

**RICARDO SANGOI PADILHA**

**DIGICLIP: UM SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO E  
RASTREAMENTO PARA O AMBIENTE  
CORPORATIVO**

**FLORIANÓPOLIS  
2005**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DigiClip: Um Sistema de Localização e Rastreamento  
para o Ambiente Corporativo**

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

**RICARDO SANGOI PADILHA**

Florianópolis, Fevereiro de 2005.

# DIGICLIP: UM SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO E RASTREAMENTO PARA O AMBIENTE CORPORATIVO

Ricardo Sangoi Padilha

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Controle, Automação e Informática Industrial*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

---

Prof. Joni da Silva Fraga, Dr.  
Orientador

---

Prof. Denizar Cruz Martins, Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

---

Prof. Joni da Silva Fraga, Dr.  
Presidente

---

Prof. Lau Cheuk Lung, Dr.

---

Prof. Carlos Barros Montez, Dr.

---

Prof. Carlos Becker Westphall, Dr.

---

Prof. Leandro Buss Becker, Dr.

*“Although nature commences with reason and ends in experience  
it is necessary for us to do the opposite, that is, to commence with  
experience and from this to proceed to investigate the reason”.*

Leonardo da Vinci

*À Luciana,  
minha eterna “lindinha”.*

## Agradecimentos

Tentar enumerar em apenas alguns parágrafos todas as pessoas que participaram da construção deste trabalho, seja diretamente ou indiretamente, já seria uma tarefa complicada. Mais complicado ainda será a injustiça cometida com alguns que mereceriam constar nesta curta lista. Por isso, desde já, agradeço a todos vocês, que sabem que foram, são e serão partes essenciais daquilo que fui, sou e serei. Em particular, não posso deixar de agradecer:

Aos meus pais, José Carlos e Marília, por tantas coisas que seria impossível enumerar com palavras. Direi apenas que a cada passo, os ensinamentos de vocês servem como uma bússola que sempre indica o caminho certo.

Aos meus irmãos, Rafael e Régis, e aos camaradas Daniel e Gustavo, pela ajuda “psicológica”: as noitadas jogando *War* foram indispensáveis para o bom andamento dos trabalhos.

Ao meu sogro Otávio e minha “sogrinha” Eliane, pelo esforço extraordinário, e pela atenção e carinho. Além disso, as noitadas assistindo filmes e comendo salgadinhos também foram indispensáveis.

À empresa SAP, por ter me recebido para o desenvolvimento deste trabalho e em particular ao meu supervisor na SAP, Uwe Kubach, pelo suporte e companheirismo nos momentos difíceis, e pela ajuda no desenvolvimento da parte prática deste trabalho.

A ambas minhas avós: Vó Anair e Vó Dalva. Eu sei que, como cada um de seus netos, tenho um espaço especial em seus corações, assim como vocês ocupam um espaço especial no meu.

À Luciana, minha querida, amada e lindinha esposa. Palavras não seriam suficientes para expressar a minha gratidão.

E, finalmente, à minha avó Maria e meu avô Joaquim. Eu sei que, onde quer que estejam, continuam cuidando de mim. A saudade é grande, e não me esquecerei nunca de vocês.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

## **DIGICLIP: UM SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO E RASTREAMENTO PARA O AMBIENTE CORPORATIVO**

**Ricardo Sangoi Padilha**

Fevereiro 2005

Orientador: Prof. Joni da Silva Fraga, Dr.

Área de Concentração: Controle, Automação e Informática Industrial

Palavras-chave: Sistemas de Localização e Rastreamento, Sistemas Embarcados, Sistemas Distribuídos

Número de Páginas: 94

Sistemas de Localização e Rastreamento (SLR) são projetados de maneira específica para resolver um determinado problema. Muitas vezes seu escopo é limitado ao tipo de ambiente ou às restrições tecnológicas do projeto. Mais especificamente, SLRs voltados para o uso em ambientes fechados são particularmente complexos pois os métodos tradicionais para o cálculo da localização de objetos sofrem muito com as interferências causadas pelas características dos fenômenos físicos empregados. Neste tipo de ambiente, muitas vezes é necessário optar entre exatidão ou complexidade do sistema. Neste trabalho é apresentado um SLR desenvolvido para o uso em ambientes fechados, com o objetivo de rastrear documentos e facilitar o gerenciamento do *workflow* através de uma maior integração entre os documentos eletrônicos e suas versões impressas. O sistema apresentado oferece exatidão e simplicidade, pois se baseia em um processo de localização em duas etapas, que combina o estado da arte de outros SLRs, e em um algoritmo criado especificamente para aumentar a escalabilidade do sistema. O desempenho do sistema é avaliado de maneira sistemática e é comparado com outros sistemas existentes na literatura. O sistema também oferece propriedades para o ambiente corporativo: tolerância a faltas, escalabilidade e expansibilidade.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as one of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

## **DIGICLIP: A LOCATION TRACKING SYSTEM FOR THE CORPORATE ENVIRONMENT**

**Ricardo Sangoi Padilha**

February 2005

Advisor: Prof. Joni da Silva Fraga, Dr.

Area of Concentration: Control, Automation and Industrial Computing

Keywords: Location and Tracking Systems, Embedded Systems, Distributed Systems

Number of Pages: 94

Location and Tracking Systems (LTS) are designed to solve a particular set of problems. Usually their scope is limited to the targeted environment or the technological restrictions of the project. Specifically, LTSs designed for indoor usage are particularly complex to implement, since traditional methods of calculating the location of objects suffer from interference caused by the very nature of the physical phenomena used. In this kind of environment, it is usually acknowledged that one must choose between accuracy and complexity of the system. In this dissertation, a LTS developed for indoor usage is presented: its goal is to track documents and improve the interaction between electronic and printed versions, thus facilitating workflow management. The presented system offers both accuracy and simplicity, since the location procedure is divided in two steps that combine state of the art techniques from other LTSs and a new algorithm created specifically to increase the scalability of the system. The performance of the system is evaluated systematically and the results are compared to equivalent LTSs. The system also offers properties required for corporate deployment: fault tolerance, scalability and expansibility.

# Sumário

<b>SUMÁRIO</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	<b>XII</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. SOBRE SISTEMAS DE GERENCIAMENTO DE DOCUMENTOS E WORKFLOW .....	2
1.2. OBJETIVO E JUSTIFICATIVA .....	4
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	5
<b>CAPÍTULO 2: CLASSIFICAÇÃO E TAXONOMIA PARA SISTEMAS DE LOCALIZAÇÃO E RASTREAMENTO</b> .....	<b>6</b>
2.1. EXATIDÃO E PRECISÃO.....	6
2.2. TÉCNICA DE SENSORIAMENTO .....	7
2.2.1. <i>Triangulação</i> .....	7
2.2.1.1. <i>Lateração (Lateration)</i> .....	7
2.2.1.2. <i>Angulação</i> .....	9
2.2.2. <i>Proximidade</i> .....	10
2.2.3. <i>Análise de Cenário</i> .....	12
2.2.4. <i>Considerações Sobre as Técnicas de Sensoriamento</i> .....	13
2.3. COORDENADAS FÍSICAS OU SIMBÓLICAS .....	14
2.4. COORDENADAS ABSOLUTAS OU RELATIVAS.....	15
2.5. DISTRIBUIÇÃO DO ESFORÇO COMPUTACIONAL .....	15
2.6. ESCALABILIDADE .....	16
2.7. CAPACIDADE DE IDENTIFICAÇÃO .....	17
2.8. CUSTO.....	17
2.9. LIMITAÇÕES DIVERSAS .....	18
2.10. CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	18
<b>CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE LOCALIZAÇÃO E RASTREAMENTO</b> .....	<b>19</b>
3.1. ACTIVE BADGES .....	20
3.2. RADAR.....	24
3.3. SPOTON.....	28
3.4. MOTETRACK.....	31
3.5. COMPARAÇÃO DOS SLRS AVALIADOS .....	35
3.6. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	37
<b>CAPÍTULO 4: SISTEMA DE LOCALIZAÇÃO E RASTREAMENTO BASEADO EM SMART-ITS</b> .....	<b>38</b>
4.1. SMART-ITS .....	38
4.2. SLR BASEADO EM PROXIMIDADE .....	42
4.3. SLR BASEADO EM ANÁLISE DE CENÁRIO .....	44
4.3.1. <i>Procedimento de Teste de Análise de Cenário</i> .....	45

4.3.2.	<i>Resultados do Teste</i> .....	46
4.4.	ALGORITMO DE CÁLCULO DA LOCALIZAÇÃO .....	52
4.5.	SERVIDOR DE LOCALIZAÇÃO.....	54
4.6.	COMPARAÇÃO DO SLR DO DIGICLIP COM OUTROS SISTEMAS.....	56
4.7.	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	57
<b>CAPÍTULO 5: TESTES DE DESEMPENHO E AVALIAÇÃO DO SLR PARA O DIGICLIP ....</b>		<b>59</b>
5.1.	DESEMPENHO DO SLR BASEADO EM ANÁLISE DE CENÁRIO .....	59
5.1.1.	<i>Testes Básicos de Desempenho</i> .....	61
5.1.2.	<i>Testes Usando Filtragem dos Valores de Entrada</i> .....	64
5.1.3.	<i>Testes Usando Filtragem dos Valores de Saída</i> .....	66
5.1.4.	<i>Testes Usando Subconjuntos dos Pontos de Referência</i> .....	67
5.2.	IMPLEMENTAÇÃO DO SERVIDOR DE LOCALIZAÇÃO.....	69
5.3.	CONSIDERAÇÕES SOBRE A ESCALABILIDADE DO SISTEMA.....	72
5.4.	CONSIDERAÇÕES SOBRE A EXPANSIBILIDADE DO SISTEMA .....	73
5.5.	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	75
<b>CAPÍTULO 6: CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS.....</b>		<b>76</b>
6.1.	PERSPECTIVAS FUTURAS.....	78
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>80</b>

## Lista de Ilustrações

FIGURA 1: EXEMPLO DE TRIANGULAÇÃO. ....	8
FIGURA 2: EXEMPLO DE ANGULAÇÃO. ....	10
FIGURA 3: DETECÇÃO POR PROXIMIDADE COM SUPERPOSIÇÃO DE ÁREAS DE COBERTURA. ....	11
FIGURA 4: EXEMPLO DE <i>ACTIVE BADGE</i> . ....	20
FIGURA 5: INFRA-ESTRUTURA DO SISTEMA <i>ACTIVE BADGES</i> . ....	22
FIGURA 6: DIAGRAMA FUNCIONAL DE UM <i>ACTIVE BADGE</i> . ....	23
FIGURA 7: ÁREA DE TESTE USADA PARA O SISTEMA RADAR. ....	26
FIGURA 8: ESTIMANDO A LOCALIZAÇÃO USANDO A MÉDIA DE 4 PONTOS. ....	27
FIGURA 9: EXEMPLO DE DISPOSITIVO USADO NO SPOTON. ....	29
FIGURA 10: GRÁFICO DA POTÊNCIA DE SINAL EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA PARA O SPOTON. ....	29
FIGURA 11: PROTÓTIPO DE <i>HARDWARE</i> CUSTOMIZADO PARA O SISTEMA SPOTON. ....	31
FIGURA 12: ÁREA DE TESTE USADA PARA O SISTEMA MOTE TRACK. ....	33
FIGURA 13: ARQUITETURA DOS SMART-ITS. ....	39
FIGURA 14: EXEMPLO DE <i>PARTICLE</i> ( <i>CORE BOARD</i> E <i>SENSOR BOARD</i> ). ....	41
FIGURA 15: ESQUEMA DE COMUNICAÇÃO ENTRE <i>PARTICLES</i> , SENSORES E <i>BRIDGES</i> . ....	42
FIGURA 16: ARQUITETURA DE UM SLR BASEADO EM PROXIMIDADE USANDO SMART-ITS. ....	43
FIGURA 17: EXEMPLO DE INDECIDIBILIDADE NA LOCALIZAÇÃO EM CASO DE SOBREPOSIÇÃO DE ÁREAS DE COBERTURA. ....	43
FIGURA 18: ÁREA DE TESTE USADA PARA A AVALIAÇÃO DE UM SLR BASEADO EM ANÁLISE DE CENÁRIO. ....	45
FIGURA 19: VALORES MEDIDOS PARA A POTÊNCIA DE EMISSÃO 1. ....	47
FIGURA 20: APROXIMAÇÃO <i>BEST-FIT</i> DE SEGUNDO GRAU PARA OS VALORES DE POTÊNCIA DE SINAL RECEBIDO PARA A POTÊNCIA DE EMISSÃO 1. ....	48
FIGURA 21: VALORES MEDIDOS PARA A POTÊNCIA DE EMISSÃO 15. ....	49
FIGURA 22: VALORES MEDIDOS PARA A POTÊNCIA DE EMISSÃO 20. ....	49
FIGURA 23: VALORES MEDIDOS PARA A POTÊNCIA DE EMISSÃO 25. ....	50
FIGURA 24: VALORES MEDIDOS PARA A POTÊNCIA DE EMISSÃO 31. ....	50
FIGURA 25: APROXIMAÇÃO <i>BEST-FIT</i> DE SEGUNDO GRAU PARA OS VALORES DE POTÊNCIA DE SINAL RECEBIDO PARA A POTÊNCIA DE EMISSÃO 31. ....	51
FIGURA 26: ARQUITETURA DO SERVIDOR DE LOCALIZAÇÃO. ....	54
FIGURA 27: PROTÓTIPOS DE DISPOSITIVOS MÓVEIS USADOS NO DIGICLIP. ....	59
FIGURA 28: COMPARAÇÃO DE POTÊNCIAS DE EMISSÃO USADAS INDEPENDENTEMENTE, COM UMA <i>BRIDGE</i> . ....	61
FIGURA 29: COMPARAÇÃO DE POTÊNCIAS DE EMISSÃO USADAS INDEPENDENTEMENTE, COM DUAS <i>BRIDGES</i> . ....	62
FIGURA 30: COMPARAÇÃO DE POTÊNCIAS DE EMISSÃO USADAS EM CONJUNTO, COM UMA <i>BRIDGE</i> . ....	63
FIGURA 31: COMPARAÇÃO DE POTÊNCIAS DE EMISSÃO USADAS EM CONJUNTO, COM DUAS <i>BRIDGES</i> . ....	64
FIGURA 32: DESEMPENHO USANDO FILTRAGEM DE DADOS DE ENTRADA, COM UMA <i>BRIDGE</i> . ....	65
FIGURA 33: DESEMPENHO USANDO FILTRAGEM DE DADOS DE ENTRADA, COM DUAS <i>BRIDGES</i> . ....	66
FIGURA 34: DESEMPENHO USANDO FILTRAGEM DE DADOS DE SAÍDA, COM UMA <i>BRIDGE</i> . ....	67
FIGURA 35: DESEMPENHO PARA UM SUBCONJUNTO COM 25% DOS PONTOS DE REFERÊNCIA, COM DUAS <i>BRIDGES</i> . ....	68
FIGURA 36: DESEMPENHO PARA UM SUBCONJUNTO COM 25% DOS PONTOS DE REFERÊNCIA, USANDO FILTRAGEM DE SAÍDA E COM DUAS <i>BRIDGES</i> . ....	68
FIGURA 37: INTERFACE WEB PARA O SERVIDOR DE LOCALIZAÇÃO. ....	69
FIGURA 38: ASSOCIAÇÃO DE UM DOCUMENTO ELETRÔNICO COM A VERSÃO IMPRESSA. ....	69
FIGURA 39: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DE DOCUMENTOS EM TEMPO REAL. ....	70
FIGURA 40: HISTÓRICO DE ASSINATURAS DE UM DOCUMENTO. ....	70
FIGURA 41: INDICAÇÃO DO ESTADO DE UM DOCUMENTO. ....	71
FIGURA 42: MOSTRADORES DOS SENSORES DO DOCUMENTO. ....	71
FIGURA 43: PROTÓTIPO DE DISPOSITIVO MÓVEL COM LEDs ACESOS. ....	73

## Lista de Tabelas

TABELA 1: TABELA COMPARATIVA DE CARACTERÍSTICAS DOS SLRS AVALIADOS.....	36
TABELA 2: TABELA COMPARATIVA DE CARACTERÍSTICAS DO SLR DO DIGICLIP.....	57

## Lista de Siglas

ACL	<i>Abstract Communication Layer</i>
FWAF	<i>Floor/Wall Attenuation Factor</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GUID	<i>Globally Unique Identification</i>
IR	<i>Infrared</i>
LOS	<i>Line of Sight</i>
NNSS	<i>Nearest Neighbor in Signal Space</i>
SLR	Sistema de Localização e Rastreamento
TDMA/CSCA	<i>Time Division Multiplex Access with Collision Sensing and Collision Avoidance</i>
VOR	<i>VHF Omni Directional Ranging</i>

## Capítulo 1: Introdução

Entre os avanços mais esperados para sistemas computacionais pessoais está a promessa de computação ubíqua. Ou seja, espera-se que o computador (ou sistema de computadores) venha se integrar no ambiente de maneira quase invisível, porém onipresente.

Os esforços nesse sentido indicam que tais sistemas precisam ser capazes de interagir com o ambiente de maneira muito mais refinada do que os simples dispositivos de entrada de dados tradicionais. É necessário que o computador seja capaz de perceber o ambiente, ou contexto [18], no qual se situa.

Obviamente, a quantidade de informação contextual que pode ser fornecida para sistemas computacionais é praticamente ilimitada, assim como as aplicações que podem ser derivadas destas informações:

- Um sistema ciente da hora do dia poderia ajustar a luminosidade do ambiente;
- Um sistema capaz de medir a temperatura poderia controlar o sistema de climatização;
- Um sistema capaz de identificar pessoas e objetos pode adaptar suas interfaces de maneira a apresentar apenas um subconjunto de informações relevantes ao usuário.

Nesta diversidade de informações de contexto, uma das mais importantes é a localização. De fato, Sistemas de Localização e Rastreamento (SLR) estão se tornando cada vez mais parte integrante de nosso cotidiano. O exemplo mais conhecido e talvez mais usado de sistemas desse tipo é o *Global Positioning System* (GPS). Originalmente um sistema para uso militar, o GPS hoje é usado para os mais diversos fins, e se tornou uma ferramenta indispensável para diversas atividades. Podemos citar o exemplo de caminhoneiros que estão se equipando com sistema de navegação baseados em GPS: para

estes, os sistemas permitem o planejamento de rotas mais eficientes seguindo restrições de peso, limitações horárias e até evitando pedágios.

Obviamente, a informação de localização é importante não somente para atividades que ocorrem em ambientes abertos. Sistemas que fornecem ou usam a localização de pessoas em ambientes internos têm sido cada vez mais usados por questões de segurança, eficiência ou até comodidade.

É nesse sentido que o projeto DigiClip [22] foi iniciado: fornecer um sistema de localização simples, eficiente e barato para localização de objetos em ambientes internos.

### **1.1. Sobre Sistemas de Gerenciamento de Documentos e Workflow**

Atualmente existe um grande esforço no sentido de tornar a maior parte dos processos das empresas para o formato eletrônico. Os ganhos obtidos através desta migração superam facilmente os custos envolvidos, pois uma vez implantados tais sistemas aumentam a eficiência e facilitam a cooperação entre empregados.

Estes sistemas são chamados sistemas de *workflow*, e seu objetivo é a “automação do processo de negócio onde documentos, informações ou tarefas são passadas de um participante para o outro para execução de uma ação, de acordo com um conjunto de regras de procedimentos” [25].

Infelizmente, existem processos que ainda não podem ser convertidos para formatos eletrônicos. Por exemplo, o processo de assinatura de documentos ainda não é facilmente resolvido digitalmente, e por várias razões:

- Do ponto de vista tecnológico, existem diversos padrões concorrentes e incompatíveis para a implementação de assinaturas digitais;
- Do ponto de vista legal, as assinaturas digitais ainda não possuem a mesma aceitação que uma assinatura real, em papel;
- A implementação de sistemas baseados em assinatura digital de larga escala ainda é bastante complexa e sistemas que tenham autoridade para funcionar através dos limites de empresas ou governos são praticamente inexistentes.

---

Por estas e outras razões, a maior parte dos documentos que precisam ser autenticados ainda usam as tradicionais assinaturas em papel. Entretanto, versões impressas de documentos apresentam diversos problemas de logística:

- Como é possível controlar o *workflow* de um objeto físico?
- Como garantir que a versão impressa (estática) ainda é consistente com a versão eletrônica (dinâmica)?
- Como permitir que a versão impressa ofereça o mesmo nível de interatividade que a versão eletrônica?

