunta é muito relevante, uma vez que uma resposta para essa pergunta tem importantes implicações práticas. Está fora do escopo desse trabalho oferecer uma solução formal para esse problema. Entretanto, na Seção 4.2.3 são citados alguns trabalhos que abordam o tema.

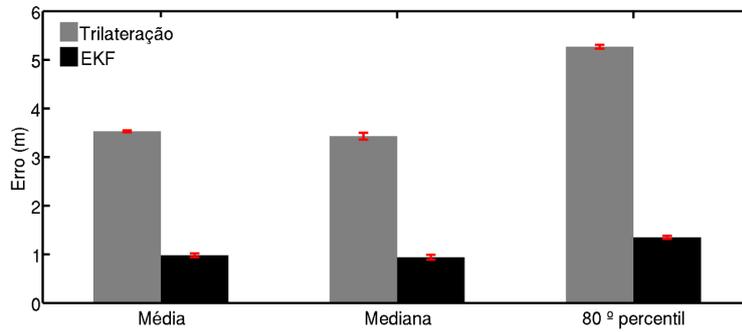
4.2.1.3 Comparação entre EKF e trilateração

Nesta Seção será avaliado, de forma comparativa, o desempenho do método baseado em modelo de propagação utilizando trilateração e EKF. A Figura 4.19 mostra dois cenários e os resultados finais da localização utilizando os dois métodos.

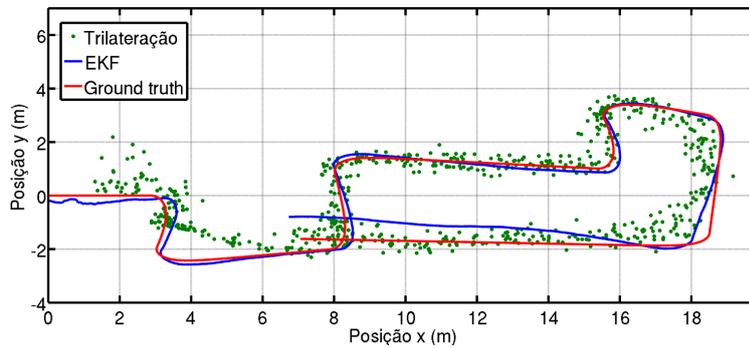
Nos dois casos a trilateração apresenta erros muito maiores que o EKF, como pode ser visto na Figura 4.19-(b) e 4.19-(d). Isso se deve ao fato do EKF incorporar a hodometria e também valores passados da estimação do estado no momento de fazer a localização. Entretanto, uma das vantagens da trilateração é que não é necessário saber a localização inicial do robô, ao contrário do EKF, em que essa informação deve estar disponível.



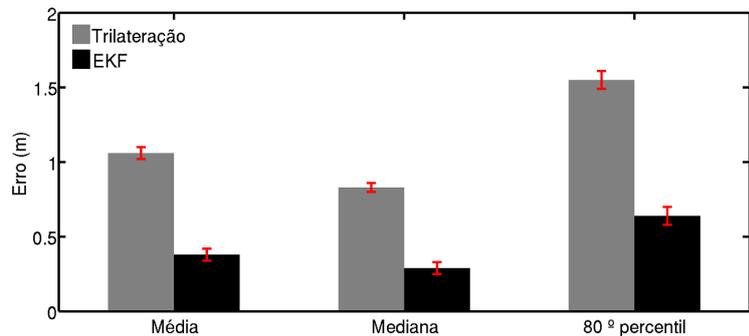
(a)



(b)



(c)



(d)

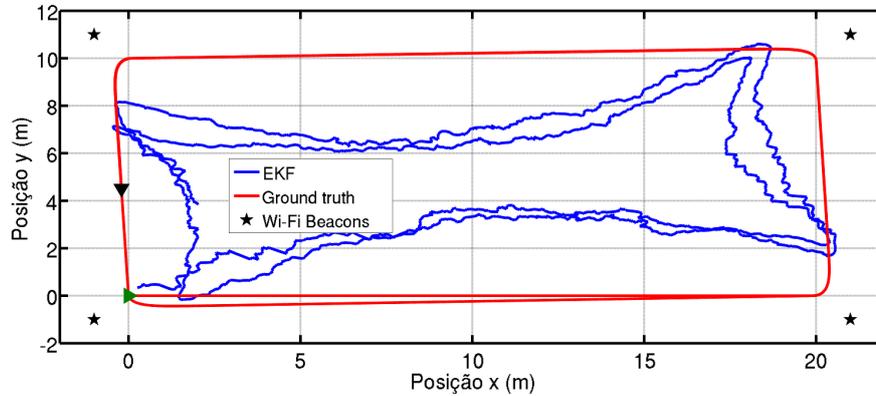
Figura 4.19. Resultado da trilateração e EKF para dois cenários. (a) localização utilizando EKF e trilateração e (b) média, mediana e 80º percentil do erro para o Cenário 1. (c) localização utilizando EKF e trilateração e (d) média, mediana e 80º percentil do erro para o Cenário 2. O EKF obtém resultados significativamente melhores que a trilateração. As topologias utilizadas para os cenários 1 e 2 foram aquelas mostradas nas figuras 4.15-(b) e 4.18, respectivamente. As barras em vermelho indicam duas vezes o valor do desvio padrão. (Melhor visualizado em cores).

4.2.1.4 Utilizando múltiplas Tecnologias Sem Fio

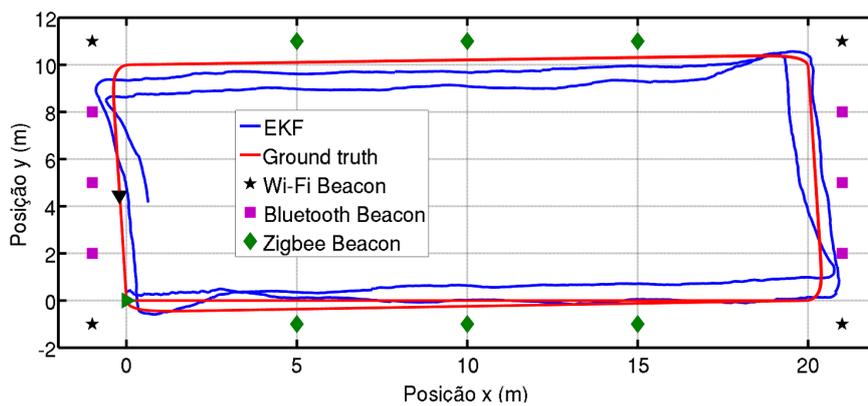
Finalmente, nesta Seção será analisado como a utilização de múltiplas tecnologias pode prover melhores resultados de localização em um caso prático. O experimento realizado consistiu em fazer o robô executar o caminho do Cenário 1, considerando duas configurações diferentes dos *beacons*. No primeiro caso, quatro *beacons* da tecnologia *Wi-Fi* foram colocados nas posições mostradas na Figura 4.20-(a). No segundo cenário, também foram utilizados *beacons* compatíveis com a tecnologia Zigbee e Bluetooth nas posições mostradas na Figura 4.20-(b). Os resultados obtidos utilizando-se apenas a tecnologia *Wi-Fi* apresentam um erro grande. Isso ocorre porque os *beacons* ficam muito distantes um do outro e nos segmentos do caminho que ficam entre os *beacons*, a distância entre o robô e o *beacon* do qual ele obtém a estimativa de distância cresce. Consequentemente, também cresce o erro da estimação de distâncias e esse erro resulta na perda de qualidade da localização final do robô. Quando *beacons* das tecnologias Bluetooth (quadrados azuis) e Zigbee (losangos verdes) são acrescentados ao ambiente, o erro de localização é reduzido. A redução do erro deve-se ao fato de existirem mais *beacons* de forma que o robô agora sempre está perto de algum *beacon*, o que produz estimativas de distância melhores e também porque a topologia definida para os sensores ficou adequada cobrindo todo o caminho.

Obviamente, na Figura 4.20-(b), a redução no erro de localização não ocorreu simplesmente porque os *beacons* são de tecnologias diferentes. O número de *beacons* e seu posicionamento é fundamental para qualidade da localização, como já foi mostrado nas seções anteriores. O caso mostrado na figura apenas serve para ilustrar uma situação em que a utilização de múltiplas tecnologia pode ter vantagens. Se *beacons* da tecnologia *Wi-Fi* fossem colocados nas mesmas posições em que os *beacons* de outras tecnologias foram colocados, o resultado também melhoraria. Contudo, essa opção seria muito cara, já que o custo de pontos de acesso *Wi-Fi* é muito maior que o custo de dispositivos Bluetooth ou nós sensores. Além disso, utilizar muitos pontos de acesso seria inadequado, uma vez que a principal função do ponto de acesso é fornecer cobertura de rede para o ambiente e isso, geralmente, pode ser obtido com um número não muito grande de dispositivos. Sendo assim, a utilização de múltiplas tecnologias tem a vantagem de fornecer um resultado de localização razoável em todo o caminho percorrido pelo robô, com um custo provavelmente muito menor do que aquele que seria obtido utilizando-se apenas uma tecnologia (por exemplo, se essa tecnologia for *Wi-Fi*). O exemplo da Figura 4.20-(b) mostra que é possível melhorar a disponibilidade do serviço de

localização quando o robô possui interfaces para múltiplas tecnologias. A existência de *beacons* de outras tecnologias permite a obtenção de estimativas melhores de localização que aquelas obtidas no caso mostrado na Figura 4.20-(a).



(a) localização utilizando apenas Wi-Fi



(b) localização utilizando múltiplas tecnologias

Figura 4.20. localização utilizando (a) apenas Wi-Fi e utilizando (b) múltiplas tecnologias. Utilizar mais *beacons* de múltiplas tecnologias pode reduzir o erro de localização. (Melhor visualizado em cores).