Este tipo de problema está se tornando cada vez mais freqüente nas empresas que tentam migrar seus processos para versões eletrônicas: para todo processo existe um componente que não pode ser “digitalizado”, ou seja, existe uma etapa que liga o processo com o mundo real e que não pode, *a priori*, interagir com os sistemas de informação sem a intervenção de usuários. No caso de sistemas de *workflow*, esta separação entre o mundo real e o mundo virtual pode ser facilmente explicada:

- **Do ponto de vista do sistema de gerenciamento de *workflow***, é impossível saber a localização de uma determinada cópia impressa de um documento. Da mesma maneira, é difícil manter um estado consistente do documento físico sem intervenção constante dos usuários. Além disso, qualquer sistema que depende de intervenções freqüentes de usuários para manter a consistência dos dados é inconveniente, cai em desuso, e acaba contendo apenas informações desatualizadas ou simplesmente erradas;
- **Do ponto de vista do documento impresso**, é impossível receber algum tipo de *feedback* em relação ao estado original do documento em sua versão eletrônica. Obviamente, uma vez impresso um documento só poderá se tornar obsoleto com o passar do tempo: esta obsolescência é devida principalmente a revisões do documento eletrônico original. Ou seja, até que a nova revisão do documento eletrônico seja impressa e difundida, todo trabalho feito (avaliação, revisões e assinaturas) sobre a cópia antiga será descartado. Ou seja, é necessário que o documento impresso indique o seu estado de maneira constante e atualizada.

## 1.2. Objetivo e Justificativa

Para tentar diminuir a separação entre documentos impressos e eletrônicos, foi decidido projetar e implementar um SLR voltado para o rastreamento de documentos, como parte do projeto DigiClip [22]. Apesar de já existirem diversos SLRs hoje em dia, inclusive ofertas comerciais, uma pesquisa preliminar indicou que nenhum possuía o conjunto de características desejado para o DigiClip.

Geralmente, as plataformas de *hardware* disponíveis para a implementação de sistemas embarcados se enquadram em duas categorias: 1) sistemas voltados para a aquisição de dados (*wireless sensor networks*) ou 2) sistemas que fornecem apenas suporte à localização (*location systems*).

O principal objetivo do DigiClip é facilitar a integração de objetos do mundo real com visa a criação de um sistema que permita diminuir a separação entre os documentos eletrônicos e suas representações físicas (impressas). Para isso, o DigiClip usa a plataforma de hardware chamada *Smart-Its* que foi especialmente desenvolvida para a integração de sistemas computacionais em objetos comuns. Além destas características, o SLR necessário para o DigiClip tem uma série de requisitos adicionais necessários para o uso em um ambiente corporativo:

- **Tolerância à faltas:** é imprescindível que o SLR seja capaz de sobreviver a falhas de *software*, *hardware* e infra-estrutura de comunicação, pois uma vez em uso diversos outros setores da empresa virão a depender criticamente de seu funcionamento;
- **Escalabilidade:** um SLR de porte empresarial deve ser capaz de expandir em função das necessidades da empresa – além de prever o suporte a um grande número de dispositivos funcionando simultaneamente;
- **Expansibilidade:** o SLR deve permitir a introdução de funcionalidades adaptadas ao problema de *workflow*, como, por exemplo, a interatividade e a sincronização do estado do objeto físico com sua representação eletrônica.

Neste trabalho serão analisados outros SLRs presentes na literatura e avaliadas suas limitações e pontos fortes. A partir desta análise serão reunidas as características que suportam os requisitos do sistema e desenvolvidas técnicas e implementado um protótipo que preencha estes requisitos.

### **1.3. Estrutura do Trabalho**

No capítulo 2 será apresentada a taxonomia utilizada para a definição e avaliação de SLRs mais aceita atualmente. Esta taxonomia categoriza os SLRs segundo suas características, funcionalidade oferecida e limitações tecnológicas.

No capítulo 3 serão avaliados diversos SLRs que existem na literatura. Para cada um serão explicadas as principais características (*hardware e software*), inovações oferecidas e resultados importantes obtidos. A partir desta análise serão definidas as características do sistema a ser implementado para o DigiClip.

O capítulo 4 discute as escolhas feitas para o SLR usado no DigiClip, explicando suas limitações e suas vantagens. Essas características são comparadas com os outros sistemas apresentados no capítulo anterior.

A avaliação da implementação é feita no capítulo 5 através de testes e medidas de desempenho. Verificamos se o protótipo implementa os requisitos do projeto e as suas vantagens e desvantagens em relação aos protótipos dos sistemas anteriores.

Finalmente, no capítulo 6 serão apresentadas as considerações finais sobre o trabalho realizado, e perspectivas de trabalhos futuros.

## **Capítulo 2: Classificação e Taxonomia para Sistemas de Localização e Rastreamento**

Desde os primeiros esforços para a criação de Sistemas de Localização e Rastreamento (SLR) diversos autores apresentaram diferentes sistemas de classificação e taxonomias para SLRs. Estes diferentes sistemas de classificação eram extremamente simplificados, visando apenas comparar a solução apresentada pelos autores com sistemas anteriores.

Por exemplo, a literatura mais tradicional sobre SLRs apresenta sistemas de classificação baseados na tecnologia empregada ([12], [5]), ou ainda sobre o algoritmo de cálculo de localização empregado [6].

Todos estes sistemas antigos de classificação estão sendo substituídos pelo sistema apresentado por Hightower e Boriello ([13], [14] e [15]). Este sistema, e a taxonomia que o acompanha, está se tornando rapidamente a referência a ser usada para o estudo de SLRs. Esta taxonomia tenta apreender todos os aspectos relevantes para a avaliação de um SLR. Apesar de alguns destes critérios não serem aplicáveis a todos os sistemas possíveis, na sua totalidade formam uma base bastante abrangente para a classificação e avaliação de tais sistemas. Ela define as propriedades apresentadas nos itens a seguir.

### **2.1. Exatidão e Precisão**

Para avaliar o desempenho de SLRs é necessário definir duas métricas básicas: a exatidão e a precisão [13]. No contexto de SLRs, a exatidão indica a distância de erro entre a posição real de um objeto e a posição calculada para o mesmo pelo sistema. De uma maneira coloquial, a exatidão define o tamanho mínimo do “grão”, também chamado “granularidade”, que é possível distinguir usando tal sistema.

A precisão é a medida da repetitividade do sistema, ou seja, uma estimativa da qualidade das medidas. A precisão também pode ser vista como uma medida da estabilidade de um sistema, ou ainda de sua capacidade de resistir ou absorver interferências externas.

Receptores GPS de alta qualidade são capazes de calcular a sua posição com margens de erro de 1 a 3 metros em 99% das medidas. A margem de erro indica a exatidão e a porcentagem indica a precisão da medida.

## **2.2. Técnica de Sensoriamento**

No nível mais baixo do SLR estão as técnicas de sensoriamento. As técnicas de sensoriamento definem como o SLR obtém os dados do ambiente, que serão avaliados e processados para obter a localização.

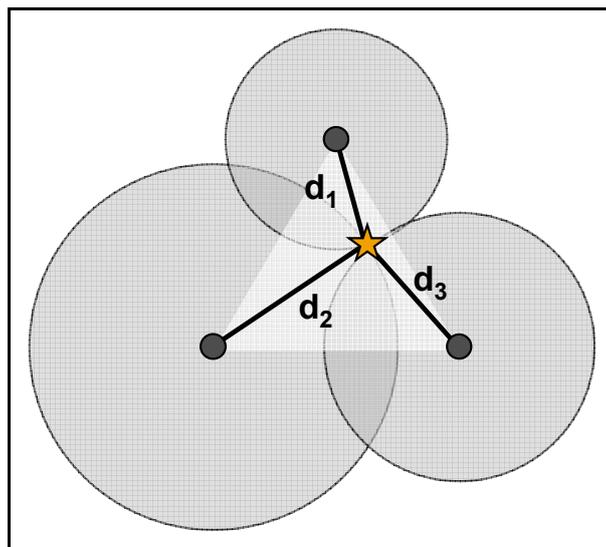
As técnicas de sensoriamento geralmente são classificadas em função da granularidade oferecida: por exemplo [12], as técnicas de sensoriamento podem ser divididas em técnicas de granularidade fina (*fine-grained localization*) e granularidade grossa (*coarse-grained localization*). Entretanto, esta classificação pode ser refinada: segundo [14], as três principais técnicas de sensoriamento para SLRs são: Triangulação, Proximidade e Análise de Cenário.

### **2.2.1. Triangulação**

O sensoriamento via triangulação [15] se baseia em propriedades geométricas e fórmulas matemáticas para a definição de pontos no espaço. O sensoriamento via triangulação pode ser subdividido em duas categorias: Lateração (*Lateration*) e Angulação.

#### **2.2.1.1. Lateração (*Lateration*)**

Usando lateração, a posição de um ponto é obtida usando as distâncias entre o ponto e outros pontos cuja posição é conhecida [15].



**Figura 1: Exemplo de triangulação.**

Para calcular a posição em um sistema de coordenadas bidimensional são necessários valores de distância de pelo menos 3 pontos não colineares (ver Figura 1). Para um sistema de coordenadas tridimensional são necessários pelo menos 4 valores de distância de pontos não co-planares.

Conhecimento complementar sobre as características do SLR pode reduzir a quantidade de valores necessários. Por exemplo, se os sensores sempre se encontram acima dos objetos a serem rastreados, é possível calcular as coordenadas tridimensionais usando apenas três valores de distância. Para obter os valores de distância, uma das três seguintes abordagens é usada:

- **Medida direta:** O valor da distância é obtido diretamente, através de ação ou movimento físico. Por exemplo, usando um braço robótico que se estica até tocar algo ou usando uma fita métrica;
- **Tempo de propagação (*Time-of-flight*):** O valor da distância é obtido medindo o tempo necessário para percorrer a distância entre dois pontos em uma velocidade conhecida. O cálculo deve levar em conta a velocidade relativa dos dois pontos. Geralmente, esta abordagem é usada com sinais de ultra-som ou de rádio frequência;
- **Atenuação do sinal (*Attenuation*):** A intensidade de um sinal diminui com a distância da origem. É possível estimar a distância entre dois pontos aplicando uma função que relacione a intensidade do sinal com a distância para os valores

da intensidade do sinal na origem e no destino. Por exemplo, sinais de rádio sofrem uma atenuação proporcional à  $(1/r^2)$  a uma distância  $r$  da origem.

Cada uma destas abordagens tem suas desvantagens. A medida direta, apesar de ser a maneira mais simples de obter os valores de distância, apresenta dificuldades de implementação inerentes ao uso de mecanismos físicos autônomos, além de não poder ser usada para grandes distâncias.

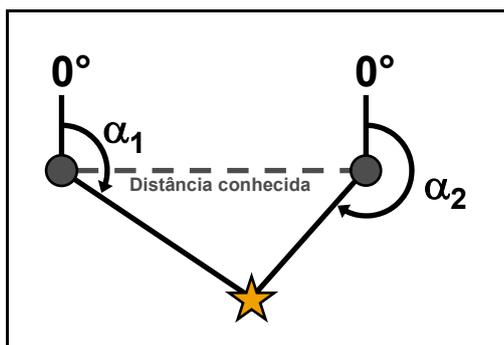
O uso de tempos de propagação possui limitações relacionadas, primeiramente, com a sincronização dos relógios [1]. Dado que muitas vezes o tempo de propagação é muito inferior ao tempo de processamento, é necessário que o emissor e o receptor estejam sincronizados com uma margem de erro significativamente inferior aos valores a serem medidos. Além disso, o sinal enviado geralmente sofre reflexões. Os reflexos do sinal original devem ser ignorados, pois não indicam o caminho mais curto (direto) entre emissor e receptor.

Apesar da atenuação de sinais estar primariamente relacionada com a distância, outros fatores também influenciam a intensidade medida em um ponto: reflexões, refrações e interferências construtivas ou destrutivas podem contribuir significativamente para o valor final da intensidade em um ponto.

O *Global Positioning System* (GPS) [8] é um exemplo de sistema baseado em lateração. Receptores GPS calculam sua posição baseando-se na informação recebida de uma rede de satélites em órbita geo-estacionária. O sistema usa o tempo de propagação dos sinais de rádio dos satélites até os receptores para fazer esse cálculo. Todos os satélites que constituem a infra-estrutura do GPS possuem relógios sincronizados, mantendo uma precisão temporal de  $\pm 1$  segundo em  $10^{13}$  segundos. Cada receptor resolve um sistema de quatro equações com quatro incógnitas (coordenadas espaciais  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e tempo de transmissão) usando os intervalos entre a recepção dos sinais de pelo menos quatro satélites.

### **2.2.1.2. Angulação**

O princípio matemático usado na angulação é muito semelhante ao usado na lateração. No lugar dos valores da distância são usados os ângulos entre pontos de referência e o ponto a ser posicionado [15].



**Figura 2: Exemplo de angulação.**

Para um sistema de coordenadas bidimensional são necessários dois ângulos e o valor da distância entre os pontos onde os ângulos foram medidos (ver Figura 2). Para um sistema de coordenadas tridimensional são necessários: o valor da distância entre os pontos de medição, um valor de azimute e duas medidas de ângulo.

O ângulo de recepção de um sinal pode ser calculado usando um arranjo de antenas conjugadas (*phased antenna arrays*). Este cálculo geralmente é feito comparando a diferença de tempo na recepção de várias antenas cuja disposição geométrica é conhecida.

Um exemplo desse tipo de sistema de posicionamento é o *VHF omni directional ranging* (VOR) [21]. O VOR é um sistema usado para a navegação de aeronaves. Cada estação-base emite dois sinais simultaneamente: um sinal é onidirecional, e contém um código que identifica a estação. O segundo sinal é direcional e varre o horizonte de maneira que os dois sinais estejam em fase quando orientados para o norte e com uma diferença de fase de 180 graus quando orientados para o sul.

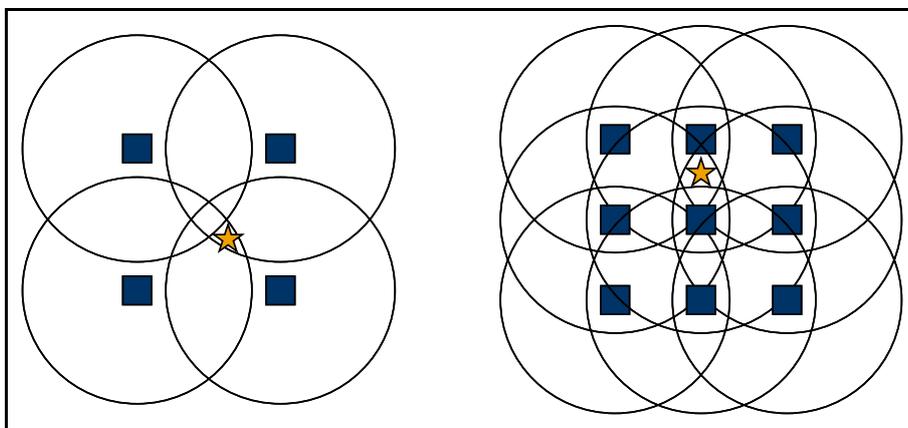
Receptores VOR calculam o seu ângulo em relação à estação base medindo essa diferença de fase. Com os dados de duas estações-base (diferença de fase e localização da estação) um receptor é capaz de calcular sua própria posição.

### **2.2.2. Proximidade**

A técnica de sensoriamento baseada em proximidade obtém a posição de um determinado objeto ou pessoa através da “detecção de proximidade” em relação a um ponto cuja localização é conhecida [13].

Esta técnica não fornece nenhuma informação direta sobre a localização do objeto: na verdade, a localização é derivada de dois dados conhecidos do sistema: 1) as dimensões

da área de cobertura de cada elemento da infra-estrutura e, 2) a localização de cada elemento.



**Figura 3: Detecção por proximidade com superposição de áreas de cobertura.**

A partir destas informações é possível deduzir a localização de um objeto por transitividade, pois se um elemento da infra-estrutura detecta a presença de um objeto (ou é detectado pelo mesmo), este se encontra na sua área de cobertura. A exatidão de tais sistemas depende apenas do tamanho das áreas de cobertura de cada elemento.

Para viabilizar a detecção por proximidade, são usados dispositivos que empregam fenômenos físicos cujo alcance é limitado. As três abordagens seguintes são as mais empregadas:

- **Detecção via contato físico** é o método mais simples de detecção de proximidade. Em geral implementada via botões, sensores de pressão e sensores de presença capacitivos. Esta técnica é muito usada na indústria em sistemas de produção automatizados;
- **Monitoramento de estações-base celulares** permite deduzir a região onde se encontra um dispositivo móvel a partir de estações-base que estão ao seu alcance. Um exemplo deste tipo de sistema é o *Active Badges*, descrito em mais detalhes no item 3.1;
- **Observação de sistemas automáticos de identificação** também pode ser usada para localizar pessoas. A partir de informações como históricos de acesso em computadores, transações bancárias ou compras com cartões de crédito, informações sobre a localização e a data podem ser deduzidas.

Para aumentar a exatidão de sistemas baseados em detecção de proximidade é necessário diminuir o tamanho das áreas de cobertura de cada elemento da infra-estrutura ou permitir que as áreas de cobertura de diferentes elementos causem diferentes zonas de sobreposição [12] (ver Figura 3). Com uma disposição adequada dos elementos da infra-estrutura é possível identificar “subáreas” caracterizadas por combinações únicas de elementos.

Geralmente sistemas baseados em detecção de proximidade que não oferecem suporte à identificação dos objetos detectados devem ser complementados com sistemas auxiliares que forneçam esta funcionalidade.

### 2.2.3. Análise de Cenário

Sistemas de localização através de análise de cenário se baseiam na análise de características de dados capturados do ambiente [14]. A análise de cenário pode fornecer informações tanto sobre os objetos observados (caso a posição do observador seja conhecida) como sobre a localização do observador (caso os dados obtidos indiquem a presença de pontos de referência cuja posição é conhecida). A análise pode ser:

- **Estática:** as características medidas do ambiente são mapeadas em posições usando um conjunto predefinido de pontos de referência;
- **Diferencial:** as características são comparadas a cada nova medida e as diferenças entre os valores obtidos são usadas para calcular a posição.

Sistemas baseados em análise de cenário possuem uma característica que os distinguem das técnicas de sensoriamento anteriores: a análise é feita diretamente a partir dos dados obtidos, sem tentar passar por uma conversão geométrica ou matemática.

A desvantagem de usar um sistema baseado em análise de cenário é a sua inerente dependência dos dados obtidos a partir do ambiente. Ou seja, o sistema precisa ser “calibrado” para um determinado ambiente. Além disso, caso o ambiente venha a sofrer mudanças que influenciem significativamente as características utilizadas pelo sistema, o conjunto de dados usados como pontos de referência deverá ser corrigido ou até completamente substituído.

Os dados usados para fazer a análise podem ser simplesmente imagens capturadas por câmeras embarcadas ou fixas, ou qualquer outra grandeza que possa ser medida, como

por exemplo, as características eletro-magnéticas da recepção de um sinal em uma determinada posição.

Como exemplos de sistema baseado em análise de cenário usando as características de propagação de sinais de rádios podemos citar o RADAR (ver item 3.2), apresentado pelo grupo *Microsoft Research* e o *MoteTrack* (ver item 3.4), desenvolvido na Universidade de Harvard.

#### **2.2.4. Considerações Sobre as Técnicas de Sensoriamento**

A classificação escolhida para a categorização das técnicas de sensoriamento cobre as três possíveis abordagens de conversão de dados de sensores em informações de localização.

A técnica de sensoriamento por triangulação se baseia em propriedades matemáticas: usando diversos fenômenos físicos e as equações baseadas nos mesmos, é possível converter os dados dos sensores em ângulos ou distâncias que podem ser processados para calcular a localização.

A técnica de sensoriamento por análise de cenário se baseia nos mesmos princípios físicos usados pela triangulação. Entretanto, a análise de cenário é uma técnica empírica, pois não se faz uso das equações matemáticas que regem os fenômenos observados. O que interessa são apenas as características observadas (ou valores medidos) em certos lugares ou em certas circunstâncias.

O sensoriamento por proximidade difere das outras técnicas por ser um processo discreto: usando esta técnica é possível apenas afirmar se um objeto se encontra ou não na área de cobertura de um elemento da infra-estrutura. Obviamente, o uso de dispositivos que possuem áreas de cobertura pequenas permite obter resultados bastante razoáveis.

Geralmente a escolha do tipo de técnica de sensoriamento depende da aplicação à qual o SLR está destinado. Por exemplo, muitos sistemas são baseados em proximidade por serem a alternativa mais barata, pois os dispositivos necessários para a sua implementação são mais simples.

Sistemas baseados em triangulação oferecem a maior adaptabilidade a condições mutáveis do ambiente. Esta técnica é normalmente escolhida para sistemas usados ao ar

livre [12], mas devido às interferências que existem naturalmente em todos os fenômenos físicos, tais sistemas são limitados por sua capacidade de resistir a estas interferências.

Sistemas baseados em análise de cenário são um compromisso entre a simplicidade de sistemas baseados em proximidade e a flexibilidade de sistemas baseados em triangulação. Nestes sistemas os dados dos fenômenos físicos são catalogados em pontos de referência que podem ser usados como elementos de infra-estrutura em um sistema baseado em proximidade. A desvantagem de tais sistemas está na sua falta de adaptabilidade, pois precisa ser calibrado antes de cada mudança de ambiente.

### **2.3. Coordenadas Físicas ou Simbólicas**

SLRs podem ser divididos em sistemas que usam coordenadas físicas ou locações simbólicas [15]. Coordenadas físicas são informações que podem ser mapeadas para uma posição física absoluta, tais como as informações retornadas por um receptor GPS (latitude, longitude e altitude).

Locações simbólicas são informações que indicam o contexto de um objeto [18]: para um SLR baseado em locações simbólicas (como o *Active Badges* – ver item 3.1) a posição atual de um objeto é “sala 302”, “prédio 16”, ou “perto da área de desembarque”.

Sistemas que usam coordenadas físicas podem ser adaptados para retornar informação simbólica. Para isso, precisam de um banco de dados que faça o mapeamento de coordenadas físicas para locações simbólicas. Esta informação pode então ser usada para a implementação de serviços baseados em contexto (“imprimir na impressora mais próxima”).

Obviamente, a exatidão de tais sistemas influencia sua capacidade de mapeamento, dado que, por exemplo, um sistema cuja granularidade é 10 metros terá dificuldades em traduzir coordenadas físicas em locações simbólicas que sejam menores do que 10 metros.

Infelizmente, dado que a granularidade de sistemas baseados em locações simbólicas é geralmente larga, a conversão de um sistema baseado simplesmente em locações simbólicas para coordenadas físicas é bastante complexa, pois a granularidade deste tipo de conversão depende da densidade de informação obtida a partir dos sensores de localização simbólica. Para aumentar a exatidão deste tipo de conversão geralmente são usados vários sensores com áreas de cobertura sobrepostas.

## 2.4. Coordenadas Absolutas ou Relativas

Sistemas que usam coordenadas físicas podem ser subdivididos em sistemas que usam coordenadas absolutas e sistemas que usam coordenadas relativas [13]. Sistemas baseados em coordenadas absolutas possuem um referencial compartilhado por todas as entidades: as coordenadas obtidas a partir de um receptor GPS são projetadas sobre um referencial que cobre toda a superfície da Terra e podem ser reproduzidas por qualquer receptor GPS que seja colocado no mesmo lugar.

Sistemas baseados em coordenadas relativas possuem seu próprio referencial. Estas coordenadas indicam a posição de objetos em relação a um ponto de origem definido pelo sistema, geralmente o próprio receptor. Por exemplo, sistemas de radar apresentam as coordenadas (radial, azimute) de outros objetos em função da posição do receptor.

Coordenadas absolutas podem ser convertidas em coordenadas relativas desde que se conheçam as coordenadas absolutas do novo ponto de referência e vice-versa. Esta conversão pode ser mais complexa caso o ponto de referência esteja em movimento.

Resumindo, a distinção entre sistemas de coordenadas absolutas e relativas é mais uma diferenciação sobre o funcionamento do sistema do que sobre a capacidade tecnológica do mesmo.

## 2.5. Distribuição do Esforço Computacional

O cálculo da posição de um objeto pode ser efetuado de duas maneiras [14]:

- **Cada dispositivo calcula sua própria posição**, usando informações obtidas da infra-estrutura. Por exemplo, a infra-estrutura pode ser constituída de “balizas” (*beacons*) que transmitem continuamente ou periodicamente sinais, tais como os satélites do GPS. Esta modalidade de distribuição do esforço computacional também é chamada de *passive mobile device* [23], pois o dispositivo móvel apenas recebe mensagens;
- **A infra-estrutura calcula a posição do objeto**, usando informações recebidas do objeto. Por exemplo, cada *Active Badge* (ver item 3.1) emite periodicamente um sinal que o identifica unicamente e uma rede de sensores processa este sinal para obter a localização de um determinado *badge*. Esta modalidade também é

chamada de *active mobile device* [23], pois o dispositivo móvel participa de maneira ativa, enviando mensagens.

Sistemas que colocam o esforço computacional no dispositivo permitem a implementação de soluções que respeitam a privacidade dos usuários, pois a posição atual de um dispositivo será conhecida por outras entidades apenas se o mesmo divulgar esta informação.

Por outro lado, sistemas onde o esforço computacional é fornecido pela infraestrutura permitem o uso de dispositivos que são mais simples, mais baratos e portanto com uma gama de possibilidades muito mais vasta.

## **2.6. Escalabilidade**

A escalabilidade de um SLR depende da tecnologia usada e dos algoritmos implementados. A escalabilidade é definida por duas grandezas complementares [15]:

- **Área coberta por unidade de infra-estrutura**, ou seja, uma estimativa da capacidade do sistema de ampliar a área de cobertura e dos custos de implementação de tal expansão.
- **Objetos localizáveis por unidade de infra-estrutura e intervalo de tempo**, ou seja, uma estimativa da capacidade do sistema de suportar o aumento de objetos ao alcance da infra-estrutura e da largura de banda disponível para o sensoriamento.

Por exemplo, o GPS permite a localização de um número ilimitado de objetos simultaneamente em toda a superfície do planeta. Para isso, são usados apenas 24 satélites com três *backups* redundantes. Por outro lado, alguns SLRs baseados em proximidade são incapazes de distinguir dois objetos que estejam ao seu alcance simultaneamente.

A largura de banda é um problema principalmente para SLRs baseados em sinais de rádio frequência, pois a tecnologia de comunicação usada por estes sistemas permite apenas um certo número de mensagens por unidade tempo. Se o tráfego entre dispositivos e infra-estrutura ultrapassa o limite do canal de rádio utilizado, o sistema pode, por exemplo, reduzir a frequência das mensagens entre dispositivos e infra-estrutura, ou reter as mensagens em uma fila de envio.

Caso a frequência das mensagens seja reduzida, temos uma redução da precisão, pois o aumento intervalo entre atualizações aumenta a área que o dispositivo pode ter se deslocado entre atualizações. Caso as mensagens sejam enfileiradas antes do envio, temos uma redução na exatidão, pois a atualização mais recente pode ter sido atrasada, de maneira a não refletir corretamente a posição atual do dispositivo.

Finalmente, o problema da escalabilidade pode ser parcialmente resolvido com o aumento da infra-estrutura. Por exemplo, um sistema que permite apenas a localização dentro de um prédio pode ser reproduzido em um outro prédio e ambos os sistemas podem ser interligados usando alguma solução de software que unifique os dados.

## **2.7. Capacidade de Identificação**

Alguns SLRs permitem a identificação dos objetos localizados [13]. A partir da identidade dos objetos é possível tomar decisões e atuar de maneira personalizada em função da localização e da identidade do dispositivo.

Os recursos tecnológicos de identificação variam muito entre os sistemas atualmente disponíveis: enquanto sistemas mais simples são capazes de identificar cores, contornos ou códigos de barra, sistemas mais avançados são capazes de identificar pessoas ou objetos com alta confiabilidade.

A técnica mais simples para identificação se baseia na atribuição de identificadores únicos para cada objeto (*globally unique ID* – GUID). A partir do momento que o sistema consegue obter o GUID de um objeto, este pode consultar um banco de dados para obter informações complementares sobre o objeto detectado.

A associação entre GUID e informação pode também ser usada de maneira “invertida”: a infra-estrutura pode fornecer identificadores únicos que podem ser usados por dispositivos para obter informação contextual, associada a um lugar ou intervalo de tempo específico.

## **2.8. Custo**

O custo de um SLRs pode ser dividido em diferentes categorias [14]:

- **Custo de instalação**, que incluem custos de aquisição e instalação física dos componentes infra-estrutura, ou ainda o esforço necessário para a configuração dos mesmos.

- **Custo de manutenção**, que incluem custos referentes à manutenção e esforço administrativo para manter a infra-estrutura funcionando corretamente.
- **Custo de expansão**, que incluem custos para a aquisição de material ou dispositivos necessários para a introdução de novos objetos que possam ser localizados pelo sistema.

No caso do GPS podemos ver que, apesar dos custos de instalação e manutenção serem altíssimos (pois envolvem a fabricação e lançamento periódicos de satélites artificiais), os custos de expansão é relativamente inexistente (pois o custo da cada receptor GPS é mínimo).

## **2.9. Limitações Diversas**

Finalmente, podemos separar e classificar SLRs em função de suas limitações [15]. Estas limitações em geral são relativas à tecnologia usada para a implementação do SLR, podendo, portanto ser atenuadas ou até eliminadas com o aprimoramento das tecnologias usadas.

Uma limitação bastante conhecida do GPS é sua incapacidade de funcionar corretamente em ambientes fechados. Para contornar essa limitação é possível usar repetidores que retransmitem o sinal recebido dos satélites para o ambiente fechado. Outros tipos de limitação envolvem frequências de transmissão disponíveis, largura de banda de canais de comunicação, ou até características dos sensores.

## **2.10. Conclusões do Capítulo**

Neste capítulo apresentamos uma taxonomia para a categorização de sistemas de localização e rastreamento. Apesar de não ser a única taxonomia disponível, esta é a que está ganhando a maior aceitação em publicações recentes na área.

O foco deste sistema de classificação é a independência da tecnologia usada: características como a técnica de sensoriamento, o tipo de coordenadas usadas, e a escalabilidade passam a ser critérios mais importantes do que a tecnologia ou o algoritmo usado. De fato, a principal diferença entre este sistema de classificação e outros é a sua coerência e abrangência. Graças a estas características, este sistema de classificação é imune à evolução natural das tecnologias empregadas em SLRs.

## Capítulo 3: Sistemas de Localização e Rastreamento

O campo de estudo de sistemas de localização e rastreamento é vasto, pois aos esforços acadêmicos se adicionam os sistemas comerciais, que muitas vezes inovam em áreas que não são de interesse para a pesquisa teórica. Existem, literalmente, centenas de sistemas de localização e rastreamento, comerciais ou acadêmicos, e baseados nas mais diferentes tecnologias. Estes sistemas podem ser rapidamente classificados pela técnica de sensoriamento empregada:

- **Sistemas baseados em proximidade** geralmente empregam sinais de infravermelho, raios laser ou ainda simples detectores de presença. Ou seja, qualquer tecnologia que ofereça um método de detecção de alcance limitado, conhecido e confiável;
- **Sistemas baseados em triangulação** fazem uso de sinais de rádio frequência, ultra-sons, ou combinações destes. O mais importante é que os fenômenos físicos empregados se comportem de maneira condizente com as equações matemáticas conhecidas, ou seja, que não existam interferências externas significativas;
- **Sistemas baseados em análise de cenário** podem fazer uso de imagens capturadas em tempo real, sinais de rádio frequência ou ainda outros fenômenos físicos que possam ser medidos a fim de obter valores de referência para determinadas posições.

Para evitar uma enumeração desnecessária de todos os SLRs disponíveis, serão apresentados apenas os sistemas mais relevantes para o escopo deste trabalho. Os sistemas apresentados nos itens a seguir apresentam características e soluções que formaram a base teórica e prática para a solução dos problemas levantados neste trabalho.

### 3.1. *Active Badges*

O sistema *Active Badges* foi apresentado pela primeira vez em 1992 [2] e tem por objetivo rastrear pessoas dentro de um ambiente fechado (*indoor tracking*). O trabalho foi publicado em uma época na qual as alternativas existentes para este tipo de rastreamento eram bastante limitadas. Mais especificamente, os *Active Badges* foram inicialmente propostos para facilitar a localização de pessoas dentro de um hospital (doutores, enfermeiras, assistentes, etc).



**Figura 4: Exemplo de *Active Badge*.**

A solução convencional para este cenário eram *paggers* que permitem o envio de mensagens de texto (normalmente um número de telefone a ser chamado), acompanhadas de um aviso sonoro para alertar o portador do *pager*. A principal limitação de tal sistema, segundo os autores do trabalho, é óbvia: não é possível obter automaticamente a localização do usuário pois se trata apenas de um sistema de difusão de mensagens. Ou seja, no caso de uma emergência em um hospital, não é possível avisar apenas as pessoas que se encontram mais próximas de um problema – todos os médicos devem ser avisados ou algum deve ser escolhido arbitrariamente.

Outra solução disponível na época eram crachás que servem como cartões de acesso. Muitas vezes utilizados em instalações de alta-segurança (bases militares, centros de pesquisa, etc), estes cartões permitem saber em que zona uma pessoa se encontra através do uso de pontos de controle de acesso. Para isso, basta acompanhar os registros de entrada e saída de cada zona. Por outro lado, a localização pode falhar caso um cartão possa ser

usado por diversas pessoas (por exemplo, quando uma pessoa “abre a porta” para várias outras).

Para evitar os problemas existentes nos sistemas então disponíveis, foi criado um novo tipo de “crachá” (*badge*): o *Active Badge* (ver Figura 4). Estes crachás possuem uma característica inovadora em relação aos outros sistemas: cada crachá funciona como um *beacon*, ou seja, transmite um sinal que contém um código identificador único durante um décimo de segundo a cada 15 segundos. Este código é recebido por uma rede de sensores espalhados pelo ambiente. Uma “estação-mestra” fica conectada à rede de sensores e periodicamente atualiza a localização de cada crachá de acordo com os dados de cada sensor.

A lista com as localizações de todos os crachás é disponibilizada através de uma interface gráfica. A interface gráfica criada inicialmente tinha por objetivo auxiliar a recepcionista para encaminhar chamadas telefônicas usando a informação de localização. A informação era apresentada usando uma porcentagem para indicar a probabilidade de uma pessoa se encontrar em um determinado local. Esta porcentagem era calculada usando as seguintes regras:

- Caso o crachá (e, portanto, o portador do mesmo) mantivesse a mesma posição por mais de 5 minutos, a probabilidade era de 100%;
- Caso o crachá estivesse em movimento, a probabilidade era distribuída entre as diferentes localizações que detectaram a presença do mesmo;
- O sistema mantém a última localização conhecida caso o crachá não tenha sido detectado por mais de 5 minutos, pois ainda é bastante provável que outras pessoas naquela localização consigam fornecer alguma informação mais atualizada;
- Caso a última localização tenha sido feita a mais de 24 horas, o sistema passa apenas a indicar o dia no qual a última localização foi feita.
- Caso algum crachá não tenha sido detectado por mais de alguns dias, o sistema muda o estado para “não disponível” (*AWAY*).

Além disso, a interface permite executar uma série de comandos sobre os dados do sistema:

- **FIND (name)** permite obter a localização mais recente de um crachá em particular, assim como um pequeno histórico de todos os lugares visitados nos últimos 5 minutos e as probabilidades associadas;
- **WITH (name)** permite listar todos os crachás que se encontram na proximidade de um determinado crachá;
- **LOOK (location)** retorna a lista de todos os crachás que se encontram em um determinado lugar;
- **NOTIFY (name)** envia um pedido de notificação sonora para o crachá especificado.
- **HISTORY (name)** lista um histórico contendo os lugares visitados durante a última hora.

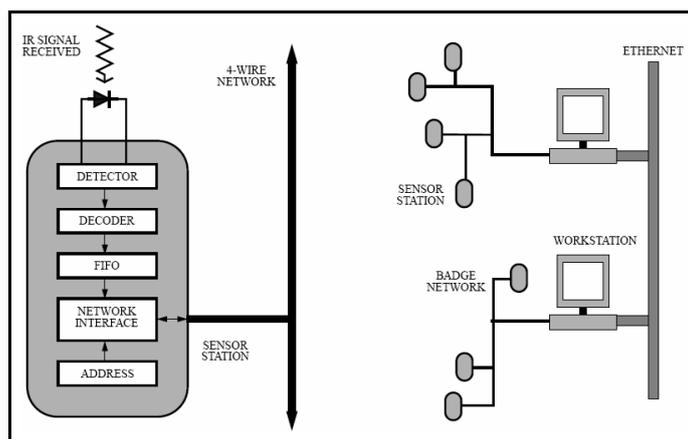
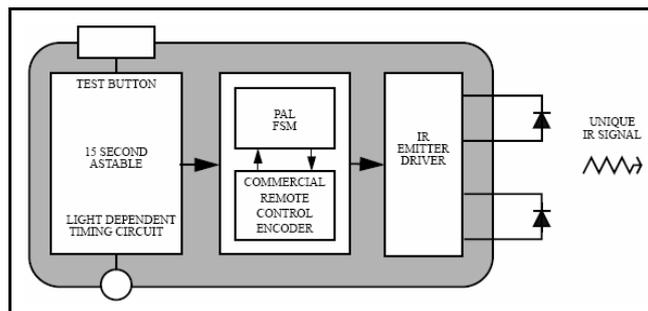


Figura 5: Infra-estrutura do sistema *Active Badges*<sup>1</sup>.

A infra-estrutura do sistema é organizada da seguinte maneira (ver Figura 5): vários sensores são conectados via uma rede simples de cabos seriais (padrão RS-232) à uma *Workstation*. Várias *Workstation* são conectadas via sistemas tradicionais de comunicação de rede (geralmente redes Ethernet) com a estação-mestra.

<sup>1</sup> Imagem obtida de [2].



**Figura 6: Diagrama funcional de um *Active Badge*<sup>2</sup>.**

A tecnologia usada para a comunicação entre o crachá e os sensores é modulação de largura de pulso em infravermelho (*pulse-width modulated infrared* – IR – ver Figura 6). Entre as razões pela escolha de tal tecnologia, são citadas:

- O tamanho reduzido e baixo custo de emissores e receptores IR;
- O alcance de tais receptores é adequado ao uso em ambientes fechados (prédios de escritórios, hospitais, etc);
- O sinal de IR não se propaga através de paredes e outras divisórias, portanto reduzindo a possibilidade de causar interferência com outros dispositivos.

Para poder enviar um sinal periodicamente, os crachás possuem uma bateria que fornece a energia para seu funcionamento. Estima-se que a autonomia de um crachá é de um ano se o intervalo entre atualizações for de pelo menos 15 segundos. Apesar dos crachás não serem capazes de evitar a colisão dos sinais de IR, a probabilidade de uma colisão ocorrer é baixa devido à baixa tolerância de fabricação dos componentes do crachá. Com uma tolerância de 10% nos capacitores usados, calcula-se que a probabilidade de haver colisões é inferior a 1,33%.

Os crachás também possuem um sensor de luminosidade, que é usado para mudar dinamicamente a frequência do sinal. Caso o crachá se encontre em um lugar escuro (por exemplo, dentro de uma gaveta), a frequência do sinal diminui. Quando o crachá volta para um ambiente com luminosidade normal, a frequência volta ao seu valor normal. Este procedimento permite obter uma autonomia maior, pois evita o uso desnecessário das baterias.

<sup>2</sup> Imagem obtida de [2].

Usando este sistema a melhor estimativa de localização só pode ser feita com intervalos de 15 segundos. Segundo os autores, como seres humanos se movem relativamente devagar em ambientes fechados, a exatidão do sistema é alta.

O sistema depende, basicamente, da existência de um “caminho ótico” (*optical path*) ou linha de visão (*line of sight* – LOS) entre o emissor (crachá) e o receptor (sensores). Este caminho ótico pode conter reflexões ou difrações. Para aumentar as chances de existir um caminho ótico, recomenda-se que os sensores sejam instalados no alto das paredes ou mesmo no teto dos escritórios, corredores e outras áreas públicas. Além disso, os usuários devem usar seus crachás de maneira a não prejudicar a propagação do sinal ótico. Por isso, os crachás devem ser usados por cima da roupa. Preferencialmente, devem ser usados fixados ao bolso da camisa, mas mesmo presos à cintura funcionam de maneira adequada.