4.2.2 Experimentos Reais

Nesta Seção serão descritos os experimentos reais realizados. Os objetivos do experimento foram avaliar o método em cenários reais e verificar se os resultados reais era consistentes com os resultados obtidos em simulação.

4.2.2.1 Aparato experimental e Coleta de Dados

Os materiais utilizados nos experimentos e a forma como os dados foram coletados são os mesmos apresentadas nas seções 3.2.1 e 3.2.2 do capítulo 3.

4.2.2.2 Resultados

Foram realizados três experimentos. No primeiro experimento foram utilizados apenas *beacons* Wi-Fi. No segundo experimento foram utilizados *beacons* Wi-Fi e Zigbee. No terceiro experimento todas as três tecnologias foram utilizadas. As seguintes informações sobre os experimentos são relevantes:

- O robô movimentou-se a uma velocidade constante de 0,1 m/s.
- A taxa com a qual era possível adquirir informações de hodometria era muito maior que a taxa com a qual era possível adquirir valores de RSSI dos *beacons*. Por isso, para cada aquisição de RSSI, 50 aquisições de dados da hodometria eram realizadas. Ou seja, o EKF fazia a predição 50 vezes antes de fazer uma correção.
- O robô navegou de forma autônoma utilizando um mapa do ambiente onde os experimentos foram realizados. O robô utilizou uma implementação do algoritmo wavefront⁹ para navegar por *waypoints* estabelecidos no mapa. O robô também utilizou o algoritmo vfh [Borenstein & Koren, 1991] para fazer o controle, considerando desvio de obstáculos.
- O *ground truth* aproximado foi obtido utilizando-se o método de Monte Carlo [Dellaert et al., 1999]. O sensor utilizado foi um laser Sick LMS 200 (ver Seção A.7 do apêndice A para maiores detalhes).
- Todos os resultados experimentais apresentados foram produzidos *offline*.
- Uma amostra de RSSI de cada *beacon* (que podia ser “ouvido”) foi armazenada a cada vez que o robô parava e fazia a coleta de dados.
- A posição dos *beacons* e a pose inicial do robô eram conhecidas.
- Os experimentos foram realizados no período noturno (entre 18:00 hs e 23:00 hs). Poucas pessoas transitavam pelo ambiente durante a realização dos experimentos.
- Cada um dos experimentos foi realizado uma vez.

Cada um dos experimentos será descrito a seguir.

(a) Experimento 1 - Utilizando apenas pontos de acesso Wi-Fi

⁹Para maiores detalhes sobre a implementação utilizada, ver [Wavefront, 2011].

A Figura 4.21 mostra o cenário onde o Experimento 1 foi realizado. O cenário

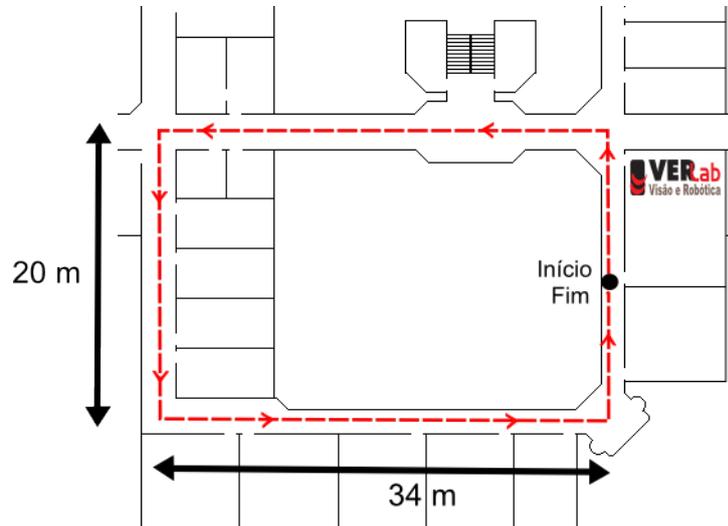


Figura 4.21. Cenário onde foi realizado o Experimento 1. O robô inicia o caminho no ponto indicado pelo círculo preto e faz dois circuitos movimentando-se no sentido indicado pelas setas. (Melhor visualizado em cores).

tem 20 metros de largura e 34 metros de comprimento. O robô percorreu o caminho indicado pela linha vermelha, no sentido indicado pelas setas. O robô completou dois circuitos, totalizando aproximadamente 216 metros de comprimento. Nesse experimento, o objetivo foi avaliar o comportamento do método baseado em modelo de propagação do sinal de RF para fazer a localização. Para isso, foram utilizados apenas *beacons* compatíveis com a tecnologia Wi-Fi. A Figura 4.22 mostra os resultados obtidos no experimento. Foram utilizados oito pontos de acesso Wi-Fi (representados pelas estrelas verdes na Figura 4.22). O erro médio obtido com a utilização da hodiometria foi 5,7 metros. O erro de hodiometria aumenta muito com a distância percorrida pelo robô. Mais especificamente nas curvas, um erro na orientação do robô pode levar a grandes erros de translação. O resultado obtido pela utilização do EKF, indicado pela curva em preto na figura, é melhor que aquele obtido apenas pela hodiometria. Isso ocorre porque ao coletar a potência do sinal dos *beacons*, é possível fazer uma correção na estimativa do estado do robô. A Figura 4.23 mostra os erros instantâneos (distância, em cada iteração, para o ponto obtido com o *ground truth*) para a hodiometria e EKF. Enquanto o erro do EKF permanece aproximadamente na mesma faixa de valores, o erro da hodiometria cresce muito, ficando distante do *ground truth*.

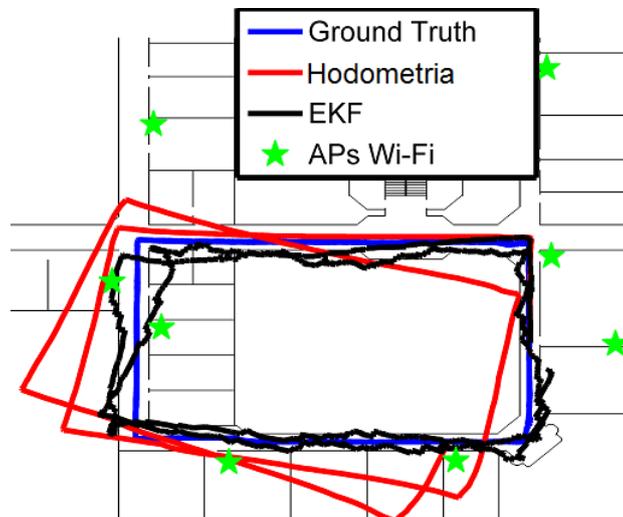


Figura 4.22. Resultado da localização no Experimento 1. Foram utilizados apenas *beacons* Wi-Fi. O robô percorreu aproximadamente dois circuitos completos, totalizando aproximadamente 216 metros de comprimento. O erro médio obtido com o EKF foi 1,53 metros. O erro médio obtido com a utilização da hometria foi 5,7 metros. (Melhor visualizado em cores).

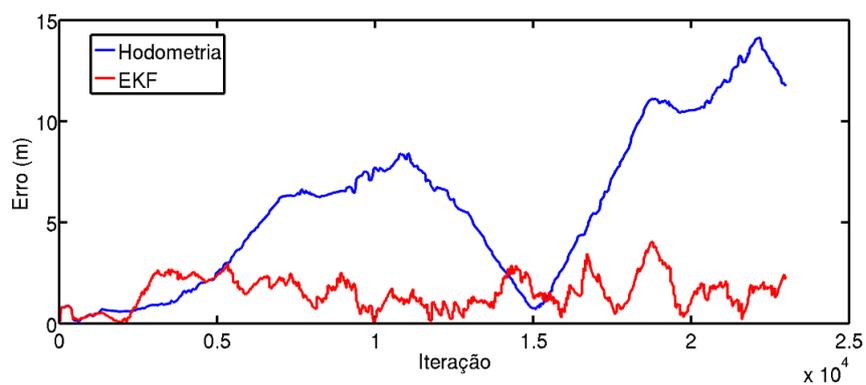


Figura 4.23. Erro instantâneo do resultado obtido com a hometria e com o EKF. Enquanto o erro obtido com o EKF permanece aproximadamente na mesma faixa de valores o erro da hometria cresce muito.