O maior problema para a implementação desse sistema não foram os problemas técnicos e sim a aceitação do mesmo pelos usuários finais: a idéia de um rastreamento contínuo causa repúdio na maior parte dos usuários, pois muitos associam a idéia de rastreamento à invasão de privacidade e à perda da liberdade individual.

Por outro lado, na instalação de teste feita na Universidade de Cambridge, os usuários que possuem e usam seus crachás diariamente pedem que a área coberta pelos sensores seja expandida, pois cada usuário que possui um crachá pode, por exemplo, receber todas suas chamadas importantes automaticamente: o PABX da Universidade está conectado ao sistema e faz o encaminhamento automático baseando-se na localização do usuário.

### **3.2. RADAR**

O sistema RADAR ([7], [10] e [11]) foi desenvolvido nos laboratórios de pesquisa da Microsoft e foi apresentado em 1999. O objetivo principal do sistema é usar redes de transmissão de dados sem fio IEEE 802.11 para obter a posição dos dispositivos, e, portanto, a posição dos usuários destes dispositivos. Para isso, é usada a informação de potência do sinal (*signal strength*) para triangular a posição do dispositivo.

A escolha foi feita após um estudo comparativo de outras tecnologias de localização para ambientes internos: segundo os resultados apresentados no trabalho, os outros sistemas não possuem vantagens significativas sobre um sistema baseado em medidas de potência do sinal recebido. Mais especificamente, apesar dos sistemas baseados em outras

tecnologias (como por exemplo, ultra-som ou combinações de ultra-som e sinais de rádio frequência) oferecerem maior exatidão, em geral são muito mais caros ou de instalação muito mais complexa.

O sistema apresentado, por outro lado, se baseia em tecnologia já disponível e bastante difundida (ou seja, cujo custo tende a diminuir). A proposta é adicionar valor ao recurso que já está disponível em quase toda empresa. A principal vantagem deste sistema é este ser adaptado às condições de uso em um ambiente fechado, ao contrário do GPS, que normalmente só pode ser usado em espaços abertos.

Foram testada duas técnicas de cálculo da posição do usuário usando os valores de potência do sinal: primeiramente foi criado um “mapa” que associa valores de potência de sinal à posição do usuário (Análise de Cenário – ver item 2.2.3) e depois foi modelada a perda de potência na propagação do sinal usando um modelo tridimensional do ambiente (Triangulação – ver item 2.2.1).

Um protótipo do sistema foi implementado usando computadores de mesa no papel de estações-base e *laptops* como dispositivos móveis a serem localizados. O *software* utilizado foi customizado para permitir a leitura dos valores de potência de sinal e de relação sinal-ruído a partir das placas de rede sem fio. Entre os resultados obtidos, são salientados:

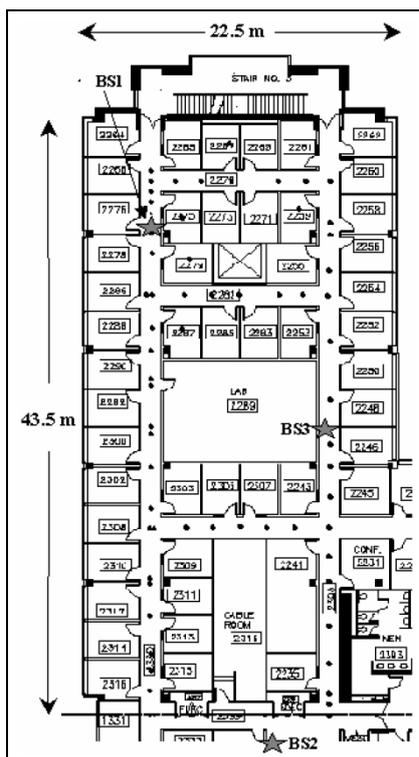
- A correlação entre potência do sinal e posição é melhor do que a correlação entre relação sinal-ruído e posição;
- O valor medido para perda de potência do sinal é simétrico, e tanto faz medi-lo na estação-base como no dispositivo móvel.

A primeira técnica é executada em duas etapas: uma etapa dita “*off-line*”, na qual os valores de potência de sinal são medidos em diversos pontos do ambiente; e uma etapa “*on-line*”, onde os valores medidos previamente são comparados com os valores medidos em tempo real para estimar a localização do usuário.

O algoritmo usado para obter o melhor mapeamento entre valores de potência de sinal e a localização é o *nearest neighbor in signal space* (NNSS). Este algoritmo escolhe o

ponto que minimiza a distância Euclidiana<sup>3</sup> (no domínio da potência de sinal) entre os valores de potência medidos e os valores medidos na etapa *off-line*.

A segunda técnica usa equações matemáticas que modelam a perda de potência de um sinal eletromagnético em função da distância e de outros obstáculos. Cada parede, divisória e móvel introduz um coeficiente de atenuação na equação. Partindo do valor de potência de sinal medido, podemos então calcular a distância da origem do sinal.

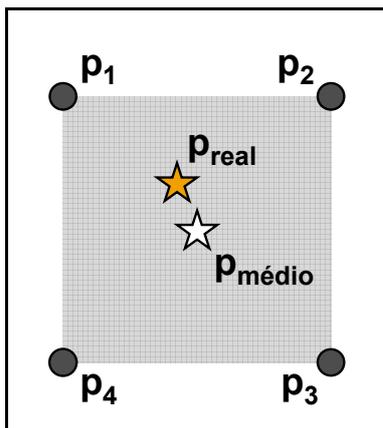


**Figura 7: Área de teste usada para o sistema RADAR.**

A área de teste usada foi um andar (ver Figura 7) de um dos prédios da Microsoft Research, que tem uma área de 980 m<sup>2</sup> e mais de 50 peças (escritórios e salas de reunião). Para testar a primeira técnica, foram feitas 20 amostras para cada orientação (norte, sul, leste, oeste) em 70 lugares diferentes. Usando essa grande quantidade de medidas, eles obtêm exatidões de aproximadamente 2.0, 3.0 e 4.7 metros em respectivamente 25, 50 e 75% dos casos.

<sup>3</sup> A distância Euclidiana entre dois pontos  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  e  $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  é definida como

$$\sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2} \text{ ou ainda } \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$



**Figura 8: Estimando a localização usando a média de 4 pontos.**

Para tentar melhorar os resultados, foi feita uma média de  $k$  pontos mais próximos, ao invés de tomar apenas o ponto mais próximo (ver Figura 8). Com um valor de  $k=5$ , foi possível aumentar a exatidão para 1.5 metros em 25% dos casos e para 2.75 metros para 50% dos casos. O uso de valores cada vez maiores de  $k$  é problemático, pois pode até corromper o resultado ao usar pontos que não estejam mais suficientemente próximos dos valores medidos.

Finalmente, o conjunto de valores medidos foi reduzido de maneira a manter apenas um valor de potência para localização (descartando os valores para diferentes orientações). Isto permitiu simular o comportamento do sistema sem a atenuação causada pelo corpo humano. Neste caso, a exatidão do sistema aumenta para 1.8 e 2.7 metros para 25% e 50% dos casos, respectivamente.

Ao aplicar a média de  $k$  pontos neste novo caso, o sistema passa a ter uma exatidão de 1.0 e 2.1 metros para 25 e 50% dos casos, respectivamente. Esta melhoria significativa se deve ao fato que a média das coordenadas dos  $k$  melhores pontos leva em conta pontos que são fisicamente distintos, ao contrário do conjunto completo que podia calcular a média dos valores para as quatro orientações do mesmo ponto.

O número de pontos de referência influencia a exatidão do sistema de maneira assintótica. Os resultados indicam que a partir de uma certa densidade de pontos de referência por unidade de área o aumento na exatidão passa a ser praticamente insignificante: mais especificamente, para a área de teste usada, apenas 40 pontos (escolhidos aleatoriamente) teriam uma exatidão praticamente igual aos 70 pontos coletados. Supõe-se que o valor poderia ser ainda menor se os pontos fossem distribuídos uniformemente ao invés de escolhidos aleatoriamente.

O número de medidas feitas na etapa *on-line* também contribui para a exatidão do sistema. Uma queda de 30% da exatidão pode ser observada quando apenas uma medida é feita (se comparada com um conjunto de 20 medidas). Se duas medidas são feitas, a queda é de apenas 11%. Com três medidas, a exatidão é apenas 4% pior. Do ponto de vista matemático, a média de várias medidas filtra flutuações rápidas causadas por fatores externos (como, por exemplo, pessoas se movimentando). Entretanto, a média pode causar problemas quando o sistema é usado para rastreamento de dispositivos, pois as mudanças causadas pelo deslocamento são atenuadas pela média.

Para compensar essa atenuação causada pela média, os autores implementam uma média baseada em uma janela deslizante (*sliding window*), que contém os 10 últimos valores de potência de sinal medidos. Graças a essa modificação o rastreamento de um dispositivo permite uma exatidão de 3.5 metros em 50% dos casos, ou seja, apenas 19% pior que um dispositivo estacionário.

Para testar a segunda técnica foi criado um modelo de propagação de sinais de rádio frequência na área de teste. Para isso, foi avaliada uma série de modelos e o escolhido foi o “*Floor/Wall Attenuation Factor*” (FWAF). O modelo final foi ajustado usando coeficientes determinados empiricamente para paredes, pisos e móveis.

A segunda técnica permite apenas uma exatidão de 4.3 metros em 50% dos casos. Ou seja, a exatidão desta técnica é muito pior do que a da primeira técnica. Por outro lado, é uma técnica muito mais fácil de implementar, pois é necessário apenas fazer um modelo relativamente simples do ambiente (paredes, móveis) e ajustá-lo com coeficientes obtidos empiricamente. Além disso, os autores afirmam que a segunda técnica é mais “portável”, dado que o sistema como um todo poderia ser transferido para outro lugar apenas recalibrando alguns valores no modelo.

### **3.3. SpotON**

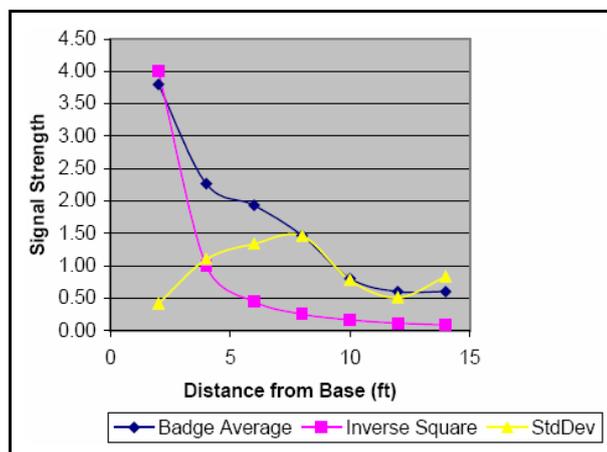
O SpotON [9] foi apresentado no final do ano 2000. O objetivo do SpotON é implementar um sistema baseado em triangulação com um custo inferior às propostas existentes na época, mas com exatidão superior aos mesmos.



**Figura 9: Exemplo de dispositivo usado no SpotON.**

Para reduzir os custos do sistema, foram empregados dispositivos dedicados para o SLR. Ou seja, ao invés de reaproveitar os sinais de uma rede sem fio, como no caso do RADAR, foram usados dispositivos especificamente construídos e calibrados para o sensoriamento da distância.

De maneira geral, a arquitetura do SpotON é bastante semelhante aos sistemas que empregam a mesma técnica apresentados anteriormente. Cada dispositivo a ser rastreado emite um sinal periódico que o identifica unicamente. A infra-estrutura mede a potência do sinal do dispositivo e tenta inferir a posição do mesmo usando os dados de diferentes sensores.



**Figura 10: Gráfico da potência de sinal em função da distância para o SpotON.**

Foram comparados dois tipos de *hardware* para o sensoriamento: no primeiro protótipo do sistema foram usados dispositivos “prontos” (ver Figura 9), e no segundo protótipo foram usados dispositivos fabricados pelos autores especificamente para o sensoriamento.

Usando o primeiro protótipo foi levantada uma curva de potência do sinal em função da distância (ver Figura 10). Esta curva confirmou que existe uma forte correlação entre a distância e a atenuação da potência do sinal. Além disso, foi observado que a curva é bastante semelhante à curva teórica de atenuação proporcional ao inverso do quadrado da distância.

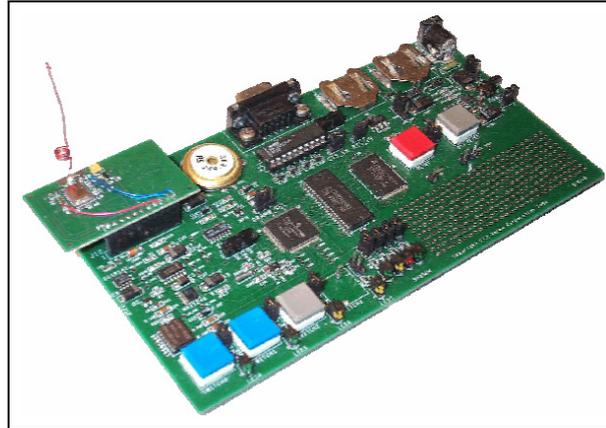
A partir destes resultados foram ajustados os parâmetros de uma função polinomial de segundo grau aos dados obtidos. A função obtida a partir do ajuste é então resolvida para obter a distância a partir do valor da potência do sinal. O algoritmo usado para obter a posição do dispositivo funciona de maneira iterativa:

- A partir de uma posição dada, calcular vetores de estimativa de erro em todas as direções;
- Escolher o vetor cuja estimativa de erro é menor, e atualizar a posição atual usando o vetor escolhido.

Este tipo de algoritmo é chamado pelos autores de “*hill-climbing*”.

A exatidão obtida experimentalmente não foi melhor do que 3 metros. Este resultado é devido à baixa resolução do conversor analógico-digital usado para medir a potência do sinal. De fato, o protótipo fazia a conversão das medidas de potência de sinal usando apenas dois *bits*. Dada a baixa exatidão das medidas usadas, o sistema não oferece melhores resultados do que um sistema simplesmente baseado em sensores de movimento tradicionais, apesar de ser capaz de identificar unicamente cada dispositivo ao seu alcance.

Um outro problema observado com o *hardware* usado é o intervalo entre medições consecutivas: mesmo acessando todos os elementos da infra-estrutura simultaneamente, são necessários de 10 a 20 segundos para obter o conjunto de valores necessários para o cálculo da localização. Este longo intervalo entre atualizações torna o sistema inadequado para o rastreamento.



**Figura 11: Protótipo de *hardware* customizado para o sistema SpotON.**

Para remediar estas limitações um segundo protótipo foi construído, usando desta vez *hardware* especificamente adaptado para a medida da potência de sinal. Ou seja, foi construído um dispositivo capaz de medir os valores de potência de sinal com uma resolução muito melhor: mais especificamente, o novo *hardware* usa 10 *bits* de resolução para a conversão analógico-digital (ver Figura 11).

Com este novo *hardware*, desenvolvido especificamente para permitir medidas mais precisas dos valores de potência do sinal, seria possível ter uma exatidão inferior a um metro na localização dos dispositivos. Infelizmente, o artigo não chega a demonstrar dados de experimentos que confirmem essa hipótese.

### **3.4. MoteTrack**

O sistema MoteTrack [24] foi apresentado em 2004 pela Universidade de Harvard. O MoteTrack é um sistema semelhante ao RADAR, pois se baseia em pontos de referência com valores medidos em uma fase dita “*off-line*” que são usados durante a fase “*on-line*” para calcular a localização de um dispositivo.

Entretanto, os objetivos do MoteTrack são diferentes do RADAR: Sua principal motivação é a implementação de um SLR “robusto”. Os autores visavam à criação de um SLR que pudesse ser usado mesmo em caso de acidentes ou catástrofes, como, por exemplo, durante incêndios. A robustez do sistema é garantida pelas seguintes características do sistema:

- **Degradação progressiva da exatidão** em função do número de elementos da infra-estrutura ainda disponíveis;
- **Suporte à informação incompleta** no cálculo da localização;

- **Tolerância a variações nos valores medidos**, causados principalmente por variações ambientais imprevisíveis;
- **Computação robusta da localização**, levando em conta possíveis falhas de *software*, *hardware* e infra-estrutura de comunicação.

Para garantir estas características, os autores sugerem que seja usada uma arquitetura completamente descentralizada, onde dispositivos autônomos seriam capazes de calcular sua própria localização. Ou seja, ao invés de possuir um servidor central que coleta e organiza toda a informação (como no caso dos *Active Badges* – ver item 3.1), cada elemento da infra-estrutura é programável e provê parte da informação necessária para a localização de um dispositivo.

Para isso, cada dispositivo no MoteTrack é capaz de identificar sua própria posição usando a informação transmitida pela infra-estrutura. Portanto, ao contrário dos sistemas anteriores, no MoteTrack os elementos da infra-estrutura é que atuam como *beacons*, transmitindo periodicamente informações sobre sua localização.

A distribuição da informação é feita de maneira contextualizada: cada elemento da infra-estrutura possui apenas informação que é relevante para a sua vizinhança geográfica. A informação também é armazenada de maneira redundante entres os elementos que se encontram em uma mesma área. Essa distribuição da informação permite a computação robusta da localização.

Para dar suporte à idéia de um sistema de armazenamento descentralizado, o MoteTrack faz uso de dispositivos mais avançados que os sistemas anteriores. A plataforma escolhida é a Berkeley Mica2 “mote”. Entre as características mais importantes desta plataforma estão:

- Processador ATmega 128L de 7.3 MHz e com 128KB de memória;
- Rádio CC1000 que opera nas frequências 433 e 916 MHz com uma largura de banda máxima de 76.8 kbps e alcance de 20 a 30 metros em ambientes fechados. O nível de potência de emissão pode ser ajustado.

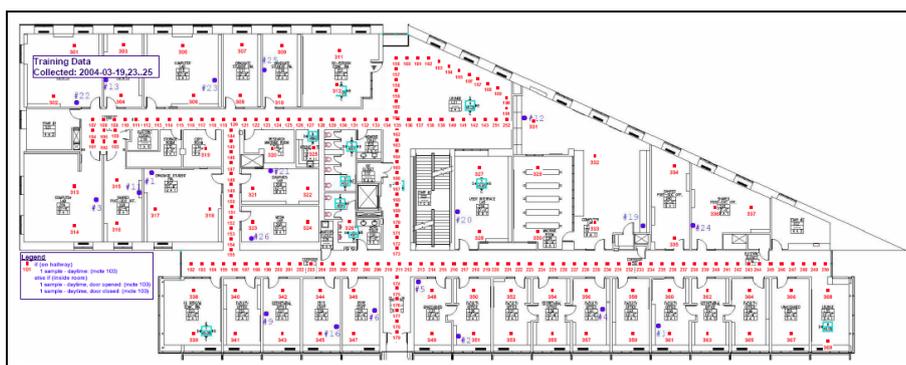
Estes dispositivos podem ser programados via comunicação sem fio, mas a sua principal vantagem em relação aos sistemas anteriores é o seu baixo custo de produção e excelente desempenho energético: uma Mica mote pode funcionar durante meses somente

usando baterias se a frequência de uso for limitada.

O MoteTrack também expande o algoritmo de localização apresentado pelo sistema RADAR usando: 1) uma extensão do algoritmo que permite lidar com a ausência de valores conhecidos no momento do cálculo da localização e, 2) diferentes potências de sinal no emissor, a fim de tentar aumentar a diversidade da informação disponível para o cálculo da localização. É importante salientar que, na medida do possível, apesar de o sistema tentar não sacrificar a exatidão do cálculo da localização, a robustez era a principal prioridade.

Do ponto de vista da implementação, o algoritmo usado no MoteTrack é apenas uma derivação do algoritmo usado no RADAR. Ou seja, é necessário “calibrar” o sistema coletando uma série de pontos de referência durante a fase “*off-line*”.

A coleta de dados não levou em conta diferentes orientações dos emissores (neste caso os elementos da infra-estrutura), dados que estes eram fixos. Ao invés disso, foram medidos os valores de potência de sinal recebidos para diferentes valores de potência de sinal emitidos. Ou seja, para cada ponto de referência são armazenados diferentes vetores de informação com a seguinte estrutura: <id emissor, potência no emissor, potência recebida>. Estes vetores são então condensados em uma “assinatura” do ponto. Durante a fase “*on-line*”, a distância Euclidiana é calculada usando as informações das assinaturas.



**Figura 12: Área de teste usada para o sistema MoteTrack.**

O ambiente de teste usado tinha 1742 m<sup>2</sup> e foi instrumentado com 20 dispositivos que constituem a infra-estrutura do protótipo do sistema (ver Figura 12). Usando esta infra-estrutura foram coletadas 482 assinaturas em diferentes horários do dia e da noite e usando sete valores diferentes de potência de emissão. Os valores da potência do sinal medidos foram convertidos usando uma resolução de oito *bits*.

O resultado obtido através do uso de diferentes potências de emissão é um aumento considerável na exatidão do sistema: usando apenas um valor de potência de emissão a exatidão do sistema é de 5 metros (com um desvio padrão de quase um metro) para 80% dos casos. Para os mesmos 80% dos casos, ao usar os 7 diferentes valores de potência de emissão a exatidão do sistema aumenta para 3 metros, com um desvio padrão de apenas alguns centímetros.

Supondo uma distribuição relativamente uniforme dos *beacons*, estima-se que exista uma certa densidade limite de elementos da infra-estrutura necessários para permitir um cálculo razoável da localização: esta densidade seria de aproximadamente  $0.004 \text{ beacons/m}^2$ . A partir desta densidade os ganhos na exatidão são cada vez menos significativos, caso mais elementos sejam adicionados à infra-estrutura. Por outro lado, a exatidão cai exponencialmente caso o número de elementos disponíveis seja inferior a este limite.

O mesmo fenômeno pode ser observado em relação ao número de pontos de referência: assumindo mais uma vez uma coleta uniforme das assinaturas, estima-se que exista uma densidade limite de  $0.043 \text{ assinaturas/m}^2$  que garante um patamar de exatidão. Novamente, mais assinaturas além desse valor limite não contribuem para o aumento da exatidão do sistema, apenas para a sua estabilidade. Da mesma maneira, uma densidade de assinaturas inferior a este valor limite causa uma exatidão exponencialmente pior.

Do ponto de vista da tolerância a variações nos valores medidos, foram feitos testes usando os valores medidos, porém adicionando componentes uniformemente distribuídos dentro de uma porcentagem limite predefinida. Para perturbações de até 40% do valor original o sistema diminui sua exatidão para um pouco menos de 5 metros em 80% dos casos.

A fim de aumentar a tolerância à perda de dados, o MoteTrack introduz duas adaptações que permitem compensar a ausência de dados por parte da infra-estrutura e do dispositivo que faz as medidas. Ambas adaptações usam os dados que estão presentes em ambos os conjuntos de referências, mas divergem em relação ao uso dos valores que não possuem equivalente:

- **Cálculo bidirecional:** nesta adaptação o algoritmo usa os valores (medidos ou referências) que não possuem equivalente para o cálculo da distância Euclidiana;

- **Cálculo unidirecional:** nesta adaptação o algoritmo usa apenas os valores medidos que não possuem equivalente. Os valores de referência sem equivalente são descartados.

O cálculo bidirecional oferece uma maior exatidão caso o número de elementos faltosos da infra-estrutura seja pequeno. Caso o número de elementos faltosos seja maior do que 16% o desempenho do cálculo unidirecional é melhor.

O dispositivo usado e o horário no qual as medidas foram feitas parecem influenciar muito pouco o sistema: apesar de o sistema usar como referência apenas as assinaturas obtidas durante o dia com um dispositivo, o teste com assinaturas obtidas com outros dispositivos tanto durante o dia como durante a noite produziu resultados praticamente iguais.

### **3.5. Comparação dos SLRs Avaliados**

Os quatro SLRs apresentados oferecem vantagens e desvantagens específicas. Na verdade, estas qualidades e limitações são conseqüências das escolhas feitas para cada sistema no momento da definição do problema que deveria ser resolvido pelos mesmos.

No caso do *Active Badges*, o problema a ser resolvido era a localização de pessoas em um ambiente fechado, mais especificamente em um hospital ou um prédio de uma universidade. Para isto não é necessária uma exatidão muito alta, pois é bastante fácil encontrar uma pessoa apenas indicando a sala onde a mesma se encontra.

O RADAR tinha por objetivo enriquecer a informação contextual para serviços destinados a sistemas computacionais. Um dos objetivos do sistema era permitir que um usuário móvel tivesse seu ambiente de trabalho automaticamente personalizado em função dos dispositivos e serviços disponíveis em sua proximidade. Por exemplo, um usuário que possuísse um *laptop* teria sua impressora padrão automaticamente configurada para ser a impressora mais próxima de sua localização atual. Neste sistema o cálculo da localização pode ser descentralizado, ou seja, cada dispositivo poderia calcular sua própria localização. Entretanto, a informação de contexto (localizações de outros dispositivos) é centralizada. Além disso, o uso da rede IEEE 802.11 restringe o tipo de dispositivos que podem ser localizados, dado que este tipo de rede necessita de bastante energia.

O SpotON tentou aprimorar a idéia apresentada pelo RADAR, usando um conjunto de dispositivos dedicado para a tarefa de cálculo da localização ao invés de reaproveitar

alguma rede sem fio já disponível. A maior motivação para o uso de um sistema dedicado era reduzir o consumo de energia, e, portanto, aumentar a autonomia dos dispositivos. Além disso, o SpotON tentou usar uma abordagem baseada em triangulação ao invés de análise de cenário. Apesar de os resultados preliminares serem bastante encorajadores, os dispositivos usados no SpotON não foram capazes de oferecer exatidão melhor do que o RADAR. Suspeita-se que a principal causa do desempenho fraco do sistema seja a baixa resolução na conversão analógico-digital dos valores de potência de sinal.

O MoteTrack tinha por objetivo fornecer um sistema de localização que fornecesse alta disponibilidade para o uso mesmo durante situações de emergência. Para isso, os dados necessários para o cálculo assim como o algoritmo usado são descentralizados. Ou seja, cada dispositivo é capaz de calcular sua localização de maneira independente de um servidor centralizado, pois as informações necessárias para o cálculo da localização são distribuídas entre os diversos elementos da infra-estrutura. O MoteTrack também seguiu os passos do RADAR, tentando usar análise de cenário para o cálculo da localização. Entretanto, o MoteTrack inovou ao aplicar uma técnica de levantamento dos dados de referência usando diferentes valores de potência de sinal de emissão. Ao contrário do RADAR, não foram feitas medidas levando em conta a orientação dos dispositivos.

A tabela a seguir resume as principais características destes sistemas:

**Tabela 1: Tabela comparativa de características dos SLRs avaliados.**

Característica	Active Badges	RADAR	SpotON	MoteTrack
<i>Técnica de Sensoriamento</i>	Proximidade	Análise de Cenário e Triangulação	Triangulação (Lateração)	Análise de Cenário
<i>Tecnologia</i>	Infravermelho	Rádio Frequência	Rádio Frequência	Rádio Frequência
<i>Sistema de Coordenadas</i>	Locações Simbólicas	Coordenadas Físicas e Relativas	Coordenadas Físicas e Relativas	Coordenadas Físicas e Relativas
<i>Distribuição do Esforço Computacional</i>	Centralizado	Centralizado, mas pode ser distribuído	Centralizado	Distribuído
<i>Escalabilidade</i>	Ruim	Boa	Média	Boa
<i>Capacidade de Identificação</i>	Sim	Sim	Sim	Sim
<i>Exatidão e Precisão</i>	Em nível de sala (caso exista uma linha de visão)	4.69 metros em 75% dos casos	No mínimo 3 metros	3.1 metros em 80% dos casos
<i>Limitações diversas</i>	Funciona com dificuldade em ambientes com muita luz solar	Funciona apenas com dispositivos que suportam rede IEEE 802.11	O tempo de aquisição dos valores de potência do sinal é de 10 a 20 segundos	Sistema descentralizado: inadequado à localização num ambiente empresarial

### **3.6. Conclusão do Capítulo**

A rápida evolução dos sistemas de localização e rastreamento fica evidente quando comparamos as tecnologias empregadas nos diferentes sistemas apresentados. Estes sistemas têm constantemente aprimorado os valores de exatidão e precisão, ao mesmo tempo em que a necessidade energética dos dispositivos usados tem diminuído de maneira significativa.

Os avanços na fabricação de circuitos integrados também permitiram a redução do tamanho dos dispositivos usados. De fato, sistemas dedicados estão oferecendo desempenhos muito superiores em termos de duração de baterias, eficiência na comunicação, recursos computacionais e capacidade de expansão.

Por outro lado, apesar das melhorias tanto na tecnologia quanto nos algoritmos empregados, o princípio básico que rege estes sistemas continuam sendo os mesmos. Ou seja, a procura por novas técnicas tem se provada menos frutífera do que o aperfeiçoamento das técnicas usadas atualmente.

---

## Capítulo 4: Sistema de Localização e Rastreamento baseado em Smart-Its

Conforme os resultados observados em trabalhos relacionados, o uso de novas tecnologias e o desenvolvimento de novos algoritmos tem impulsionado a criação de novos SLRs com maior exatidão e precisão.

A escolha da plataforma de *hardware* seguiu o mesmo princípio: a plataforma escolhida foi a *Smart-Its*. Esta decisão foi tomada baseando-se nas características apresentadas pela plataforma, conforme explicado no item 4.1.

O SLR projetado tem que respeitar os requisitos apresentados na definição do problema. Entre os requisitos podemos salientar: a necessidade de exatidão ao nível de sala, tolerância a faltas, escalabilidade e expansibilidade. Os detalhes relativos à definição do SLR são detalhadas nos itens 4.2 e 4.3.

O algoritmo a ser usado deve ser capaz de oferecer resultados no mínimo tão precisos quanto os outros SLRs existentes. A discussão sobre o algoritmo usado se encontra no item 4.4.

Finalmente, as informações sobre a localização dos dispositivos devem ser disponibilizadas de alguma maneira: a preocupação com a privacidade dos dados é secundária neste caso, pois estaremos rastreando apenas objetos, e não pessoas. A discussão detalhada sobre as maneiras de disponibilizar a informação de localização, e a opção por um servidor centralizado, se encontram no item 4.5.

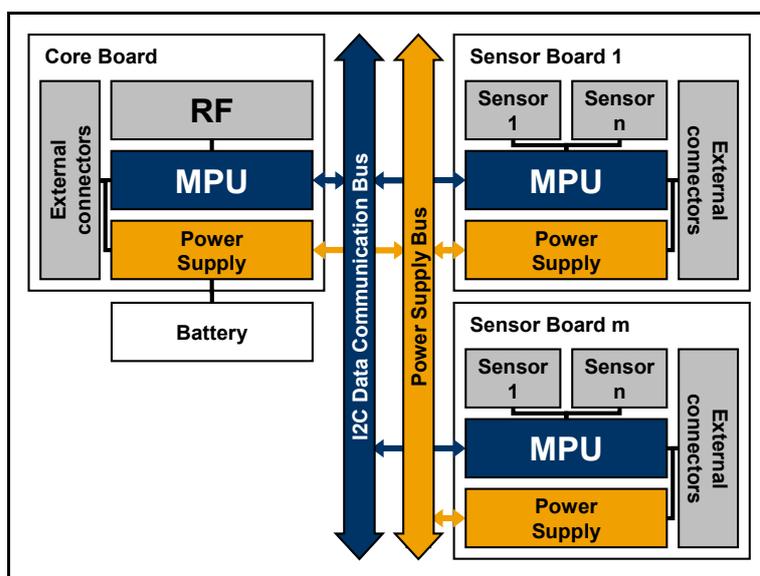
### 4.1. *Smart-Its*

Os *Smart-Its* [19] são uma plataforma de hardware voltada especificamente para criação de sistemas embutidos (*embedded systems*) que possuem alta integração com o

ambiente. Em muitos aspectos são semelhantes aos Mica2 motes [17], porém com melhorias em termos de capacidade de processamento, consumo de energia e flexibilidade.

Apesar de serem uma plataforma computacional de propósito geral, os dispositivos baseados em *Smart-Its* são geralmente customizados de maneira a complementar de maneira transparente o objeto ao qual estão associados, pois seguem a filosofia de “*Disappearing Computer*” [20], que põe ênfase nas interações entre pessoas e seus ambientes e coloca os sistemas de informação necessários para a realização destas interações em segundo plano.

Outro objetivo dos *Smart-Its* é permitir a extensão *ad hoc* das capacidades de objetos. Ou seja, a simples adição de novos módulos a um objeto que já possui a base do sistema *Smart-Its* habilitará novas funcionalidades de maneira instantânea e transparente.



**Figura 13: Arquitetura dos Smart-Its.**

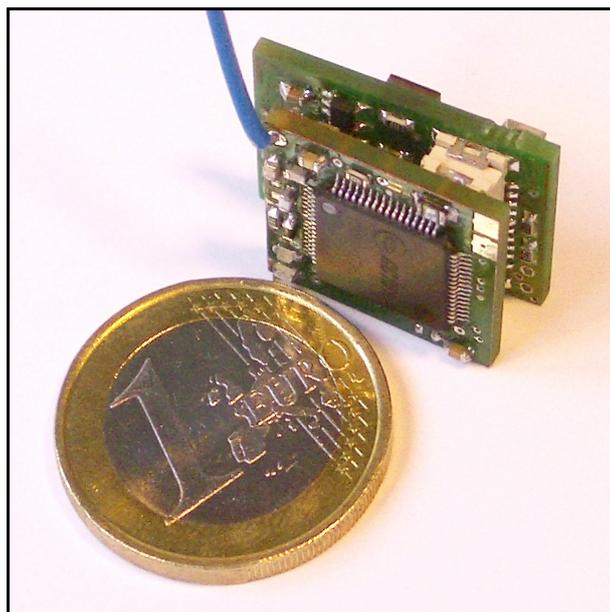
A base do sistema *Smart-Its* é um componente, chamado *core board*, (ver Figura 13) que oferece funcionalidades para processamento de dados, interação com módulos adicionais, comunicação com outros dispositivos e instrumentação básica. Este componente de base também é responsável pelo gerenciamento da fonte de energia.

Entre as funcionalidades de comunicação podemos salienta a capacidade de controlar a potência de emissão e de medição do valor de potência recebido usando um conversor analógico-digital de 10 *bits*.

Os diversos módulos adicionais são alimentados pela *core board* e comunicam entre si através de um barramento de dados no padrão I2C. Módulos adicionais podem conter sensores, atuadores ou simplesmente portas de entrada e saída.

As dimensões da *core board* assim como dos módulos adicionais são variáveis (pois podem ser ajustadas em função do sistema sendo implementado), mas em geral não excedem três centímetros quadrados e pesam menos de 10 gramas. Na versão atual a *core board* provê:

- **Um sistema de comunicação sem fio**, baseado no *transceiver* de rádio frequência RFM TR-1001, e comunica usando a frequência de transmissão 868.35 MHz. Esta frequência faz parte do espectro que não precisa ser licenciado;
- **Uma unidade de processamento**, baseada na série de micro-controladores Microchip PIC18 rodando a 20 MHz. Estes micro-controladores são conhecidos por seu excelente desempenho energético: em modo de *standby* seu consumo é inferior a 1  $\mu\text{A}$ ;
- **Uma unidade de gerenciamento de energia** podendo usar diferentes tipos de baterias. Também é possível conectar o dispositivo diretamente à rede elétrica usando um simples transformador e conversor AC-DC;
- **Sensores e atuadores básicos**, como por exemplo, o sensor de movimento, o regulador de potência de transmissão, LEDs e um *buzzer*;
- **Lógica e conectores** para a interligação e alimentação de módulos adicionais.



**Figura 14: Exemplo de *particle* (core board e sensor board).**

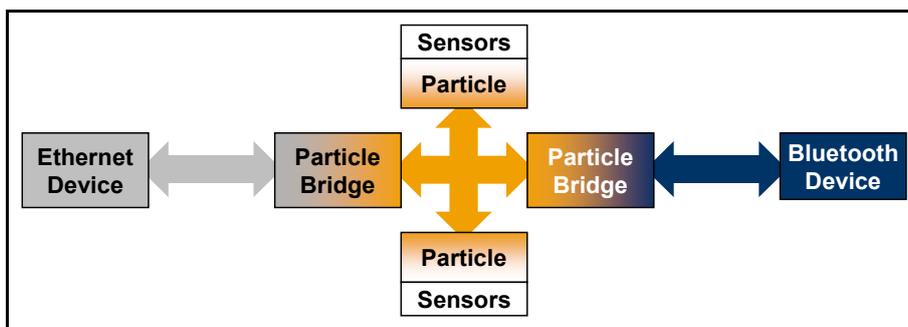
Entre os módulos adicionais, podemos salientar as placas de sensores (*sensor boards*). As placas de sensores também possuem seu próprio processador e memória, permitindo assim a implementação de algoritmos de sensoriamento específicos para uma determinada aplicação ao nível dos sensores. Já existem placas de sensores para sinais de áudio, intensidade luminosa, aceleração, pressão e temperatura.

O termo *particle* indica uma *core board* pronta para uso: em geral isso significa que a mesma está acoplada com uma fonte de alimentação (por exemplo: pilha) e, se necessário, módulos adicionais (ver Figura 14). A comunicação entre *particles* é feita por sinais de rádio frequência de curto alcance. Seu objetivo principal é a comunicação espontânea entre pequenos grupos de *particles*, e não em roteamento ou difusão de dados em redes de sensores de larga escala. Seguindo este propósito, o sistema favorece a criação de redes *ad hoc* e a troca rápida de informações contextuais, ao invés de dados de baixo nível obtidos dos sensores.

A transmissão de dados é baseada em um protocolo *stateless* e *peer-to-peer*. A pilha de protocolos implementa apenas a funcionalidade equivalente às três primeiras camadas do modelo OSI. A camada física emprega um protocolo baseado em *time division multiplex with collision sensing and collision avoidance* (TDMA/CSCA)<sup>4</sup>, emprega *fixed slots* e força uma *strict synchronization* de todos os *Smart-Its* que se encontram ao alcance

<sup>4</sup> Um texto introdutório sobre TDMA/CSCA pode ser encontrado em <http://en.wikipedia.org/wiki/TDMA> e em <http://en.wikipedia.org/wiki/CSMA/CA>.

de comunicação. Graças a estas características, é possível evitar o procedimento de “*wake-up on traffic*”, que é indesejável quando se usa um canal de transmissão sujeito a interferências de outros dispositivos que venham a usar a mesma frequência. A camada de rede é implementada sob a forma de um “*Abstract Communication Layer*” (ACL). O ACL fornece primitivas para o envio e recebimento de dados.



**Figura 15:** Esquema de comunicação entre *particles*, sensores e *bridges*.

Módulos adicionais também permitem a interação com outros tipos de dispositivos. Atualmente já existem módulos que permitem a interação com redes Ethernet e dispositivos Bluetooth (ver Figura 15). O módulo que interage com redes Ethernet é chamado “*Ethernet bridge*” ou simplesmente *bridge*. As *bridges* comunicam usando o protocolo IP, e são capazes de se autoconfigurar através de um servidor DHCP.

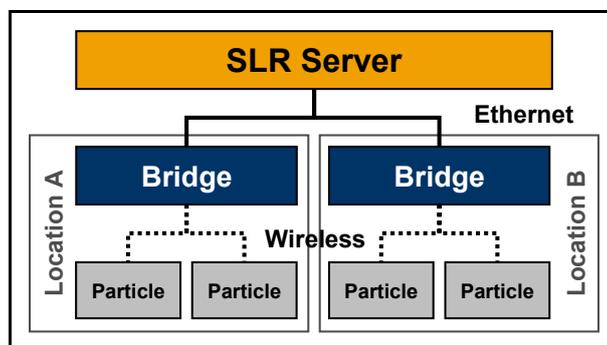
A comunicação via Ethernet é feita usando pacotes UDP *broadcast*, a fim de emular o comportamento da rede sem fio. Por esta razão as *bridges* não oferecem suporte a protocolos de camada de transporte e se limitam apenas a suportar as primitivas da ACL. Para mitigar estas limitações, já existem hoje bibliotecas que simplificam a comunicação com as *particles* e lidam com diversos aspectos da comunicação, inclusive provendo mecanismos básicos de *acknowledge* de recebimento de mensagens.

É possível interagir diretamente a partir de um computador tradicional com qualquer *particle* que se encontre ao alcance de uma *bridge*. Para isso, cada *bridge* e cada *particle* possuem um identificador único que podem ser usados para restringir o escopo de uma mensagem.