(b) Experimento 2 - Utilizando pontos de acesso Wi-Fi e nós sensores Zigbee

A Figura 4.24 mostra o cenário onde o Experimento 2 foi realizado. O cenário

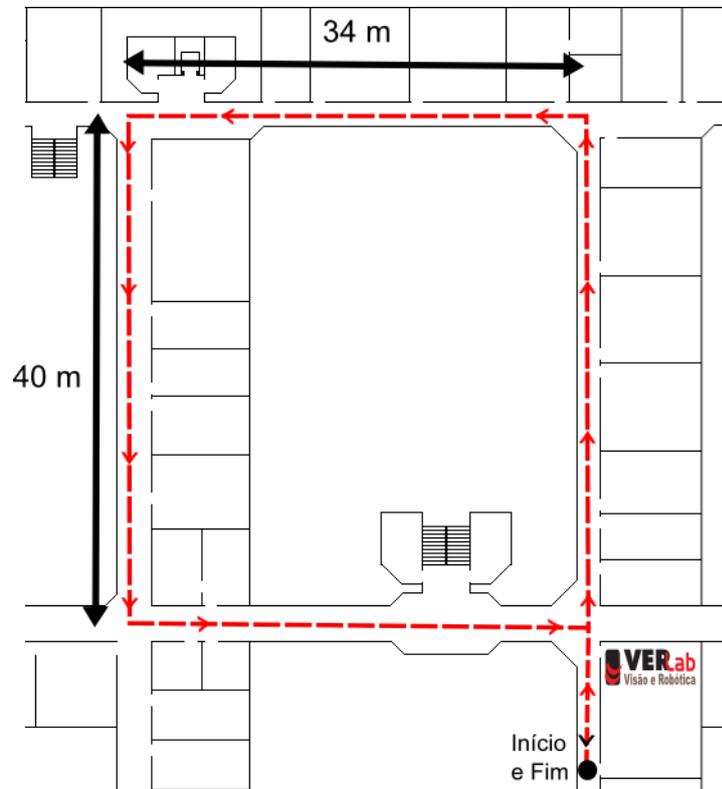
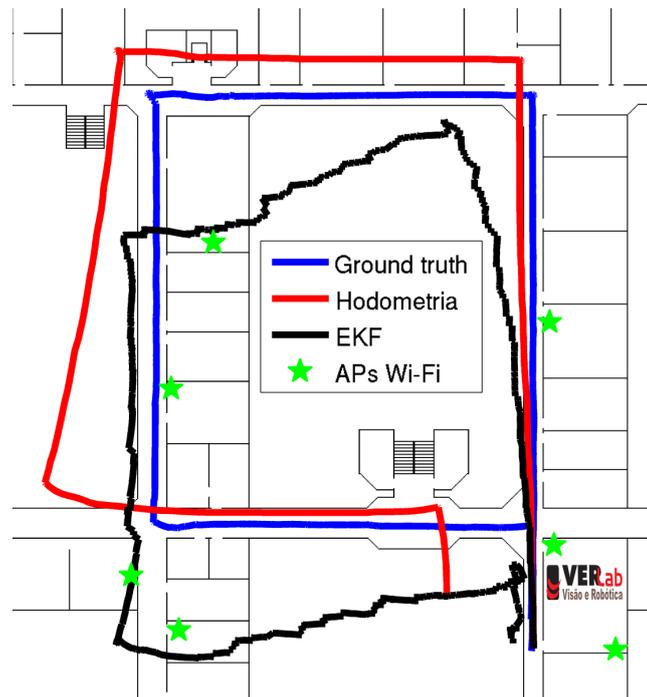
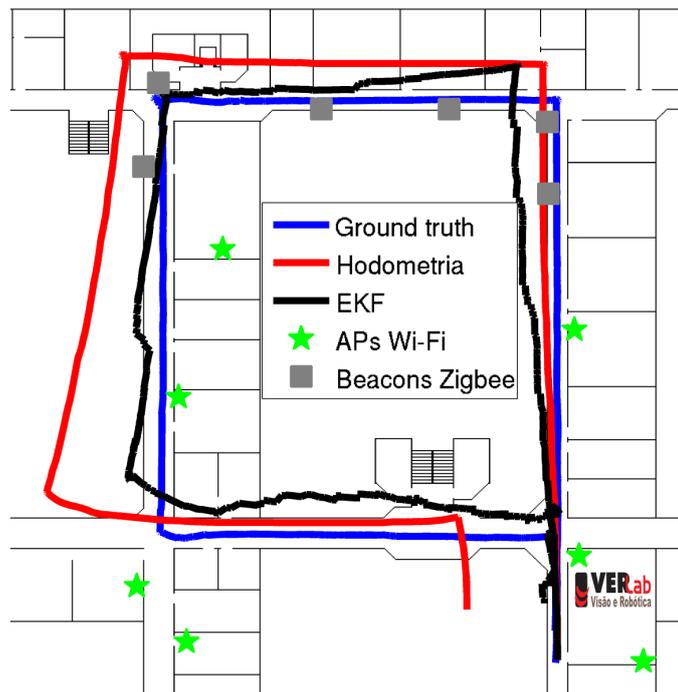


Figura 4.24. Cenário onde foi realizado o Experimento 2. O robô inicia (e termina) o caminho no ponto indicado pelo círculo preto movimentando-se no sentido indicado pelas setas. O caminho tem aproximadamente 145 metros de comprimento. (Melhor visualizado em cores).

tem 40 metros de largura e 34 metros de comprimento. O robô percorre o caminho indicado pela linha vermelha, no sentido indicado pelas setas. O caminho completo tem aproximadamente 145 metros. Nesse experimento foram utilizados *beacons* Wi-Fi e Zigbee. A Figura 4.25 mostra os resultados obtidos no experimento. A Figura 4.25-(a) mostra como o resultado gerado pelo EKF fica distante do *ground truth* quando o robô movimenta-se por regiões em que a cobertura Wi-Fi é reduzida (região superior da Figura 4.25-(a)). Isso ocorre porque quando o robô está nessa região as observações são obtidas de *beacons* que estão mais distantes. Como a qualidade das estimativas de distância diminui quando a distância aumenta, o erro é maior nessa região. Nesse aspecto, é importante observar que mesmo após o robô retornar para um área com melhor cobertura Wi-Fi o método não é capaz de melhorar a estimativa de forma adequada.



(a) localização utilizando apenas Wi-Fi



(b) localização utilizando também nós sensores Zigbee

Figura 4.25. Resultado da localização no Experimento 2. (a) O processo de localização utilizou apenas *beacons* Wi-Fi. O resultado piora na região onde não há uma boa cobertura do sinal Wi-Fi (região superior da figura). O erro médio foi 8.72 metros para o EKF e 5,28 metros para a hodometria. (b) No processo de localização foram utilizados *beacons* Wi-Fi e Zigbee. Os nós sensores foram distribuídos na região em que a cobertura Wi-Fi é reduzida. O resultado melhora devido a adição dos nós sensores (o erro médio foi de 2,76 metros para o EKF, aproximadamente três vezes menor que o caso mostrado na Figura 4.25-(a)). (Melhor visualizado em cores).

Isso provavelmente ocorreu porque o número de leituras de RSSI realizadas até o fim do caminho não foi suficiente para possibilitar um melhor desempenho do método naquela região. A Figura 4.25-(b) mostra que quando *beacons* compatíveis com a tecnologia Zigbee são distribuídos na região em que a cobertura Wi-Fi é reduzida, o resultado fica mais próximo do *ground truth*. Dessa forma, o robô foi beneficiado por possuir múltiplas interfaces sem fio para melhorar os resultados do processo de localização. Nota-se que a melhoria dos resultados após a adição dos *beacons* Zigbee corrobora os resultados da simulação que mostraram que o posicionamento dos *beacons* tem importância fundamental para a qualidade da localização obtida. Como os pontos de acesso não são distribuídos no ambiente para servirem de *beacons* para localização, a cobertura do ambiente não é adequada para esse propósito. O próximo experimento considera a utilização das três tecnologias para realizar a localização.

(c) Experimento 3 - Utilizando pontos de acesso Wi-Fi, nós sensores Zigbee e dongles Bluetooth

A Figura 4.26 mostra o cenário onde o Experimento 3 foi realizado. O cenário é composto por dois quadrantes. O primeiro quadrante é igual ao cenário do Experimento 1. O segundo quadrante tem 40 metros de largura e 34 metros de comprimento. O robô percorre o caminho indicado pelas linhas vermelha e azul, no sentido indicado pelo crescimento dos números dentro dos círculos. O caminho total tem aproximadamente 266 metros de comprimento.

Neste experimento foram utilizados *beacons* compatíveis com as tecnologias Wi-Fi, Zigbee e Bluetooth. A Figura 4.27 mostra os resultados obtidos no experimento. A Figura 4.27-(a) mostra que quando são utilizados apenas pontos de acesso Wi-Fi (foram utilizados nove pontos de acesso, indicados pelas estrelas de cor verde na Figura 4.27-(a)), o resultado piora nas regiões em que não existem pontos de acesso disponíveis e o resultado fornecido pelo filtro se afasta do *ground truth*. No cenário mostrado na Figura 4.27-(b), foram adicionados *beacons* Zigbee nas posições indicadas pelos quadrados cinzas. O resultado é melhor que aquele obtido quando apenas pontos de acesso Wi-Fi foram utilizados. Entretanto, como na parte superior do segundo quadrante não existem *beacons*, o erro na parte final do caminho é grande. A Figura 4.27-(c) mostra o resultado quando são utilizados *beacons* compatíveis com Wi-Fi e Bluetooth. Novamente o resultado obtido utilizando o filtro fica distante do *ground truth* devido a ausência de *beacons* quando o robô inicia o caminho no segundo quadrante. Finalmente, a Figura 4.27-(d) mostra o