#### **4.2. SLR Baseado em Proximidade**

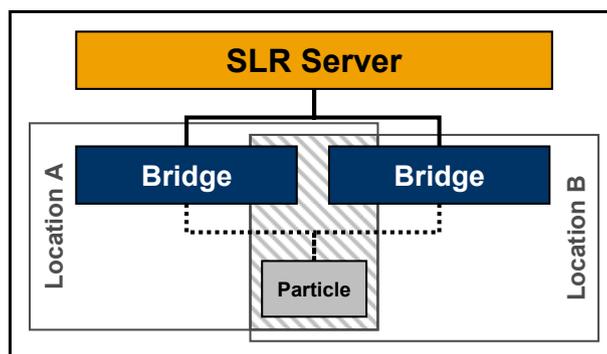
Como os *Smart-Its* são capazes de criar redes *ad hoc* estando apenas próximos uns dos outros, é muito simples implementar um SLR baseado em proximidade. Para isso, basta usar as *bridges* como sensores de proximidade e programar as *particles* de maneira a

funcionar como *beacons* emitindo um sinal contendo seu identificador único. Finalmente, basta associar cada *bridge* com uma localização simbólica.



**Figura 16: Arquitetura de um SLR baseado em proximidade usando Smart-Its.**

O algoritmo usado para este tipo de SLR é trivial: Quando uma *bridge* detecta a presença de uma determinada *particle*, esta dissemina uma mensagem contendo os identificadores da *particle* e da *bridge*. Um servidor centralizado então armazena estas mensagens e faz o mapeamento entre *bridges* e localizações simbólicas.



**Figura 17: Exemplo de indecidibilidade na localização em caso de sobreposição de áreas de cobertura.**

Este sistema é equivalente ao *Active Badges*, porém com a vantagem de não precisar de linha de visão entre o emissor e o receptor. Entretanto, dois problemas devem ser resolvidos:

- Apesar de um dispositivo ter sido localizado ao nível de sala, como proceder se uma exatidão maior é necessária?
- Caso um dispositivo se encontre em uma área que esteja ao alcance de duas *bridges* associadas a localizações simbólicas diferentes (Figura 17), como decidir qual localização é a mais adequada?

Para resolver essas limitações do sistema simples, decidimos aprimorá-lo usando os mesmos princípios apresentados no MoteTrack. Ou seja, usando as capacidades de controle de potência de emissão e medição de potência recebida disponíveis nas *particles*, foi desenvolvido um SLR baseado em análise de cenário.

### **4.3. SLR Baseado em Análise de Cenário**

A escolha do sensoriamento baseado em análise de cenário foi resultado da avaliação dos trabalhos relacionados assim como resultados experimentais. Os resultados apresentados tanto pelos criadores do RADAR como do SpotON indicam que SLRs baseados em triangulação não são adequados para o funcionamento em ambientes fechados. Segundo estes trabalhos, sistemas baseados em triangulação não são adequados para ambientes fechados porque necessitam de um modelo matemático que permita calcular a distância a partir da potência do sinal recebido. Devido a reflexões, reverberações e propagação via múltiplos caminhos, os modelos usados podem apenas oferecer um compromisso entre complexidade e exatidão.

Sistemas baseados em análise de cenário trocam complexidade na modelagem por esforço adicional na preparação do sistema: o levantamento dos valores de referência a serem usados é demorado e a qualidade das medidas feita na etapa “*off-line*” impacta diretamente sobre a exatidão obtida na etapa “*on-line*”.

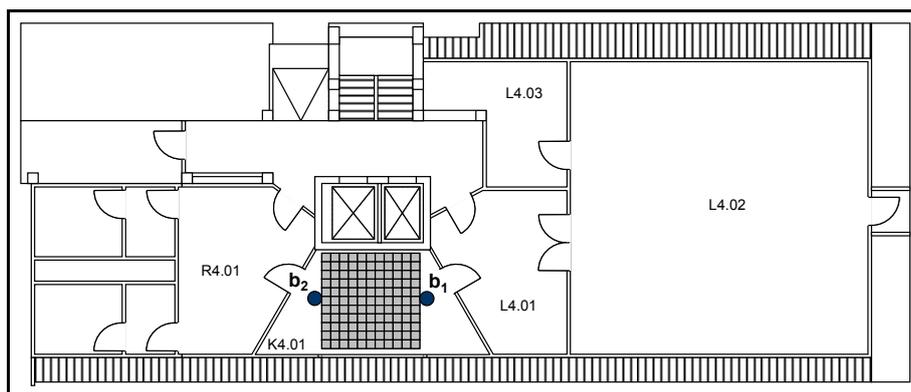
É importante lembrar o escopo desejado para o SLR baseado em análise de cenário: dado que usando apenas a detecção de proximidade já é possível obter granularidade ao nível de sala, se deseja apenas que a análise de cenário permita uma exatidão melhor do que a sala. Ou seja, o SLR baseado em análise de cenário será apenas uma extensão do sistema baseado em proximidade.

Relembrando o objetivo do projeto, deseja-se saber a localização de um determinado documento ao nível de sala, pois esta informação já é suficiente na maioria dos casos, dado que documentos geralmente ficam em lugares de fácil acesso. O SLR baseado em análise de cenário permitiria localizar o documento de maneira mais precisa caso a informação de sala não for suficiente.

Isso diferencia este SLR de projetos anteriores significativamente, pois os projetos anteriores visavam usar a infra-estrutura para cobrir uma vasta área de maneira

indiscriminada. O SLR apresentado aqui tem por objetivo localizar um dispositivo dentro de uma pequena área predefinida.

O maior desafio é determinar se um sistema baseado em análise de cenário é capaz de oferecer exatidão inferior a um metro com precisão: os exemplos disponíveis na literatura oferecem apenas precisões da ordem de 3 metros para 80% dos casos (como, por exemplo, o MoteTrack).



**Figura 18:** Área de teste usada para a avaliação de um SLR baseado em análise de cenário.

Para testar a viabilidade de tal sistema foi usada uma sala de reuniões vazia (ver Figura 18). Nesta sala foi colocada uma grade de 12x12 pontos de referência (em cinza na Figura 18). Para avaliar diversas configurações foram usadas duas *bridges* para o levantamento dos dados (nas posições  $b_1$  e  $b_2$  da Figura 18).

Para garantir que as medidas fossem as melhores possíveis, foram removidos quaisquer aparelhos que pudessem interferir com o bom funcionamento das *particles*. Ou seja, nenhum dispositivo eletrônico diretamente envolvido com o processo de levantamento de dados foi mantido na sala. A motivação para proceder desta maneira vem de um raciocínio muito simples: se um sistema funcionando em condições ótimas é incapaz de oferecer resultados excelentes, com certeza o seu desempenho em condições normais será insuficiente.

#### 4.3.1. Procedimento de Teste de Análise de Cenário

Conforme os resultados apresentados para o RADAR, assumimos que a atenuação de um sinal de rádio frequência é um fenômeno simétrico, ou seja, que a atenuação de um sinal é a mesma de um dispositivo A para um dispositivo B independentemente de qual é o emissor e qual é o receptor.

Como o SLR seria usado como um refinamento do sistema anterior, foi decidido então que as *bridges* seriam responsáveis por medir o valor da potência do sinal recebido das *particles*. Esta informação seria agregada à mensagem de detecção enviada pela *bridge*. Foram usadas apenas duas *bridges* para a área da sala, pois se espera que não seja necessário usar três *bridges* para o cálculo da localização. Uma *bridge* se localizava na posição (1, 6) da grade e a outra na posição (12, 6). Uma *particle* foi colocada em cada ponto da grade para efetuar as medidas.

O levantamento de valores de referência seguiu um procedimento semelhante ao usado no MoteTrack. As *particles* possuem um intervalo discreto de potências de emissão possíveis: os valores podem ser de 1 (potência mínima) a 31 (potência máxima) inclusos. Para limitar o número de medições foram escolhidos apenas cinco valores – 1, 15, 20, 25 e 31 – que foram escolhidos segundo orientação do fabricante, pois representam intervalos significativos no aumento da potência. Infelizmente, o fabricante não disponibiliza uma tabela de conversão destes valores de potência para valores em unidades de potência tradicionais (dB).

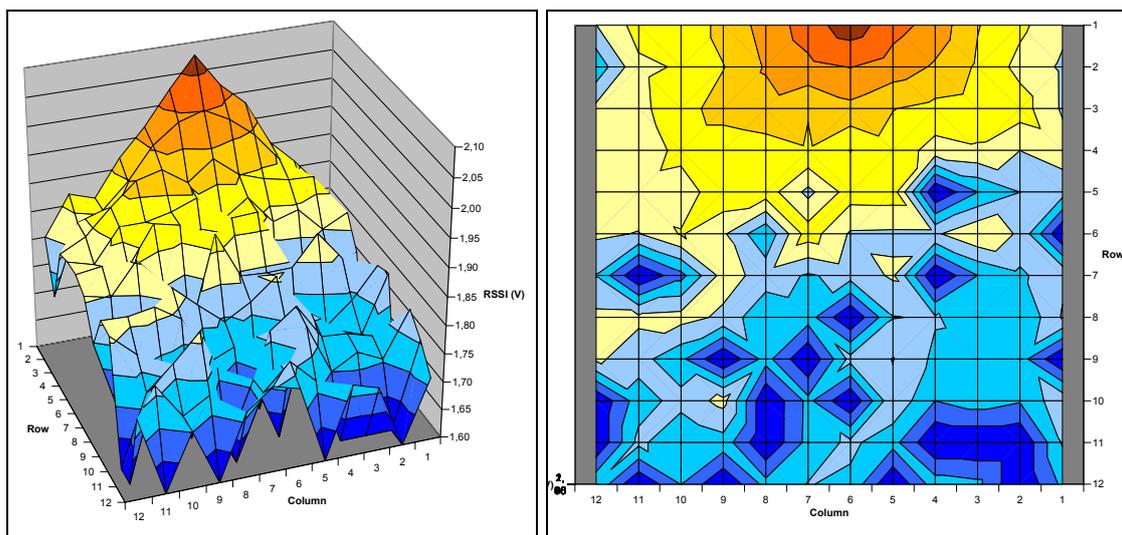
Dentro da área da sala foram definidos 144 pontos de referência usando uma grade de 12x12 lugares afastados de 30 centímetros. Para cada ponto de referência foi obtida uma assinatura usando os cinco valores diferentes de potência de emissão escolhidos. Para cada potência de emissão foram feitas 20 medidas, usando um intervalo de um segundo entre medidas. Durante as medidas as orientações do emissor como do receptor foram mantidas. Conforme o processo sugerido no MoteTrack, a orientação não foi levada em conta, e portanto, não deveria interferir no levantamento de dados.

Os valores foram armazenados na forma de tuplas contendo <id base, coordenada x, coordenada y, valor da potência de emissão, valor da potência recebida>. A média dos 20 valores foi armazenada para uso durante a fase *on-line* e os 20 valores foram guardados para serem usados como valores de teste.

#### **4.3.2. Resultados do Teste**

Usando os dados obtidos a partir do procedimento definido no item anterior analisamos a possibilidade da implementação de um sistema baseado em análise de cenário.

Os gráficos apresentados a seguir mostram os valores da média de 20 medidas feitas em seqüência com um intervalo de um segundo. O valor apresentado para cada ponto da grade é a média destas 20 medidas. As coordenadas X e Y indicam a posição na grade onde a medida foi feita. Cada figura contém o gráfico tridimensional e uma projeção no plano para o mesmo conjunto de dados.



**Figura 19: Valores medidos para a potência de emissão 1.**

As áreas escuras indicam pontos cegos. Pontos cegos são pontos onde, devido às características do ambiente, não é possível enviar sinais de rádio frequência entre um emissor e um receptor. Muitas vezes esta situação é causada por simples interferência destrutiva de um sinal sobre ele mesmo.

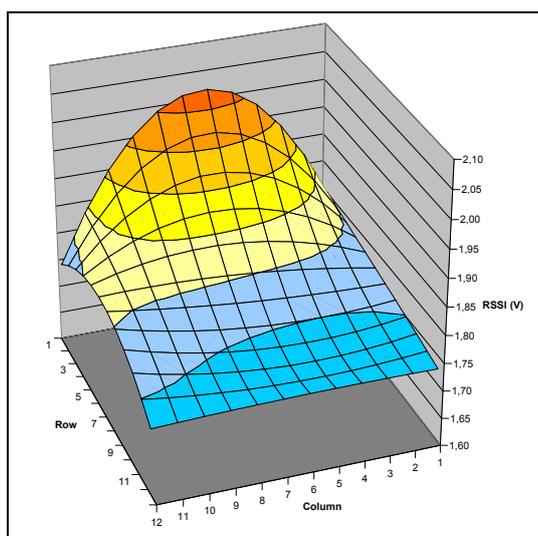
A abundância de pontos cegos usando a potência mínima indica que este valor não é suficiente para o cálculo da localização. De fato, na área monitorada existem 20 pontos cegos (ver Figura 19) – ou seja, 13,8% dos pontos medidos não possuem nenhum valor, pois não conseguem se comunicar com a *bridge*.

A distribuição dos pontos cegos é condizente com as características conhecidas de atenuação de sinal: a maior concentração se encontra mais longe da *bridge*. Entretanto, alguns pontos se encontram bastante próximos: o mais próximo se encontra apenas a 1.35 metros. Em compensação, o escopo dos pontos cegos é extremamente limitado: geralmente uma diferença de alguns milímetros é suficiente para passar de um ponto cego para uma recepção perfeita do sinal.

Outro aspecto interessante é a irregularidade das medidas. Apesar da área estar praticamente livre de interferências eletro-magnéticas diretas (ou seja, aparelhos

eletrônicos funcionando na proximidade da área de teste), os valores obtidos apresentam um comportamento bastante irregular. É importante salientar que o aspecto irregular das medidas não é causado por flutuações durante a coleta de dados: na verdade, as séries de valores obtidos para cada ponto apresentam desvios-padrão bastante baixos, o que confirma que os valores são estáveis.

As variações causadas são resultado dos diferentes fenômenos<sup>5</sup> que regem a propagação de ondas eletro-magnéticas, tais como reflexões, refrações e propagação via múltiplos caminhos, causando interferências construtivas e destrutivas. Ou seja, estes fenômenos devem ser considerados mesmo quando estamos lidando com pequenas áreas, pois seus efeitos têm uma participação significativa nos valores medidos. Por causa destas irregularidades a definição de um modelo matemático resultará em um modelo muito complexo ou impreciso. Ou seja, a modelagem matemática terá que fazer um compromisso entre simplicidade e exatidão.



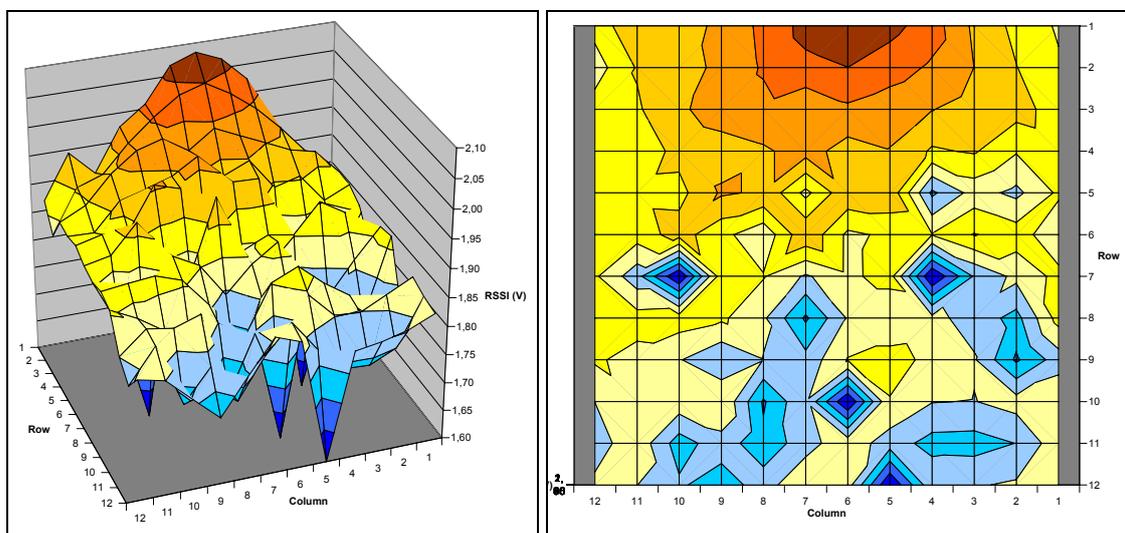
**Figura 20: Aproximação *best-fit* de segundo grau para os valores de potência de sinal recebido para a potência de emissão 1.**

De fato, a melhor equação de segundo grau que aproxima os valores apresenta um erro de aproximação acumulado<sup>6</sup> de 0,1472 (ver Figura 20). Apesar do erro acumulado ser relativamente pequeno, os valores individuais de erro estão distribuídos por toda a grade de maneira imprevisível entre os pontos de referência. Equações com graus superiores apresentam erros menores, mas passam a serem muito complexas para a resolução em

<sup>5</sup> Estes fenômenos são principalmente reflexões, refrações e propagação via múltiplos caminhos, e causam interferências construtivas e destrutivas.

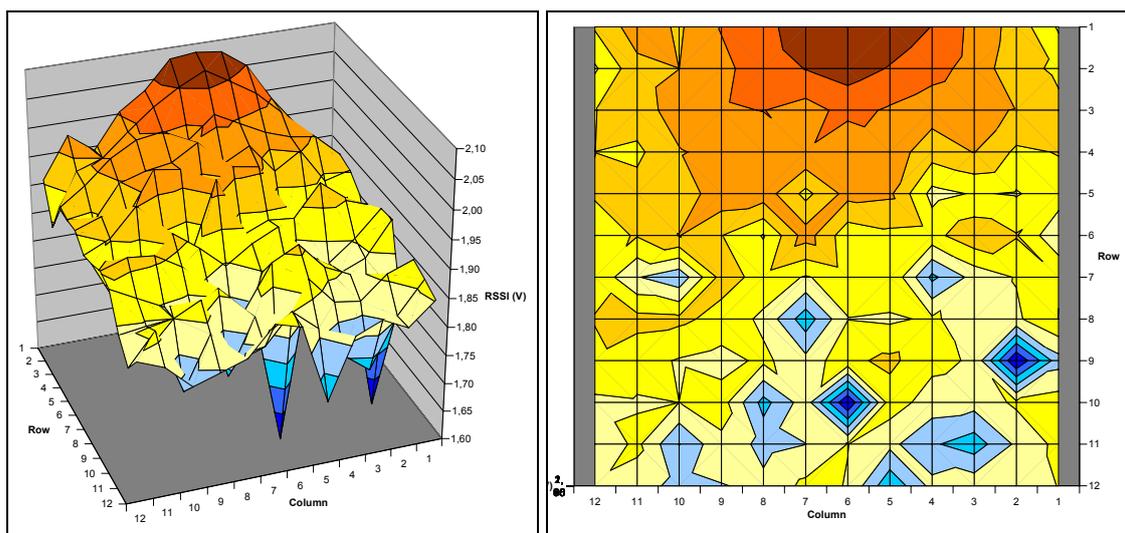
<sup>6</sup> Este erro é a soma dos quadrados dos valores absolutos dos erros (*sum of squared absolute error*).

tempo real, principalmente se levarmos em conta que no mínimo dezenas de dispositivos terão que ser monitorados simultaneamente.