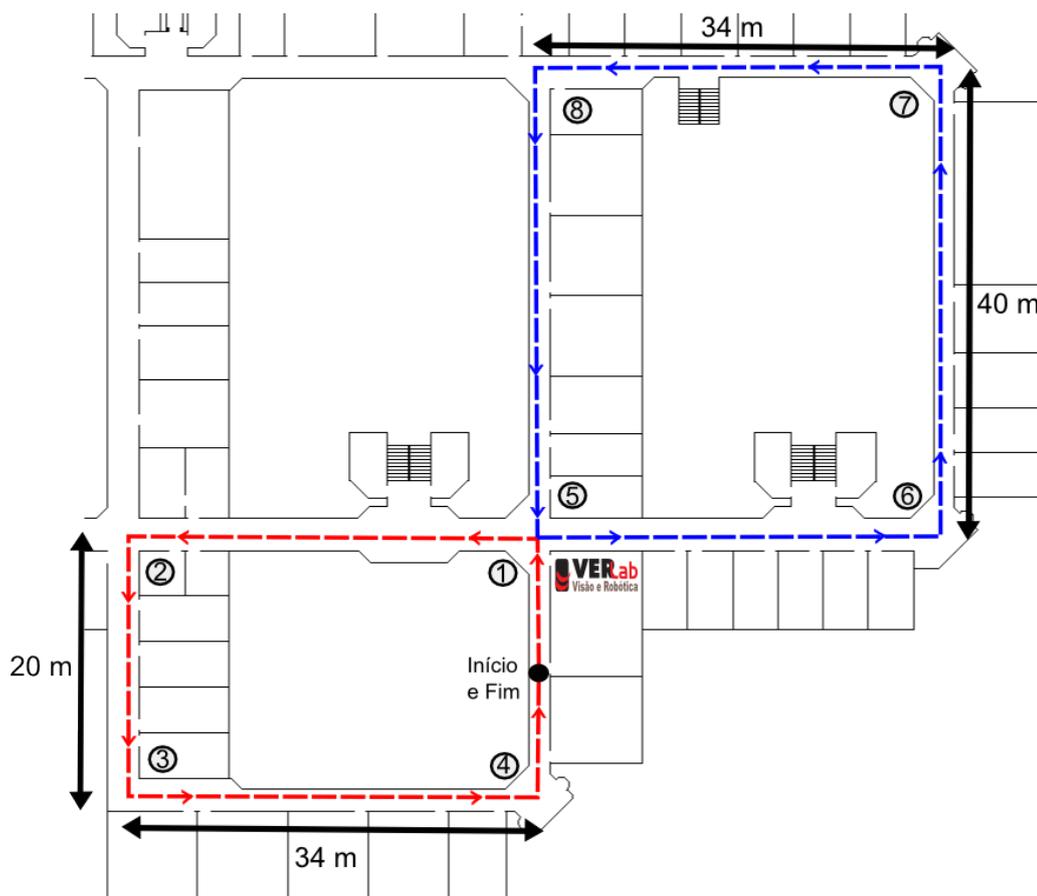


Figura 4.26. Cenário onde foi realizado o Experimento 3. O robô inicia (e termina) o caminho no ponto indicado pelo círculo preto. Inicialmente, o robô percorre o caminho indicado pela linha vermelha, no sentido indicado pelo crescimento dos números dentro dos círculos. Em seguida, ele prossegue pelo caminho indicado pela linha azul, no sentido indicado pelo crescimento dos números dentro dos círculos, retornando, então, ao ponto inicial. O caminho tem aproximadamente 266 metros de comprimento. (Melhor visualizado em cores).

resultado da localização quando são utilizados *beacons* compatíveis com as três tecnologias, distribuídos no ambiente para oferecer uma melhor cobertura por toda a região na qual o robô navega. O erro obtido nesse caso é menor que nos casos anteriores. Dessa forma, neste experimento, assim como aconteceu no Experimento 2, foi possível melhorar a localização do robô por meio da utilização de múltiplas interfaces RF.

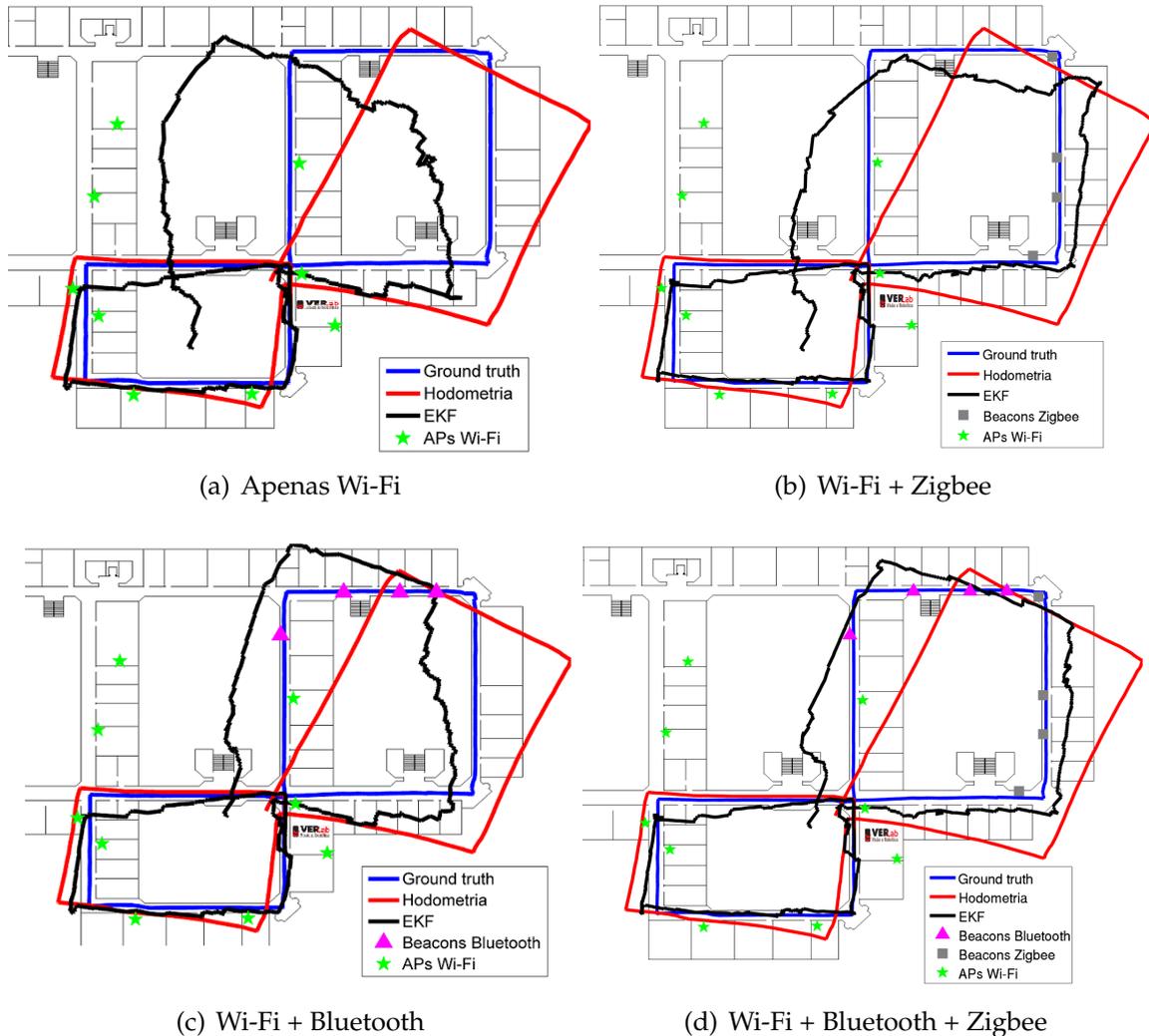


Figura 4.27. Resultado da localização no Experimento 3. (a) Quando o processo de localização utiliza apenas pontos de acesso Wi-Fi, o erro de localização se torna muito grande no momento em que o robô navega pelas regiões nas quais não existem pontos de acesso. (b) Ao considerar também *beacons* Zigbee, o resultado da localização melhora mas o erro ainda é grande devido à falta de *beacons* na região superior do segundo quadrante. (c) Quando são utilizados apenas pontos de acesso Wi-Fi e *beacons* Bluetooth, o erro permanece grande, devido à ausência de *beacons* no início do segundo quadrante. (d) O melhor resultado é obtido quando são utilizados *beacons* compatíveis com as três tecnologias, distribuídos no ambiente para gerar uma melhor “cobertura” em todas as regiões onde o robô navega. (Melhor visualizado em cores).

4.2.3 Discussão

Uso de múltiplas tecnologias. Um dos objetivos desse trabalho foi avaliar as vantagens e desafios da utilização de múltiplas tecnologias RF para realizar localização. Os resultados apresentados neste capítulo mostraram que uma das vantagens que podem ser obtidas é o aumento da disponibilidade do serviço de localização. O uso de múltiplas tecnologias pode reduzir o erro em regiões nas quais a cobertura de uma das tecnologias (Wi-Fi, por exemplo) é reduzida.

Fatores que afetam a qualidade da localização. As análises apresentadas na Seção 4.2 mostraram que existem muitos fatores que influenciam a qualidade da localização. Todos eles devem ser levados em consideração. Dentre os fatores mais importantes estão:

1. **Configuração geométrica dos *beacons*.** A configuração dos *beacons* é o fator mais importante para localização baseada em medidas de distância. Isso foi mostrado nos resultados apresentados anteriormente (ver Figuras 4.15 e 4.16). O problema da relação entre qualidade de localização e configuração geométrica dos *beacons* aparece em outras áreas. Por exemplo, é muito estudado na comunidade de usuários e pesquisadores de dispositivos GPS. Nessa área, o problema é conhecido como diluição geométrica da precisão (*Geometric Dilution of Precision* - GDOP, em inglês) e indica como a configuração dos satélites afeta a qualidade da localização do usuário. Uma evidência da importância desse tópico para o problema de localização é que muitos trabalhos tem abordado o assunto em anos recentes (ver, por exemplo, [Jourdan et al., 2006], [Jourdan & Roy, 2008], [Vitus & Tomlin, 2010], [Boccardo et al., 2010]¹⁰, [Bishop et al., 2010] e [Moreno-Salinas & Aranda, 2011]). O que esses trabalhos e os resultados apresentados nesta dissertação mostram é que o problema de posicionar os *beacons* da melhor forma possível, com objetivo de prover bons resultados de localização, é um dos desafios fundamentais nessa área.
2. **Qualidade da estimativa de distância entre os *beacons* e o objeto alvo da localização.**
3. **Parâmetros intrínsecos às técnicas utilizadas.** Por exemplo, o valor de K no algoritmo K-NN, apresentado no capítulo 3, ou os parâmetros do EKF e do modelo de propagação utilizados neste capítulo.

¹⁰Cita o tópico de posicionamento dos *beacons* para realizar localização como um importante trabalho futuro.

Generalidade do método baseado em modelos de propagação. De forma similar ao método apresentado no capítulo 3, o método utilizado neste capítulo também é genérico. Por exemplo, é possível acomodar diferentes modelos de propagação do sinal de RF, diferentes tecnologias de RF (restritas aquelas que permitam a obtenção do RSSI) e diferentes métodos de estimação da posição do objeto alvo da localização (que não é restrito a robôs móveis). Essa é uma característica importante, uma vez que os resultados obtidos podem ser aplicáveis a outros casos diferentes daquele instanciado nesta dissertação.

4.2.3.1 Limitações

Nesta Seção serão apresentadas algumas limitações da abordagem e dos resultados apresentados neste capítulo.