**Figura 21: Valores medidos para a potência de emissão 15.**

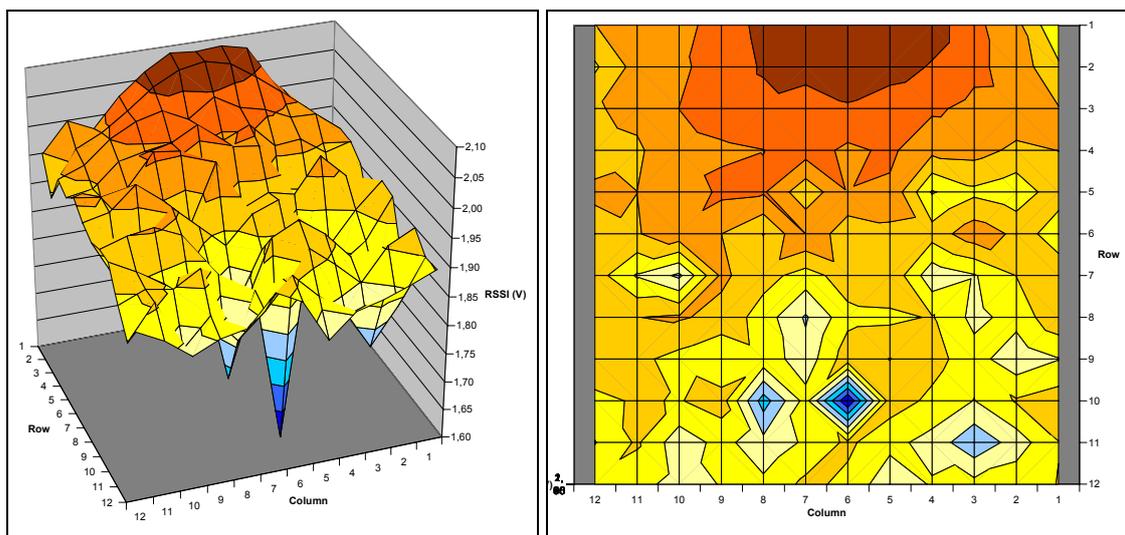
O aumento da potência de emissão para 15 reduz o número de pontos cegos significativamente: com este valor de potência apenas 4 pontos cegos persistem (ver Figura 21). Além disso, com este valor de potência a primeira curva de nível passou a cobrir a área que antes era delimitada pela segunda curva de nível. Ou seja, houve uma diminuição da sensibilidade perto do receptor. Por outro lado, houve um aumento da sensibilidade em áreas mais distantes do receptor, devido à eliminação de diversos pontos cegos.



**Figura 22: Valores medidos para a potência de emissão 20.**

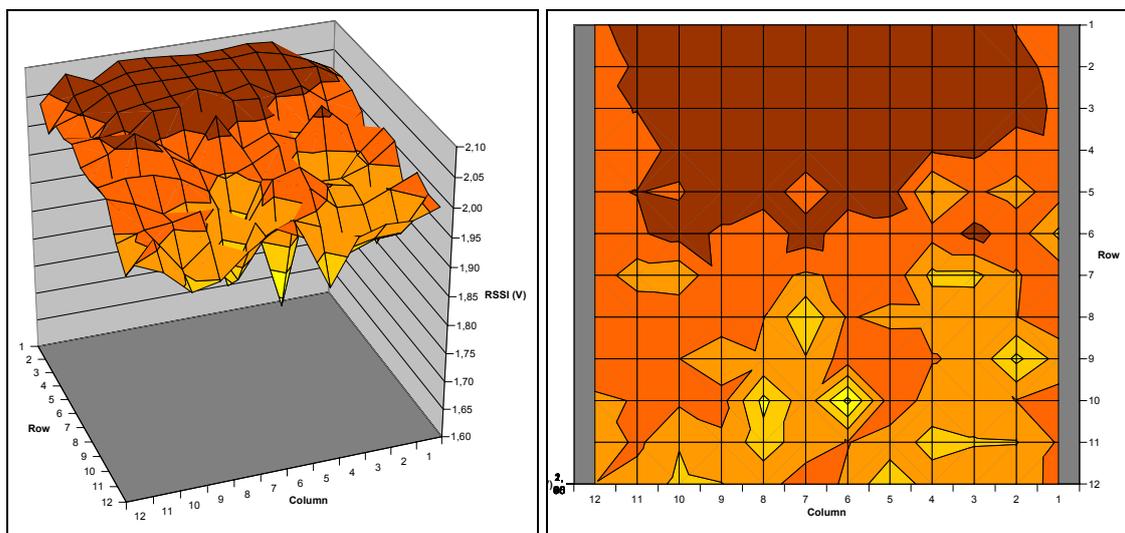
A passagem para a potência de emissão 20 também reduz o número de pontos cegos, mas de maneira muito menos significativa: com este valor de potência de emissão

persistem apenas dois pontos cegos (ver Figura 22). Novamente, o aumento da potência aumenta a área de sensibilidade reduzida em torno do receptor. Por outro lado, observa-se que fora dessa área os gráficos não possuem nenhuma relação de simetria ou proporcionalidade. Isso nos permite concluir que o uso combinado dos diferentes valores de potência de emissão irá contribuir para uma maior exatidão do sistema.



**Figura 23: Valores medidos para a potência de emissão 25.**

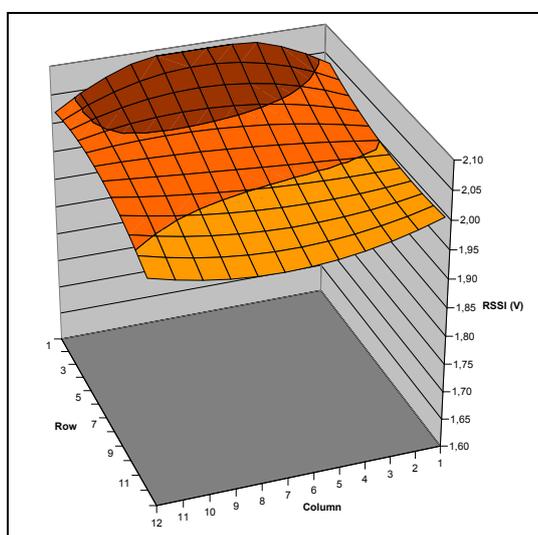
O aumento da potência de emissão para 25 apresenta as mesmas conseqüências que os aumentos anteriores: somente um ponto cego permanece e a área de sensibilidade reduzida em torno do receptor aumenta (Figura 23). Novamente, não é possível distinguir nenhum tipo de simetria ou proporcionalidade entre os valores obtidos entre os valores obtidos para esta potência de emissão e os valores anteriores.



**Figura 24: Valores medidos para a potência de emissão 31.**

Finalmente, o uso da potência de emissão máxima causa uma diferença importante em relação aos valores anteriores: não existe mais nenhum ponto cego, porém a área próxima ao receptor se torna plana, sem mudanças significativas entre o ponto mais próximo do receptor e os pontos mais distantes (ver Figura 24).

Este resultado é compreensível dado que o alcance de transmissão das *particles* na potência máxima é muito maior do que a área monitorada. Obviamente, usar apenas os valores obtidos para a potência máxima para o cálculo da localização limitaria a exatidão do sistema. Entretanto, se combinados com os valores de outras potências de emissão, estes valores auxiliam na identificação de pontos cegos.



**Figura 25: Aproximação *best-fit* de segundo grau para os valores de potência de sinal recebido para a potência de emissão 31.**

Como este conjunto de valores é que apresentou a superfície mais regular, foi calculado o modelo matemático que melhor aproxima os dados a fim de comparar a distribuição do erro da aproximação com os resultados obtidos para a potência de emissão 1.

A aproximação de segundo grau (ver Figura 25) tem um erro acumulado relativamente pequeno (apenas 0,1473), como para a potência de emissão 1. Entretanto o erro se concentra apenas nos pontos mais distantes ao receptor, ou seja, esta aproximação parece ser mais adequada para o cálculo da localização do que a da potência de emissão 1. Infelizmente, ao aumentar a potência de emissão a sensibilidade do sistema é reduzida, pois o intervalo de valores observados dentro da área monitorado diminui. Na prática, isso

pode levar a situações onde interferências externas causem mais diferença no sinal medido do que a própria atenuação natural do sinal. Ou seja, o sistema se torna menos preciso.

#### **4.4. Algoritmo de Cálculo da Localização**

Os trabalhos anteriores em sistemas de localização e rastreamento baseados em análise de cenário usam algoritmos da família *nearest neighbor in signal space*. Do ponto de vista matemático, os dados dos pontos de referência servem como uma função de conversão discreta entre os domínios da localização espacial (tridimensional) e de valores de potência de sinal recebido.

O número de dimensões do domínio do sinal (*signal space*) depende da implementação do sistema: no RADAR, cada estação-base fornece um valor que corresponde a uma dimensão do domínio do sinal. Portanto, o RADAR é capaz de efetuar uma conversão entre dois sistemas tridimensionais (dado que apenas três estações-base foram usadas). No MoteTrack, a conversão é efetuada usando os valores medidos para diferentes potências de emissão: usando este artifício o domínio do sinal pôde ser expandido sem o uso de *hardware* adicional. Ou seja, o número de dimensões do domínio do sinal pode ser definido com o produto do número de elementos que estão medindo valores de potência de sinal pelo o número de potências de emissão sendo usadas.

A versão tradicional destes algoritmos usa uma procura simples no domínio do sinal, ou seja, compara os valores medidos com os valores de referência e retorna o ponto de referência cujos valores são mais próximos dos valores medidos. Entretanto, estes algoritmos apresentam uma limitação muito importante: se não existe uma paridade entre valores medidos e valores de referência, a escolha do ponto mais próximo é prejudicada, pois a ausência de valores acarreta em um desvio na comparação.

Este é um problema muito sério em sistemas baseados em sinais de rádio frequência, pois, como foi observado durante os testes de análise de cenário (ver item 4.3.2), a existência de pontos cegos pode facilmente causar a perda da paridade entre valores medidos e valores de referência.

Para compensar a falta de paridade, o algoritmo básico foi aprimorado a fim de tolerar a falta de dados. Para isso a procura não é feita mais por simples comparação, e sim computando o erro levando em conta apenas os valores medidos. Em outras palavras, dado um ponto de referência, o cálculo da distância Euclidiana é feito sobre os valores medidos,

e não sobre os valores de referência. Este algoritmo apresenta as mesmas características que o cálculo unidirecional apresentado pelo MoteTrack, e pode ser definido em uma série de passos bastante simples.

**Algoritmo 1: Cálculo da Localização no SLR do DigiClip.**

```

1:   {Inicialização}
2:    $id \leftarrow \emptyset$ 
3:    $power \leftarrow \emptyset$ 
4:    $vals[power] \leftarrow \emptyset$ 
5:    $points \leftarrow getReferencePoints()$ 
6:    $refs[point, power] \leftarrow getReferenceValues(points)$ 
7:    $err[point] \leftarrow \emptyset$ 
8:   {Cálculo da localização}
9:    $id \leftarrow getId()$ 
10:   $vals \leftarrow getValues(id)$ 
11:  for all  $pw : pw \in power$  do
12:    for all  $pt : pt \in points$  do
13:       $err[pt] \leftarrow \sqrt{(err[pt])^2 + (vals[pw] - refs[pt, pw])^2}$ 
14:    end for
15:  end for
16:  return  $pt : err[pt] \leq err[p] \forall p \in points$ 

```

O algoritmo apresentado acima é uma versão simplificada da implementação: assume-se que meios externos indiquem qual dispositivo deve ser processado através da função *getId()* (linha 9). A tabela de erros (linha 7) é usada apenas para um dispositivo. Os erros correspondentes a cada ponto de referência são atualizados usando os valores obtidos através da função *getValues(id)* (linha 10): esta atualização é feita de maneira progressiva, pois a cada iteração o valor do erro é atualizado usando a diferença entre o valor medido e o valor de referência (linha 13). Finalmente, o algoritmo retorna o ponto cujo erro é o menor (linha 16), para aquela iteração.

A maior vantagem deste algoritmo é sua iteratividade: com apenas um valor de potência medido já é possível retornar uma estimativa de localização. De fato, cada valor adicional simplesmente aumenta a exatidão do sistema, pois o novo cálculo será feito sobre um novo conjunto de valores de referência.

#### 4.5. Servidor de Localização

Sistemas de localização e rastreamento causam reações fortes nos usuários se forem usados para obter a localização de pessoas, conforme foi observado na implementação do *Active Badges*. Por outro lado, sistemas como o RADAR, que permitem apenas a localização de dispositivos e a personalização de serviços, são aceitos com facilidade, pois não invadem a privacidade dos usuários.

A maior preocupação é com a centralização dos dados, pois, no caso do *Active Badges*, a informação sobre a localização de todos os usuários está disponível em uma única interface. O MoteTrack resolveu este problema descentralizando o cálculo da localização: cada usuário conhece apenas a sua localização, e pode escolher se deseja tornar esta informação pública ou não.

Como no DigiClip se deseja apenas rastrear documentos, foi decidido que o sistema teria um servidor de localização centralizado. Esta escolha é a mais apropriada se levarmos em conta que o sistema permite o uso de duas técnicas diferentes de sensoriamento: para a localização baseada em proximidade é necessário haver uma entidade centralizada que efetue a conversão entre sensores de proximidade e locações simbólicas, assim como é feito no *Active Badges*. Este servidor facilita o acesso à informação e poderá ser integrado com outros sistemas de informação empresariais.

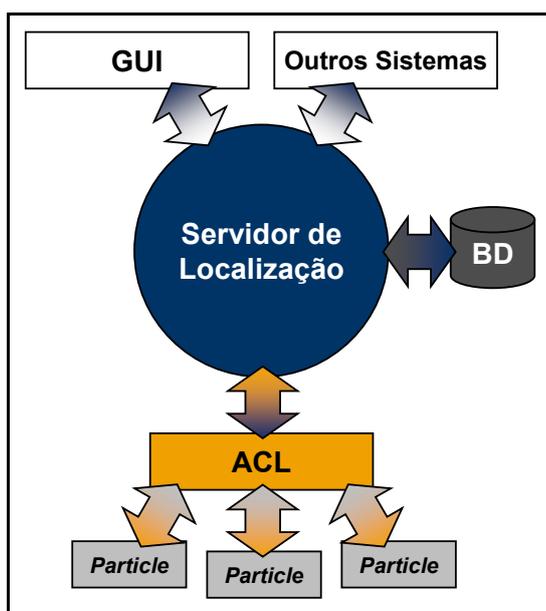


Figura 26: Arquitetura do Servidor de Localização.

O servidor de localização interage com as *particles* através do *Abstract Communication Layer* (ver Figura 26), pois este oferece a mesma funcionalidade disponível para as *particles* para a comunicação de rede. Para a interação com os usuários, existe uma API que permite a implementação de interfaces gráficas ou a conexão com outros sistemas. Os dados são armazenados em um sistema dedicado, como por exemplo um banco de dados.

O servidor de localização oferece todas as funcionalidades necessárias para o monitoramento de qualquer dispositivo equipado de um DigiClip. Entre outros, podemos citar:

- **A localização atual, *on-line*, de qualquer dispositivo** ao alcance da infraestrutura. Para dispositivos fora do alcance, o sistema mantém em memória a última localização conhecida;
- **Um histórico dos deslocamentos**, que lista todos as locações simbólicas onde o dispositivo esteve e os intervalos de tempo associados;
- **A lista de dispositivos que se encontram em uma locação simbólica**, independentemente de sua localização específica dentro da locação;
- **O estado de cada dispositivo**, que pode conter um conjunto de informações relativas ao contexto do objeto assim como informações que devem ser enviadas ao dispositivo.

Para garantir a disponibilidade do servidor em caso de faltas, o mesmo foi especificado de maneira a suportar replicação [3] de maneira transparente:

- **Replicação ativa** [3]: diversos servidores podem ser executados em paralelo de maneira transparente, dado que a comunicação entre *particles* e computadores é feita usando datagramas UDP *broadcast*;
- **Replicação passiva** [3]: várias réplicas podem coexistir, sendo que apenas uma terá seu ACL ativo. Em caso de falha, uma das réplicas assume o lugar do líder simplesmente conectando com o banco de dados que contém o estado do sistema;

A infra-estrutura necessária para a replicação do servidor (detecção de falhas, notificação de eventos, gerenciamento de réplicas) não é abordada neste trabalho, pois foge

ao escopo do mesmo. Da mesma maneira, supõe-se que a replicação do banco de dados é gerenciada externamente.

#### **4.6. Comparação do SLR do DigiClip com Outros Sistemas**

O sistema de localização e rastreamento apresentado neste capítulo oferece uma série de vantagens e inovações em relação a sistemas anteriores. A mais simples de ser observada está ao nível do *hardware*: a plataforma *Smart-Its* oferece tecnologia de ponta na área de sistemas embarcados. As características mais importantes são:

- **A capacidade de evitar colisões na comunicação sem fio:** nenhuma das plataformas anteriores evita colisões, e simplesmente não podem ser usadas se diversos dispositivos se encontram na mesma área, dado que as mensagens enviadas interferem entre si;
- **A flexibilidade e expansividade da plataforma:** através de placas adicionais é possível integrar novas funcionalidades que não estejam já disponíveis na *core board*.

O algoritmo de cálculo de localização (no sistema baseado em análise de cenário) usado se baseia nas propostas anteriores e, em sua essência, funciona de maneira idêntica ao cálculo de localização unidirecional apresentado pelo MoteTrack. Entretanto, o algoritmo apresentado pelo MoteTrack necessita de todos os valores de potência medidos antes de conseguir calcular a localização, enquanto o algoritmo apresentado é capaz de calcular a localização de maneira iterativa, aumentando a exatidão do resultado à medida que novos valores são usados.

A obtenção dos dados é um processo que leva tempo, pois para cada dado é necessário que pelo menos uma mensagem seja transmitida. No cenário de teste usado para avaliar a análise de cenário com *Smart-Its* foram usadas cinco potências de emissão diferentes com duas *bridges*: isso significa que, no pior caso, deverão ser disseminadas até cinco mensagens pela rede sem fio e até 10 mensagens pela rede com fio para obter os valores necessários para o cálculo de localização – e este processo deve ser repetido para cada dispositivo a ser localizado. Ou seja, o algoritmo apresentado no MoteTrack oferece pouca escalabilidade se usado em um sistema de localização centralizado, devido à saturação dos canais de comunicação causada pela disseminação de mensagens relativas ao processo de localização. O algoritmo apresentado neste trabalho, por outro lado, oferece

uma escalabilidade muito melhor, pois o número de mensagens usadas para a localização de um dispositivo pode ser adaptado para evitar a saturação, porém impactando na exatidão do cálculo.

A tabela a seguir resume as principais características do SLR do DigiClip e as compara com outros sistemas:

**Tabela 2: Tabela comparativa de características do SLR do DigiClip.**

Característica	DigiClip	Active Badges	RADAR	SpotON	MoteTrack
<i>Técnica de Sensoriamento</i>	Proximidade e Análise de Cenário	Proximidade	Análise de Cenário e Triangulação	Triangulação (Lateração)	Análise de Cenário
<i>Tecnologia</i>	Rádio Freqüência	Infravermelho	Rádio Freqüência	Rádio Freqüência	Rádio Freqüência
<i>Sistema de Coordenadas</i>	Loações Simbólicas e Coordenadas Físicas e Relativas	Loações Simbólicas	Coordenadas Físicas e Relativas	Coordenadas Físicas e Relativas	Coordenadas Físicas e Relativas
<i>Distribuição do Esforço Computacional</i>	Centralizado	Centralizado	Centralizado, mas pode ser distribuído	Centralizado	Distribuído
<i>Escalabilidade</i>	Boa	Ruim	Boa	Média	Boa
<i>Capacidade de Identificação</i>	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
<i>Exatidão e Precisão</i>	Ver item 5.1 deste trabalho	Em nível de sala (desde que exista uma linha de visão)	4.69 metros em 75% dos casos	No mínimo 3 metros	3.1 metros em 80% dos casos
<i>Limitações diversas</i>	Requer pelo menos uma <i>bridge</i> por locação simbólica	Funciona com dificuldade em ambientes com muita luz solar	Funciona apenas com dispositivos que suportam rede IEEE 802.11	O tempo de aquisição dos valores de potência do sinal é de 10 a 20 segundos	Sistema descentralizado, não é adequado à localização em um ambiente empresarial

#### **4.7. Conclusão do Capítulo**

Neste capítulo foi apresentada inicialmente a plataforma de hardware usada para o SLR usado no DigiClip. Esta plataforma foi escolhida devido à sua flexibilidade, assim como à sua tecnologia avançada, dado que é um produto bastante recente e emprega tecnologia mais moderna que as outras plataformas avaliadas.

O algoritmo usado é inovador em sua iteratividade no cálculo da localização: Um algoritmo semelhante foi apresentado no MoteTrack, porém este necessita de todos os dados simultaneamente, e isso o torna inadequado para sistemas onde a escalabilidade é

essencial. A maneira encontrada para melhorar a escalabilidade do sistema foi aprimorar o algoritmo de maneira a torná-lo iterativo. Ou seja, caso as condições de rede ou de carga do servidor chegarem ao limite da saturação, a exatidão do cálculo pode ser diminuída para evitar uma situação de falha.

A escolha de um servidor centralizado para disponibilizar as informações de localização é condizente com o que se espera do sistema: deseja-se disponibilizar a informação de localização de todos os dispositivos de maneira centralizada, e que possa ser integrada com outros serviços de informação da empresa. Entretanto, para evitar que o servidor se torne um ponto único de falha, o seu projeto prevê o suporte a replicação.