Estimação dos parâmetros do modelo de propagação. Os parâmetros do modelo foram estimados fazendo um ajuste baseado em informações obtidas de um experimento realizado com um único dispositivo compatível com cada tecnologia. Entretanto, nos experimentos, foram utilizados vários dispositivos de cada tecnologia, sob a premissa de que o ajuste realizado com um dispositivo específico seria adequado para os outros dispositivos. Essa premissa nem sempre será verdadeira, uma vez que dispositivos diferentes possuem características diferentes. Além disso, o modelo de propagação utilizado é simples e não considera, por exemplo, a existência de paredes entre o *beacons* e o receptor. Modelos que considerassem esse tipo de artifício possivelmente gerariam resultados melhores. Apesar dessas limitações, a abordagem utilizada nesse capítulo gerou resultados de localização razoáveis.

Número de experimentos. Apenas um experimento foi realizado para cada cenário. Um estudo estatístico mais elaborado e repetições dos experimentos seriam necessárias para generalizar, com maior confiança, os resultados encontrados. Entretanto, a consistência dos resultados reforça sua validade (nos três experimentos, o resultado gerado pelo EKF foi melhor que a hometria e nos dois experimentos que utilizaram mais de uma tecnologia, foram obtidos resultados melhores que aqueles obtidos quando foi utilizada apenas uma tecnologia).

Necessidade de conhecer a localização inicial do robô e localização dos *beacons*. No método apresentado neste capítulo, é necessário conhecer a localização

inicial do robô e a localização dos *beacons*. Entretanto, em ambientes internos em geral essas informações não são difíceis de ser obtidas.

4.3 Sumário

Neste capítulo, foram apresentados o desenvolvimento e a avaliação experimental do método baseado em um modelo de propagação do sinal RF para realizar localização. Modelos de propagação são utilizados para explicar como o sinal de RF propaga-se por um meio. Em geral, os modelos tentam estimar a atenuação sofrida pelo sinal quando ele percorre uma distância, d , entre transmissor e receptor.

Diversos fatores afetam a propagação do sinal no meio. Dentre os principais fatores estão a reflexão, difração e espalhamento. A intensidade e variedade com as quais esses fenômenos acontecem dependem do ambiente no qual o sinal está se propagando. A propagação do sinal tem características distintas em ambientes internos e externos. Em ambientes internos, os fenômenos citados acima acontecem com mais intensidade, devido a maior presença de obstáculos. Por esse motivo, a modelagem de propagação do sinal em ambientes internos geralmente é mais desafiadora.

Um modelo muito utilizado na literatura é o modelo de atenuação com a distância. Esse modelo (ou família de modelos) é baseado no fato de que experimentos e análises teóricas mostram que a atenuação do sinal ocorre de forma logarítmica com o aumento da distância. Formalmente, o modelo pode ser expresso pela equação 4.2, mostrada na Seção 4.1.2. Esse modelo foi utilizado neste trabalho. Para levantar os parâmetros necessários para o funcionamento do modelo foram realizados experimentos com dispositivos de cada uma das tecnologias utilizadas. O modelo é utilizado para estimar a distância entre o objeto alvo de localização e os *beacons*.

Uma vez que a distância foi estimada, foram utilizados dois métodos para gerar a estimativa final de localização do robô: (i) trilateração e (ii) EKF. No método de trilateração, como existe incerteza na estimação das distâncias, o problema deve ser resolvido utilizando técnicas de otimização. O objetivo é encontrar o ponto que minimiza o erro. O segundo método, o EKF, faz uma fusão das estimativas de distâncias entre o robô e os *beacons* com as informações fornecidas pela hodometria do robô para gerar a estimativa de localização.

As análises apresentadas neste capítulo foram divididas em duas partes. Na primeira parte, foram avaliados, em simulação, aspectos que influenciam

a qualidade da localização, sem levar em consideração a existência de *beacons* compatíveis com múltiplas tecnologias. Foi mostrado que (i) o número de *beacons* utilizados, (ii) a configuração geométrica dos *beacons* e (iii) a exatidão do modelo de propagação¹¹ são os aspectos que tem mais relevância na qualidade da localização obtida. Também foi mostrado que (iv) o EKF produz resultados significativamente melhores que a trilateração. Isso ocorre porque o EKF utiliza mais informações (hodometria) para realizar a localização e considera o estado anterior do robô, enquanto a trilateração utiliza apenas as estimativas de distância entre o robô e os *beacons*.

Para validar o método e corroborar os resultados obtidos nos experimentos simulados, também foram realizados três experimentos reais, nos quais o robô percorreu uma distância total acumulada de aproximadamente 627 metros. O primeiro experimento mostrou que a utilização do método baseado em modelo de propagação considerando apenas pontos de acesso Wi-Fi gerou um resultado melhor que a hodometria. No segundo experimento foi mostrado como a distribuição de *beacons* Zigbee em regiões com pouco cobertura Wi-Fi gera resultados melhores que aqueles obtidos quando apenas pontos de acesso são utilizados. Finalmente, o terceiro experimento mostrou como o processo de localização utilizando dispositivos compatíveis com as três tecnologias, distribuídos no ambiente com o objetivo de gerar melhor cobertura, produz resultados melhores do que os casos em que apenas uma ou duas tecnologias são utilizadas. Dessa forma, ao fazer uso de múltiplas tecnologias foi possível aumentar a disponibilidade do serviço de localização, reduzindo o erro em regiões nas quais a cobertura de uma das tecnologias (Wi-Fi, por exemplo) é reduzida.

¹¹O fator realmente relevante é a qualidade da estimativa de distâncias entre os *beacons* e o robô. No entanto, essa qualidade depende diretamente de “quão bom” é o modelo de propagação para prever distâncias a partir de valores de RSSI.

Capítulo 5

Considerações Finais

*We can only see a short distance ahead,
but we can see plenty there that needs to be done.*

Alan Turing

Neste capítulo serão apresentadas as considerações finais do trabalho. Primeiro, na Seção 5.1, são apresentadas as conclusões e lições aprendidas. Em seguida, na Seção 5.2 é citada uma publicação resultante do trabalho apresentado nesta dissertação. Para concluir, na Seção 5.3, são discutidos algumas possíveis formas de extensão desse trabalho.

5.1 Conclusões

A utilização de múltiplas tecnologias RF para fazer localização em ambientes internos é uma opção conveniente e de baixo custo devido a dois motivos. Primeiro, a proliferação de dispositivos sem fio baseados em RF em prédios industriais, comerciais e campi universitários. Segundo, a existência de múltiplas interfaces sem fio nos dispositivos computacionais produzidos atualmente. Neste trabalho foram avaliadas as vantagens e desafios da utilização de múltiplas tecnologias RF para fazer localização em ambientes internos. *Beacons* compatíveis com três tecnologias RF atuais (Wi-Fi, Zigbee e Bluetooth) foram utilizados. O objeto alvo da localização foi um robô móvel. Dois métodos de localização foram implementados para facilitar

a investigação, resultando em um estudo mais amplo e profundo que aqueles apresentados em outros trabalhos encontrados na literatura. O primeiro método foi baseado em mapas de assinaturas e o segundo foi baseado em um modelo de propagação do sinal RF.

Para avaliar aspectos envolvidos na localização utilizando múltiplas tecnologias RF, é necessário entender quais são os fatores que mais afetam a qualidade da localização de sistemas baseados em RF. Foi mostrado que dois fatores são de fundamental importância nesse aspecto. Primeiro, a configuração geométrica dos *beacons*. O número de *beacons* e a forma como os eles são distribuídos no ambiente afetam de forma significativa a qualidade da localização. Isso faz com que a distribuição geométrica dos *beacons* em um ambiente seja determinante para estabelecer se um serviço de localização baseado em RF é ou não recomendável. No caso em que não é possível modificar a posição dos *beacons* (como ocorre geralmente com os pontos de acesso Wi-Fi) essa informação é muito relevante. Segundo, a qualidade da estimativa de distância entre o objeto alvo da localização e os *beacons* (quando o método utilizado depende dessa estimativa). Nesse aspecto, a precisão do modelo de propagação é o fator importante. Se o modelo fornecer boas estimativas o resultado da localização será melhor.

Utilizar múltiplas tecnologias oferece duas vantagens principais. Primeiro, a utilização de múltiplas tecnologias é vantajosa porque oferece mais alternativas de fontes de informação (mais *beacons*) para algoritmos de localização. Mais *beacons* potencialmente podem levar a erros menores de localização. Isso foi evidenciado pela avaliação do método baseado em mapa de assinaturas. Segundo, a existência de múltiplas tecnologias pode permitir a continuidade do serviço de localização, mesmo em regiões em que a cobertura obtida por apenas uma tecnologia é reduzida por meio da utilização das outras tecnologias. Isso foi demonstrado na avaliação do método baseado em modelos de propagação quando o erro de localização permaneceu reduzido mesmo quando a cobertura Wi-Fi era reduzida em uma região. Por causa da existência de dispositivos compatíveis com outras tecnologias foi possível evitar que o erro de localização crescesse muito.

A utilização de múltiplas tecnologias RF também gera desafios. Dois desafios principais foram identificados. O primeiro é a possibilidade de ocorrer interferência entre as tecnologias, uma vez que elas operam na mesma faixa de frequência (2.4 GHz). Sendo assim, é importante avaliar o quanto essa interferência pode afetar a qualidade da localização. Foi dado um primeiro passo nessa direção. Foi demonstrado que, para o caso específico das tecnologias Wi-Fi e Bluetooth, a exatidão da localização pode ser comprometida por causa da interferência. O

segundo desafio é descobrir qual a melhor forma de utilizar múltiplas tecnologias, ou seja, *como* fazer a fusão das informações das diferentes tecnologias da melhor forma possível. Nesse trabalho foi proposto um mecanismo de concatenação. Outros mecanismos ainda precisam ser avaliados e comparados com o método de concatenação. Em resumo, os dois grandes desafios são (i) descobrir *como integrar* as tecnologias (*o problema de encontrar a melhor forma de fazer a fusão das informações*) e, concomitantemente, (ii) descobrir *como evitar* os possíveis efeitos adversos dessa integração (*o problema da interferência*).

Será possível alcançar uma melhor compreensão dos aspectos envolvidos na localização baseada em RF e obter contribuições promissoras para auxiliar na resolução desse problema quando essas vantagens forem melhor exploradas e esses desafios superados.

Como última consideração sobre localização em ambientes internos, é importante ressaltar que soluções para esse problema devem ser projetadas e desenvolvidas baseadas na aplicação. Não existe um método ou técnica que sirva bem a todos os propósitos, uma vez que aplicações diferentes têm requisitos de exatidão, custo e disponibilidade diferentes. O projetista do sistema é responsável por decidir quais dos requisitos devem ter maior prioridade e escolher a opção que for mais adequada em cada caso. Por exemplo, a abordagem baseada na utilização do RSSI produz resultados com exatidão razoável para determinadas aplicações (localização de pessoas, por exemplo), mas que podem não ser suficientes em outras aplicações (a própria localização de robôs pode necessitar de maior exatidão para ser considerada segura). Localização utilizando tecnologias sem fio podem prover convergência rápida para uma região em torno da localização real do objeto alvo da localização (principalmente quando o método baseado em mapa de assinaturas é utilizado), mas se for necessário maior exatidão, outros tipos de abordagens são mais indicadas [Quigley et al., 2010].

5.2 Publicações Resultantes Deste Trabalho

Esse trabalho gerou uma publicação:

- Rodrigues, M.; Vieira, L. F. & Campos, M. M. (2011). Fingerprinting-based Radio Localization in Indoor Environments Using Multiple Wireless Technologies. In *Proceedings of the Twenty-Second IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'11), Toronto, Canada. Setembro 2011.*

5.3 Trabalhos Futuros

Este trabalho pode ser estendido de várias formas. A lista abaixo apresenta algumas extensões possíveis.

- **Como integrar diferentes mapas de RSSI de diferentes tecnologias sem fio para possibilitar melhores resultados de localização.** Nesta dissertação foi proposto e utilizado um mecanismo de concatenação dos mapas para fazer a integração (ver Seção 3.1.4). Seria relevante investigar, propor e avaliar outras formas de fazer a integração dos mapas. Por exemplo, uma alternativa seria associar pesos diferentes para cada tecnologia ao fazer a integração. A escolha dos pesos poderia ser baseada em circunstâncias dinâmicas.
- **Atualização dos mapas de assinaturas dinamicamente.** Nesta aspecto surgem algumas questões interessantes. Os valores de RSSI variam no tempo e espaço. Qual a forma mais eficaz e eficiente de capturar essas mudanças e integrá-las dinamicamente ao mapa já existente? Como e com que frequência fazer essa integração? O que indicaria a necessidade de uma atualização do mapa? O tempo desde a última atualização ou alguma outra característica dinâmica?
- **Avaliar a integração de tecnologias sem fio com outros sensores, como, por exemplo, laser, sonar e câmeras.** Um trabalho recente interessante nessa linha de investigação é [Quigley et al., 2010] no qual são utilizados dispositivos Wi-Fi e uma câmera para fazer localização em ambientes internos. A utilização do sinal Wi-Fi permite a estimação aproximada global da localização de forma rápida, enquanto outros sensores (como a câmera utilizada nesse trabalho permite melhorar a exatidão das estimativas). A melhor forma de fazer a fusão de sensores, considerando o sinal Wi-Fi como uma das fontes de observação, é um tópico que ainda precisa ser mais investigado.
- **Avaliar o impacto da interferência na qualidade da localização.** Wi-Fi, Bluetooth e Zigbee atuam na mesma faixa de frequência. Nessa área, seria importante estimar de forma mais clara como a interferência pode afetar a qualidade da localização. Também é importante investigar como minimizar a interferência entre os dispositivos, ou, mais importante, como tornar a localização robusta à essa interferência é importante para a criação de sistemas de localização mais efetivos.

Apêndice A

Especificações Técnicas dos Dispositivos Utilizados

A.1 *Beacons* Compatíveis com Bluetooth

O dispositivo Bluetooth USB Leadership® NoteShip Micro Adaptor (Figura A.1) possui as seguintes características:

- Peso c/ embalagem: 60 gramas
- Classe 2
- Interface: USB
- Alcance: até 10 metros
- Velocidade de transmissão: 723 kb/s
- Suporta padrão Bluetooth 2.0 (compatível também com v1.0 e v1.1)
- Frequência: 2.4 GHz
- Sistemas Operacionais Compatíveis: Mac OS v10.1.4 (ou mais atual), Microsoft® Windows Me/2000/XP/Vista, Linux
- Dimensões: L x A x P: 1,2 x 2 x 0.6 cm



Figura A.1. Foto do adaptador USB, compatível com a tecnologia Bluetooth, que foi utilizado como *beacon* neste trabalho.

A.2 Beacons Compatíveis com 802.15.4/Zigbee

Foi utilizado o nó sensor micaZ (Figura A.2). As principais características são:

- Compatível com IEEE 802.15.4 e Zigbee.
- Frequência de operação: 2.4 GHz.
- Desenvolvido especialmente para atuar em redes de sensores.
- Velocidade de transmissão: 250 kbps.
- Conector de expansão para placa de sensores (*sensor board*) com sensores sensíveis à luz, temperatura, pressão barométrica, aceleração e outros.

Maiores detalhes podem ser encontrados no *datasheet* do dispositivo disponível em [MEMSIC, 2011b].



Figura A.2. Foto nó sensor micaZ, compatível com a tecnologia 802.15.4/Zigbee, que foi utilizado como *beacon* neste trabalho.

A.3 Pontos de Acesso Wi-Fi

Os pontos de acesso Wi-Fi utilizados são fabricados pela Cisco®. Dois modelos diferentes estão presentes no prédio no qual os experimentos foram realizados. O primeiro modelo é o Cisco AIR-AP1131AG-A-K9 (Figura A.3). O Segundo é o Cisco AIR-AP1242AG-A-K9 (Figura A.4).



Figura A.3. Ponto de acesso Cisco AIR-AP1131AG-A-K9 utilizado como *beacon* neste trabalho.



Figura A.4. Outro modelo de ponto de acesso Cisco, o AIR-AP1242AG-A-K9. Também foi utilizado como *beacon*.

Como a quantidade de informações técnicas a respeito desses dispositivos é muito grande, elas não serão apresentadas, por limitações de espaço. Informações completas sobre os dispositivos podem ser encontradas no site do fabricante em [Cisco, 2011a] (Cisco AIR-AP1131AG-A-K9) e [Cisco, 2011b] (Cisco AIR-AP1242AG-A-K9).

A.4 Receptor Wi-Fi

A Figura A.5 mostra o receptor Wi-Fi utilizado. As principais características são:

- Interface: USB v1.1 e v2.0
- Padrões: 802.11b, 802.11g, Draft 802.11n
- Potência de transmissão: 23dBm
- Antena: 5dBi / Dipolar / Conector RP-SMA
- Sistemas operacionais compatíveis: Linux, Apple® Mac OS X, Microsoft® Windows 2000 / XP / Vista
- Dimensões: L x A x P: 2,05 x 1,15 x 6,47cm



Figura A.5. Receptor USB-Wi-Fi utilizado neste trabalho.

A.5 Receptor Bluetooth

Para coletar RSSI dos *beacons* compatíveis com Bluetooth foi utilizado o dispositivo mostrado na Figura A.6. Outras informações podem ser encontradas em [Billionton, 2011].

- Frequência: 2.4GHz
- Compatível com especificações v2.1 + EDR
- Classe 1

- Alcance: Até 100 metros



Figura A.6. Dispositivo Bluetooth utilizado como receptor.

A.6 Placa de Interface com Nós Sensores MIB 520

As principais características da placa de interface MIB520 (Figura A.7) são:

- Interface com PC: USB
- Interface com nó sensor: conector 51 pinos
- Alimentado pela USB
- Utilizado como estação base para redes de sensores sem fio
- Compatível com as plataformas IRIS/MICAZ/MICA2

Maiores informações podem ser encontradas em [MEMSIC, 2011a].



Figura A.7. Placa de programação MIB 520 utilizada.

A.7 Sensor Laser

No Capítulo 4 desta dissertação, foi utilizado o método de Monte Carlo para produzir o *ground truth* aproximado da localização. O sensor utilizado para fornecer informações sobre o ambiente para o método de Monte Carlo foi o laser modelo LMS 200 da empresa Sick® (uma foto do dispositivo é mostrada na Figura A.8). As principais características são:

- Dimensões: 15,6 cm X 15,5 cm X 21 cm
- Peso: 4,5 Kg
- Alcance máximo: 8,191 m / 81,91 m
- Resolução Angular: 0,25° / 0,5° / 1°
- Resolução: 1 mm / 10 mm
- Campo de Visão: 180°
- Interface de Comunicação: RS-232, 38400 bps

Descrições técnicas completas podem ser encontradas em [Laser Sick, 2011].



Figura A.8. Laser Sick LMS 200.

A.8 Robô Móvel Pioneer P3-AT

Como mencionado nos capítulos anteriores, a plataforma robótica Pioneer P3-AT foi utilizada neste trabalho. Uma foto do robô é mostrada na Figura A.9. As principais características são apresentadas na lista abaixo. Mais informações podem ser encontradas em [Mobile Robots, 2011].

- Dimensões: 50 X 49 X 26 cm
- Peso: 20 Kg (com todas as baterias)
- Velocidade máxima de translação: 0.7 m/s
- Sistema de direção: *Skid-steer*



Figura A.9. Robô Móvel Pioneer P3-AT.

Apêndice B

Breve introdução às unidades de medida dB e dBm

B.1 dB

O decibel (abreviado por dB) é uma unidade utilizada para representar a potência relativa de um sinal. O número de decibéis é igual a dez vezes o logaritmo (na base 10) da razão entre a potência do sinal medido e um sinal de referência. O decibel é derivado de outra medida, o Bel. Um decibel corresponde a décima parte de um Bel. Matematicamente, a potência de um sinal em dB pode ser expressa pela equação B.1

$$P_{dB} = 10 \log_{10}(P/P_0), \quad (\text{B.1})$$

em que P representa a potência do sinal medido e P_0 é a potência com a qual P está sendo comparada.

B.2 dBm

O dBm é utilizado para representar a razão entre a potência medida e o sinal de referência de um miliwatt. É uma medida absoluta de potência expressa como uma razão em relação ao valor de referência ($1mW$). O objetivo da utilização da unidade é facilitar a manipulação de valores muito grandes (ou muito pequenos) de potência por meio da conversão para escala logarítmica. Por exemplo,

- Quando a potência medida é $1mW$, a potência em dBm será igual a 0. Isso ocorre porque, nesse caso, usando a equação B.1, temos que $P_{dBm} =$

$$10\log_{10}\left(\frac{1}{1}\right) = 10\log_{10}(1) = 0.$$

- Quando a potência medida é $2mW$, a potência em dBm será igual a 3. Nesse caso, $P_{dBm} = 10\log_{10}\left(\frac{2}{1}\right) = 10\log_{10}(2) = 3$.
- Quando a potência medida é $100mW$, a potência em dBm será igual a 20.

Potências menores que $1mW$ são expressas com valores negativos em dBm.

De forma aproximada, um acréscimo de $3dBm$ representa dobrar a potência em miliwatts e um decréscimo de $3dBm$ representa dividir a potência em miliwatts por 2.

Referências Bibliográficas

- Aho, A. V.; Kernighan, B. W. & Weinberger, P. J. (1987). *The AWK Programming Language*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA.
- Alemdar, H. & Ersoy, C. (2010). Wireless Sensor Networks for Healthcare: A Survey. *Computer Networks*, 54(15):2688 – 2710.
- Andersen, J.; Rappaport, T. & Yoshida, S. (1995). Propagation Measurements and Models for Wireless Communications Channels. *Communications Magazine, IEEE*, 33(1):42 –49.
- Aparicio, S.; Perez, J.; Bernardos, A. & Casar, J. (2008a). A Fusion Method Based on Bluetooth and WLAN Technologies for Indoor Location. Em *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, MFI 2008*, pp. 487 – 491.
- Aparicio, S.; Pérez, J.; Tarrío, P.; Bernardos, A. & Casar, J. (2008b). An Indoor Location Method Based on a Fusion Map Using Bluetooth and WLAN Technologies. Em Corchado, J.; Rodríguez, S.; Llinas, J. & Molina, J., editores, *International Symposium on Distributed Computing and Artificial Intelligence, (DCAI 2008)*, volume 50 of *Advances in Soft Computing*, pp. 702 – 710. Springer Berlin / Heidelberg. 10.1007/978-3-540-85863-8_83.
- Bahl, P. & Padmanabhan, V. (2000). Radar: An In-Building RF-based User Location and Tracking System. Em *Proceedings of Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, volume 2, pp. 775 – 784.
- Bargh, M. S. & de Groote, R. (2008). Indoor Localization Based on Response Rate of Bluetooth Inquiries. Em *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Mobile Entity Localization and Tracking in GPS-Less Environments, MELT '08*, pp. 49 – 54, New York, NY, USA. ACM.

- Baronti, P.; Pillai, P.; Chook, V. W.; Chessa, S.; Gotta, A. & Hu, Y. F. (2007). Wireless Sensor Networks: A Survey on the State of the art and the 802.15.4 and zigbee Standards. *Computer Communications*, 30(7):1655 – 1695.
- Billionton (2011). Billionton Bluetooth Dongle. Website. <http://www.billionton.com/english/product01-3.aspx?ParentID=5&id=184>. Último acesso em Abril de 2011.
- Bishop, A. N.; Fidan, B.; Anderson, B. D.; Dogançay, K. & Pathirana, P. N. (2010). Optimality Analysis of Sensor-Target Localization Geometries. *Automatica*, 46(3):479 – 492.
- Boccardo, M.; Martinelli, F. & Pagnottelli, S. (2010). Constrained and Quantized Kalman Filtering for an RFID Robot Localization Problem. *Autonomous Robots*, 29:235 – 251.
- Borenstein, J. & Koren, Y. (1991). The Vector Field Histogram-fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(3):278 –288.
- Cabrera-Mora, F. & Xiao, J. (2008). Preprocessing Technique to Signal Strength Data of Wireless Sensor Network for Real-time Distance Estimation. Em *IEEE International Conference on Robotics and Automation, (ICRA 2008)*, pp. 1537 – 1542.
- Cheng, Y.-C.; Chawathe, Y.; LaMarca, A. & Krumm, J. (2005). Accuracy Characterization for Metropolitan-scale Wi-Fi Localization. Em *Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobiSys '05*, pp. 233 – 245, New York, NY, USA. ACM.
- Chintalapudi, K.; Padmanabha Iyer, A. & Padmanabhan, V. N. (2010). Indoor Localization Without the Pain. Em *Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '10*, pp. 173 – 184, New York, NY, USA. ACM.
- Cisco (2011a). Cisco Aironet 1130 AG Series Access Point Specification. Website. http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps5678/ps6087/product_data_sheet0900aecd801b9058.pdf. Último acesso em Março de 2011.
- Cisco (2011b). Cisco Aironet 1240 AG Series Access Point Specification. Website. <http://www.cisco.com/en/US/products/ps6521/index.html>. Último acesso em Março de 2011.

- Cox, L. (1989). Blanche: Position Estimation for an Autonomous Robot Vehicle. Em *Proceedings of the IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems. The Autonomous Mobile Robots and Its Applications. IROS '89*, pp. 432 – 439.
- Dawes, B. & Chin, K.-W. (2011). A Comparison of Deterministic and Probabilistic Methods for Indoor Localization. *Journal of Systems and Software*, 84(3):442 – 451.
- Dellaert, F.; Fox, D.; Burgard, W. & Thrun, S. (1999). Monte Carlo Localization for Mobile Robots. Em *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'99*, pp. 1322 – 1328 vol.2.
- Diaz, J. J. M.; Maues, R. d. A.; Soares, R. B.; Nakamura, E. F. & Figueiredo, C. M. S. (2010). Bluepass: An Indoor Bluetooth-based Localization System for Mobile Applications. Em *Proceedings of the IEEE Symposium on Computers and Communications, ISCC 2010*, pp. 778 – 783.
- Djugash, J.; Singh, S.; Kantor, G. A. & Zhang, W. (2006). Range-Only SLAM for Robots Operating Cooperatively With Sensor Networks. Em *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2006*, pp. 2078 – 2084.
- Ekahau (2010). Site do Serviço de Localização Indoor Ekahau. Website. <http://www.ekahau.com/>. Último acesso em Março de 2011.
- Flammini, A.; Ferrari, P.; Marioli, D.; Sisinni, E. & Taroni, A. (2009). Wired and Wireless Sensor Networks for Industrial Applications. *Microelectronics Journal*, 40(9):1322 – 1336. Quality in Electronic Design; 2nd IEEE International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces; Thermal Investigations of ICs and Systems.
- Gay, D.; Levis, P.; von Behren, R.; Welsh, M.; Brewer, E. & Culler, D. (2003). The nesc Language: A Holistic Approach to Networked Embedded Systems. Em *Proceedings of the ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation, PLDI '03*, pp. 1 – 11, New York, NY, USA. ACM.
- Gerkey, B. P.; Vaughan, R. T. & Howard, A. (2003). The Player/Stage Project: Tools for Multi-Robot and Distributed Sensor Systems. Em *Proceedings of the Eleventh International Conference on Advanced Robotics*, pp. 317 – 323.
- Google Latitude (2011). Serviço de Localização Oferecido pela empresa Google. Website. www.google.com/latitude/b/0. Último acesso em Março de 2011.

- Graefenstein, J. & Bouzouraa, M. (2008). Robust Method for Outdoor Localization of a Mobile Robot Using Received Signal Strength in Low Power Wireless Networks. Em *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2008*, pp. 33 – 38.
- Grewal, M. S. & Andrews, A. P. (2001). *Kalman Filtering : Theory and Practice Using MATLAB*. Wiley-Interscience, 2nd edição.
- Gwon, Y.; Jain, R. & Kawahara, T. (2004). Robust Indoor Location Estimation of Stationary and Mobile Users. Em *Twenty-Third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM 2004*, volume 2, pp. 1032 – 1043.
- Haeberlen, A.; Flannery, E.; Ladd, A. M.; Rudys, A.; Wallach, D. S. & Kavraki, L. E. (2004). Practical Robust Localization Over Large-scale 802.11 Wireless Networks. Em *Proceedings of the Tenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '04*, pp. 70 – 84, New York, NY, USA. ACM.
- Han, L.; Jyri, S.; Ma, J. & Yu, K. (2008). Research on Context-Aware Mobile Computing. Em *Proceedings of the 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications - Workshops, AINAW 2008*, pp. 24 – 30.
- Hart, J. K. & Martinez, K. (2006). Environmental Sensor Networks: A Revolution in the Earth System Science? *Earth-Science Reviews*, 78(3-4):177 – 191.
- Harter, A.; Hopper, A.; Steggles, P.; Ward, A. & Webster, P. (1999). The Anatomy of a Context-aware Application. Em *Proceedings of the Fifth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '99*, pp. 59 – 68, New York, NY, USA. ACM.
- Hightower, J. & Borriello, G. (2001). Location Systems for Ubiquitous Computing. *Computer*, 34:57 – 66.
- Honkavirta, V.; Perala, T.; Ali-Loytty, S. & Piche, R. (2009). A Comparative Survey of WLAN Location Fingerprinting Methods. Em *Proceedings of the Sixth Workshop on Positioning, Navigation and Communication. WPNC 2009*, pp. 243 – 251.
- Hossain, A. & Soh, W.-S. (2007). A Comprehensive Study of Bluetooth Signal Parameters for Localization. Em *Proceedings of the Eighteenth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2007*, pp. 1 – 5.

- Jourdan, D.; Dardari, D. & Win, M. (2006). Position Error Bound for UWB Localization in Dense Cluttered environments. Em *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, ICC 2006*, volume 8, pp. 3705 – 3710.
- Jourdan, D. B. & Roy, N. (2008). Optimal Sensor Placement for Agent Localization. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 4:13:1–13:40.
- Kalman, R. E. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transactions of the ASME-Journal of Basic Engineering*, 82(Series D):35 – 45.
- Kjaergaard, M. B. (2007). A Taxonomy for Radio Location Fingerprinting. Em *Proceedings of the 3rd International Conference on Location and Context-Awareness, LoCA'07*, pp. 139 – 156, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag.
- Ko, J.; Lu, C.; Srivastava, M.; Stankovic, J.; Terzis, A. & Welsh, M. (2010). Wireless Sensor Networks for Healthcare. *Proceedings of the IEEE*, 98(11):1947 – 1960.
- Kurth, D. (2004). Range-Only Robot Localization and SLAM With Radio. Dissertação de mestrado, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA.
- Kurth, D.; Kantor, G. & Singh, S. (2003). Experimental Results in Range-Only Localization With Radio. Em *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2003*, volume 1, pp. 974 – 979.
- Kwon, J.; Dondur, B. & Varaiya, P. (2004). Hybrid Algorithm for Indoor Positioning Using Wireless LAN. Em *Proceedings of the IEEE 60th Vehicular Technology Conference, VTC2004*, volume 7, pp. 4625 – 4629.
- Labioud, H.; Hossam, A. & Santis, C. D. (2007). *Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee and WiMax*. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA.
- Lakafosis, V. & Tentzeris, M. (2009). From Single to Multihop: The Status of Wireless Localization. *Microwave Magazine, IEEE*, 10(7):34 – 41.
- Laser Sick (2011). Descrição Técnica do Laser Sick LMS200. Website. <https://www.mysick.com/saqqara/get.aspx?id=im0012759&title=LMS200%2fLMS211%2fLMS221%2fLMS291+English>. Último acesso em Junho de 2011.
- Lau, S.-Y.; Lin, T.-H.; Huang, T.-Y.; Ng, I.-H. & Huang, P. (2009). A Measurement Study of Zigbee-based Indoor Localization Systems Under RF Interference. Em *Proceedings of the 4th ACM International Workshop on Experimental Evaluation and Characterization, WINTECH '09*, pp. 35 – 42, New York, NY, USA. ACM.

- Liu, H.; Darabi, H.; Banerjee, P. & Liu, J. (2007). Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 37(6):1067 – 1080.
- Low, K.; Win, W. & Er, M. (2005). Wireless Sensor Networks for Industrial Environments. Em *Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, 2005 and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce, International Conference on*, volume 2, pp. 271 – 276.
- Mahtab Hossain, A.; Van, H. N.; Jin, Y. & Soh, W.-S. (2007). Indoor Localization Using Multiple Wireless Technologies. Em *Proceedings of the IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, 2007. MASS 2007*, pp. 1 – 8.
- Mao, G.; Fidan, B. & Anderson, B. D. (2007). Wireless Sensor Network Localization Techniques. *Computer Networks*, 51(10):2529 – 2553.
- Matlab EKF (2011). Uma Implementação do EKF em Matlab. Website. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/18189>. Último acesso em Abril de 2011.
- MEMSIC (2011a). MIB520 Data Sheet. Website. www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=144%3Amib520cbmib520memsic. Último acesso em Março de 2011.
- MEMSIC (2011b). Micaz Sensor Node Data Sheet. Website. <http://www.memsic.com/support/documentation/wireless-sensor-networks/category/7-datasheets.html?download=148%3Amicaz>. Último acesso em Março de 2011.
- Menegatti, E.; Zanella, A.; Zilli, S.; Zorzi, F. & Pagello, E. (2009). Range-Only SLAM With a Mobile Robot and a Wireless Sensor Networks. Em *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'09*, pp. 1699 – 1705, Piscataway, NJ, USA. IEEE Press.
- Milenkovic, A.; Otto, C. & Jovanov, E. (2006). Wireless Sensor Networks for Personal Health Monitoring: Issues and an Implementation. *Computer Communications*, 29(13-14):2521 – 2533.
- MIT (2003). 10 Emerging Technologies That Will Change the World. *Technology Review*, pp. 33 – 49.

- Moayeri, N.; Mapar, J.; Tompkins, S. & Pahlavan, K. (2011). Emerging Opportunities for Localization and Tracking [guest editorial]. *Wireless Communications, IEEE*, 18(2):8 –9.
- Mobile Robots (2011). Pioneer Mobile Robot P3-AT. Website. <http://www.mobilerobots.com/PDFs/P3ATDX%20Datashheet.pdf>. Último acesso em Março de 2011.
- Moreno-Salinas, David, P. A. & Aranda, J. (2011). Optimal Sensor Placement for Underwater Positioning with Uncertainty in the Target Location. Em *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA2011*.
- Olson, E.; Leonard, J. J. & Teller, S. (2006). Robust Range-Only Beacon Localization. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 31(4):949 – 958.
- Pahlavan, K.; Li, X. & Makela, J. (2002). Indoor Geolocation Science and Technology. *Communications Magazine, IEEE*, 40(2):112 – 118.
- Pandya, D.; Jain, R. & Lupu, E. (2003). Indoor Location Estimation Using Multiple Wireless Technologies. Em *Proceedings of the 14th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2003*, volume 3, pp. 2208 – 2212.
- Priyantha, N. B. (2005). *The Cricket Indoor Location System*. Tese de doutorado, Cambridge, MA, USA.
- Quigley, M.; Stavens, D.; Coates, A. & Thrun, S. (2010). Sub-meter Indoor Localization in Unmodified Environments With Inexpensive Sensors. Em *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2039 –2046.
- Raghavan, A.; Ananthapadmanaban, H.; Sivamurugan, M. & Ravindran, B. (2010). Accurate Mobile Robot Localization in Indoor Environments Using Bluetooth. Em *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2010*, pp. 4391 – 4396.
- Rappaport, T. (2001). *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 2nd edição.
- Robbins, A. & H. F. Beebe, N. (2005). *Classic Shell Scripting*. O'Reilly Media, USA.

- Rodriguez, M.; Pece, J. P. & Escudero, C. J. (2005). In-Building Location Using Bluetooth. Em *Proceedings of the International Workshop on Wireless Ad Hoc Networks*.
- Rohrig, C. & Muller, M. (2009). Indoor Location Tracking in Non-Line-of-Sight Environments Using a IEEE 802.15.4a Wireless Network. Em *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS'09*, pp. 552 – 557, Piscataway, NJ, USA. IEEE Press.
- RssiDemo (2011). RSSI Application Wiki Page. Website. http://docs.tinyos.net/index.php/Rssi_Demo. Último acesso em Março de 2011.
- SkyHook (2011). Site do Serviço de Localização Skyhook. Website. <http://www.skyhookwireless.com/>. Último acesso em Março de 2011.
- SkyHook Coverage (2011). Cobertura do Banco de Dados do Serviço de Localização Skyhook. Website. www.skyhookwireless.com/howitworks/coverage.php. Último acesso em Março de 2011.
- The TinyOS 2.x Working Group (2005). Tinyos 2.0. Em *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys '05*, pp. 320 – 320, New York, NY, USA. ACM.
- Vitus, M. P. & Tomlin, C. J. (2010). Sensor Placement for Improved Robotic Navigation. Em *Proceedings of Robotics: Science and Systems, Zaragoza, Spain*.
- Vossiek, M.; Wiebking, L.; Gulden, P.; Wiegardt, J.; Hoffmann, C. & Heide, P. (2003). Wireless Local Positioning. *Microwave Magazine, IEEE*, 4(4):77 – 86.
- Want, R.; Hopper, A.; Falcão, V. & Gibbons, J. (1992). The Active Badge Location System. *ACM Transactions on Information Systems*, 10:91 – 102.
- Wavefront (2011). Descrição da Implementação do Algoritmo Wavefront, Disponível no Site do Simulador Player/Stage. Website. http://playerstage.sourceforge.net/doc/Player-2.0.0/player/group__driver__wavefront.html. Último acesso em Junho de 2011.
- Welch, G. (2011). Kalman Filter Resources. Website. <http://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/>. Último acesso em Março de 2011.
- Welch, G. & Bishop, G. (1995). An Introduction to the Kalman Filter. Relatório técnico, Chapel Hill, NC, USA.

- Win, M.; Conti, A.; Mazuelas, S.; Shen, Y.; Gifford, W.; Dardari, D. & Chiani, M. (2011). Network Localization and Navigation via Cooperation. *Communications Magazine, IEEE*, 49(5):56 –62.
- Wu, X.; Kumar, V.; Ross Quinlan, J.; Ghosh, J.; Yang, Q.; Motoda, H.; McLachlan, G.; Ng, A.; Liu, B.; Yu, P.; Zhou, Z.-H.; Steinbach, M.; Hand, D. & Steinberg, D. (2008). Top 10 Algorithms in Data Mining. *Knowledge and Information Systems*, 14:1 – 37.
- Yao, Q.; Wang, F.-Y.; Gao, H.; Wang, K. & Zhao, H. (2007). Location Estimation in Zigbee Network Based on Fingerprinting. Em *Proceedings of the IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, ICVES 2007*, pp. 1 – 6.
- Youssef, M. & Agrawala, A. (2005). The Horus WLAN Location Determination System. Em *Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobiSys '05*, pp. 205–218, New York, NY, USA. ACM.