## Capítulo 5: Testes de Desempenho e Avaliação do SLR para o DigiClip

Neste capítulo são apresentados os testes e resultados feitos usando o protótipo implementado para o SLR do DigiClip (Figura 27).



Figura 27: Protótipos de dispositivos móveis usados no DigiClip.

### 5.1. Desempenho do SLR Baseado em Análise de Cenário

Os resultados foram avaliados para os casos de uma ou duas *bridges* por sala. Este valor foi escolhido, pois reflete bem o cenário imaginado para o sistema: normalmente haverá apenas uma *bridge* por sala, sendo que em lugares críticos (onde é necessária uma cobertura ininterrupta) podem ser empregadas duas para haver redundância. É importante lembrar que o sistema não impõe nenhuma limitação no número de *bridges* que podem ser associadas a uma determinada locação simbólica, a não ser pelas limitações dos canais de comunicação, no caso, a rede Ethernet.

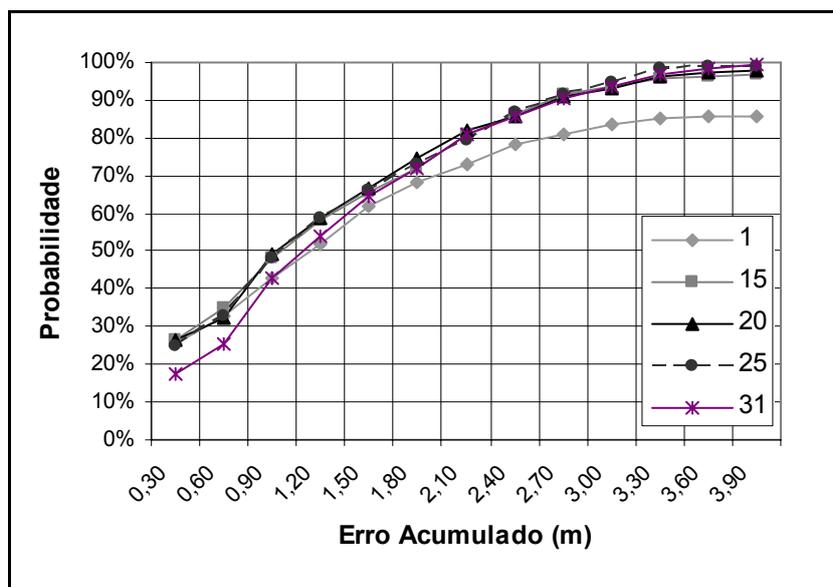
O procedimento de teste foi dividido em duas partes, para avaliar as duas etapas do sistema de localização. O desempenho do sistema baseado em proximidade foi avaliado de maneira bastante informal: um dispositivo foi transportado de sala em sala e as mensagens de identificação foram monitoradas através da interface gráfica. A implementação original, que não fazia uso da medida da potência de sinal, foi bem sucedida na grande maioria dos casos. Entretanto, nas áreas onde havia uma sobreposição da cobertura de duas *bridges* associadas a locações simbólicas diferentes aconteciam oscilações entre as duas locações. Com a introdução da medida da potência do sinal recebido às oscilações foram eliminadas, pois a ambigüidade é resolvida escolhendo a *bridge* que recebe o sinal mais forte.

O teste do sistema baseado em análise de cenário passou por um procedimento de teste mais rigoroso: usando os valores para os diferentes valores de potência de emissão simulamos o cálculo de localização. O processo de simulação é bastante simples e se resume nas seguintes etapas:

1. Escolher aleatoriamente as coordenadas de um ponto entre os 144 coletados;
2. Escolher um conjunto de valores a partir das medições para o ponto escolhido. Este conjunto contém valores retirados das seqüências de 20 valores coletadas durante o levantamento de dados;
3. Usando a lista de pontos de referência, executar o algoritmo apresentado no item 4.4. O ponto retornado pelo algoritmo deveria ter as mesmas coordenadas que as escolhidas no passo 1;
4. Para fins de avaliação, calcular a distância entre as coordenadas escolhidas no passo 1 e as calculadas no passo 3;

Além dos testes básicos foram testados os casos envolvendo a filtragem dos dados de entrada e saída. A filtragem de dados, principalmente através da média dos valores, foi usada em praticamente todos os sistemas anteriores. Os testes permitiram avaliar a eficácia destes procedimentos. Para cada combinação de procedimentos, os testes foram repetidos cem mil vezes.

### 5.1.1. Testes Básicos de Desempenho



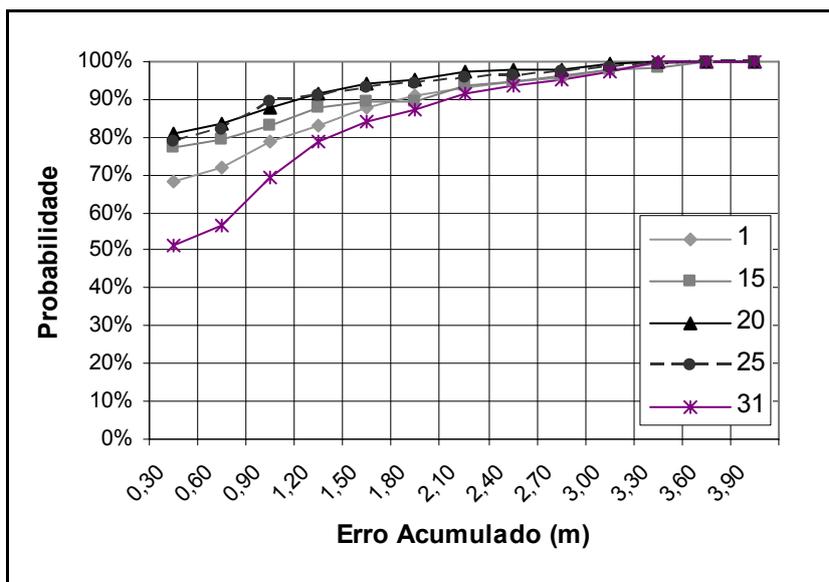
**Figura 28: Comparação de potências de emissão usadas independentemente, com uma *bridge*.**

O primeiro teste efetuado compara a eficácia de diferentes valores de potência de emissão, se usados independentemente. Este teste foi feito usando os dados de apenas uma *bridge*. De certa maneira, este teste simula o comportamento de um sistema como o RADAR: como apenas uma potência de emissão é usada por vez, o domínio da potência de sinal fica limitado ao número de *bridges* sendo usadas.

Na Figura 28 é possível observar que, apesar de pequenas diferenças entre as curvas, todos os valores de potência de emissão se comportam de maneira semelhante, ou seja, que o uso de qualquer valor oferecerá exatidão e precisão semelhantes.

O único valor de potência que não parece desempenhar de maneira satisfatória é o valor mínimo (1). Isso é causado pelo grande número de pontos cegos observados, que, em última instância, são responsáveis pelos 13% que faltam para o sistema atingir o desempenho dos outros valores. De fato, 13% dos pontos medidos são pontos cegos.

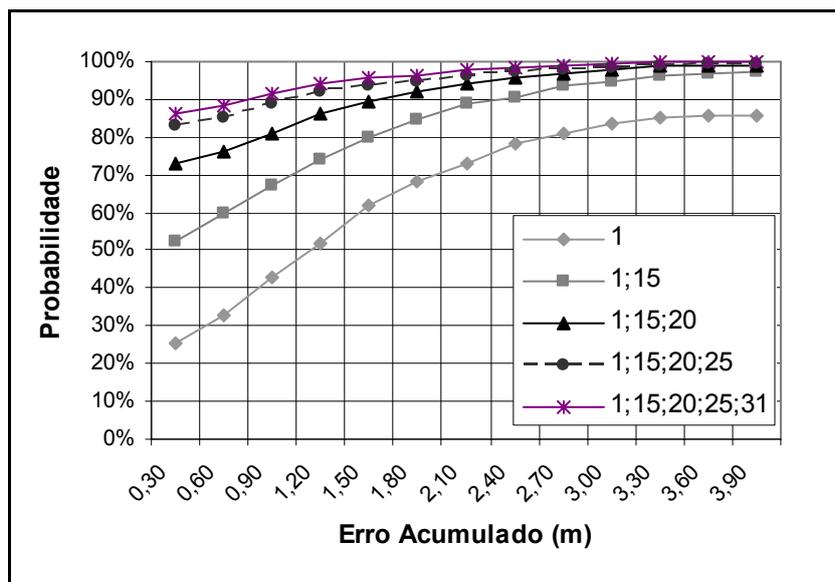
Outra observação interessante é o desempenho pobre para a potência de emissão máxima (31). Conforme o que era esperado, o aumento da potência de emissão causou uma diminuição da sensibilidade do sistema como um todo, pois as flutuações das séries de dados usadas são suficientes para causar uma diferença significativa nas medidas de potência dos sinais recebidos.



**Figura 29: Comparação de potências de emissão usadas independentemente, com duas *bridges*.**

O uso de uma segunda *bridge* aumenta consideravelmente a exatidão do sistema (ver Figura 29). para 75% dos casos o erro cai de 2 metros para menos de 30 centímetros, no melhor caso. Entretanto, a queda de desempenho causada pelo uso dos valores de potência máximo e mínimo se acentua: o valor mínimo consegue compensar os pontos cegos, pois as *bridges* se situam diametralmente opostas em relação à área monitorada, e portanto, os pontos cegos de cada *bridge* não se sobrepõem. Por outro lado, apesar de ser significativamente melhor, a falta de sensibilidade causada pelo uso da potência máxima de emissão não pode ser completamente compensada: o desempenho desta potência é o pior entre os valores testados.

Os resultados observados para o caso usando duas *bridges* confirmam a suspeita de que este modo de funcionamento simula o RADAR: à medida que o número de *bridges* aumenta, aumenta também o domínio da potência do sinal, e portanto, a conversão entre o domínio da potência do sinal e o domínio das coordenadas físicas se torna mais precisa.

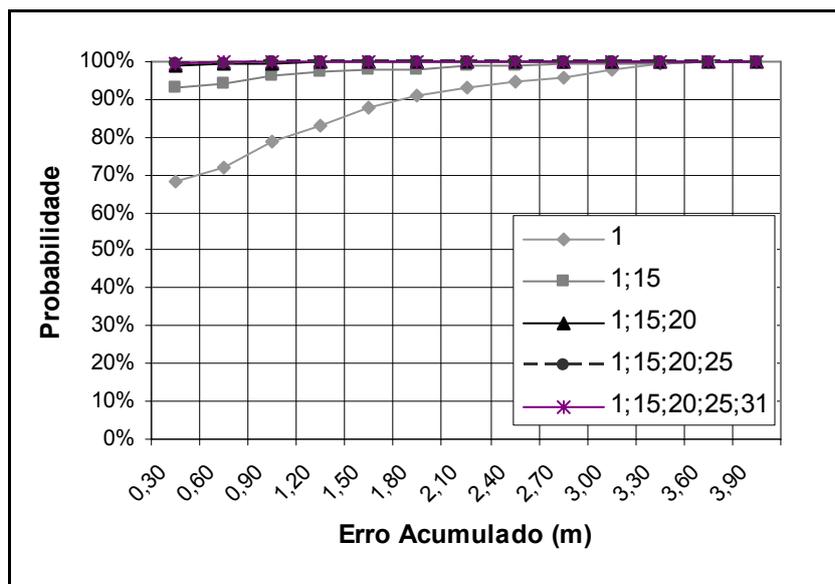


**Figura 30: Comparação de potências de emissão usadas em conjunto, com uma *bridge*.**

O segundo teste comparou a eficácia do uso de diversos valores de potência de emissão em conjunto (ver Figura 30). Este teste permite avaliar quantitativamente o impacto causado pelo uso de diversos valores de potência de emissão simultaneamente comparando o desempenho de diferentes subconjuntos de valores de potência de emissão.

A combinação de diversas potências de emissão oferece um resultado promissor: com apenas dois valores de potência de emissão diferentes a exatidão passa de 2 metros para 1.20 metros para 75% dos casos. Com três valores, 75% dos casos são localizados com um erro inferior a 60 centímetros. Por outro lado, usar mais do que quatro valores de potência de emissão diferentes parece não oferecer um ganho significativo: a precisão sobe de apenas três pontos percentuais para erros de localização de até 30 centímetros.

Este teste simula o comportamento de um sistema semelhante ao MoteTrack: o uso de diferentes potências de emissão expande o domínio da potência de sinal. Entretanto, suspeita-se que, do ponto de vista matemático, diferentes valores de potência de emissão não sejam dimensões completamente independentes. Esta suspeita é confirmada pelo fato que o uso de apenas um valor de potência de emissão com duas *bridges* oferece uma exatidão equivalente à obtida com o uso de quatro valores diferentes de potência de sinal com uma *bridge*.



**Figura 31: Comparação de potências de emissão usadas em conjunto, com duas *bridges*.**

O teste com duas *bridges*, usando vários valores de potência de emissão, pode ser considerado o caso ótimo, pois o domínio da potência do sinal possui as propriedades de todos os casos apresentados anteriormente.

Os resultados obtidos são muito bons: com apenas dois valores de potência de emissão, o sistema localiza 93% dos casos com um erro inferior a 30 centímetros. Com três valores a precisão é de 99%. O uso de mais valores de potência causa um aumento praticamente nulo na precisão do sistema.

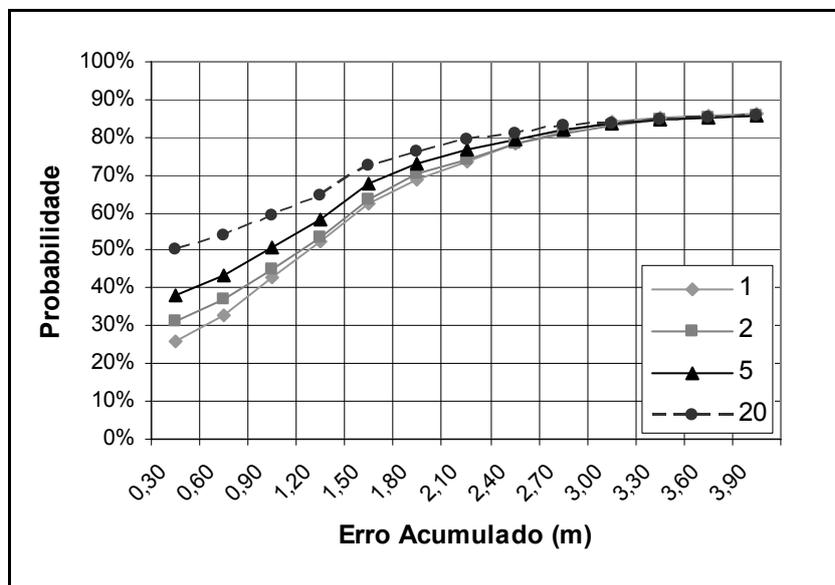
Contudo, estes valores devem ser analisados levando em conta o contexto usado para o levantamento dos dados: como foi usado um ambiente praticamente livre de interferências, os resultados apresentados oferecem uma idéia da melhor exatidão possível com este sistema. Na prática, interferências diversas causaram um desempenho inferior ao obtido nestes testes.

Para tentar contornar ou suavizar estas interferências, outros sistemas aplicam algum tipo de filtragem de dados. Muitas vezes, esta filtragem é simplesmente uma média de vários valores de entrada ou de saída.

### 5.1.2. Testes Usando Filtragem dos Valores de Entrada

A filtragem dos valores de entrada tem por objetivo eliminar flutuações rápidas nos valores medidos, normalmente causadas por eventos como a passagem de pessoas e a movimentação de portas. Esta filtragem pode ser feita obtendo várias medidas do mesmo

sinal e calculando a média dos valores obtidos. Como a média tem a propriedade matemática de funcionar como um filtro para baixas frequências, perturbações de curta duração são eliminadas. Este artifício é usado, por exemplo, pelo MoteTrack.

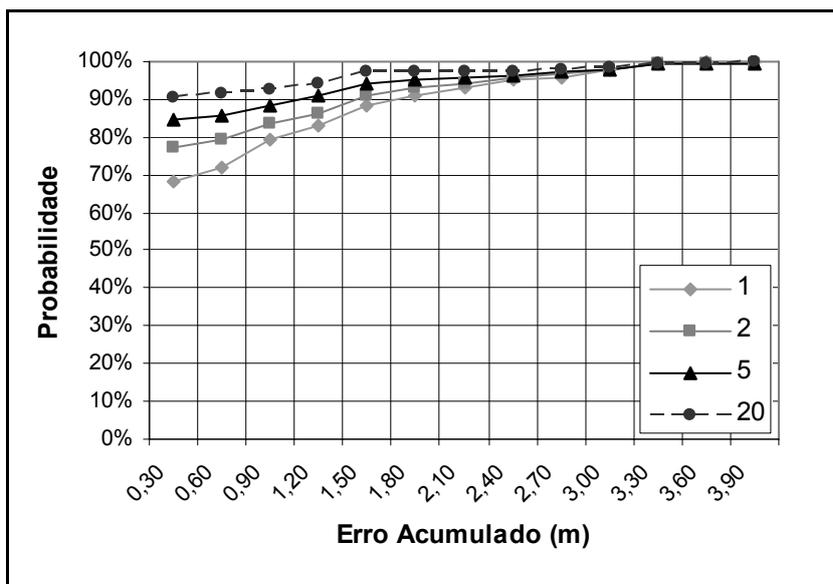


**Figura 32: Desempenho usando filtragem de dados de entrada, com uma *bridge*.**

Do ponto de vista da simples localização, a filtragem dos dados de entrada é benéfico (ver Figura 32). Quanto mais valores são usados para a média, melhor é a precisão do sistema. Fazendo a média de dois valores a precisão do sistema é de 30% para um erro de até 30 centímetros. A média de 20 valores aumenta a precisão para 50% dos casos.

Entretanto, a filtragem apresenta alguns inconvenientes. Primeiramente, a filtragem dos valores de entrada não oferece ganhos superiores ao uso de diferentes valores de potência de emissão, pois a exatidão obtida com a média de 20 valores é equivalente à obtida com o uso de apenas dois valores diferentes de potência de emissão.

Além disso, a filtragem impacta no desempenho do rastreamento, pois a média irá atenuar também as mudanças causadas naturalmente pelo deslocamento do dispositivo. De fato, do ponto de vista matemático, qualquer modificação na posição do dispositivo será atrasada pela constante de tempo introduzida pela média.

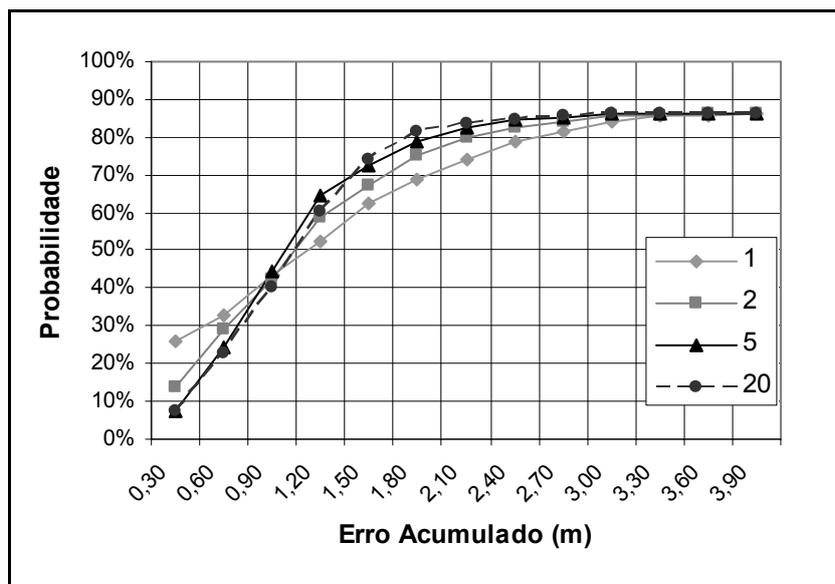


**Figura 33: Desempenho usando filtragem de dados de entrada, com duas *bridges*.**

O uso de filtragem com duas *bridges* apresenta resultados semelhantes aos outros testes envolvendo mais de uma *bridge*. A exatidão do sistema é significativamente melhorada, porém como no caso anterior, a exatidão obtida usando uma média de 20 valores ainda é inferior à obtida com apenas dois valores diferentes de potência de emissão.

### 5.1.3. Testes Usando Filtragem dos Valores de Saída

A filtragem dos valores de saída tem por objetivo suavizar a conversão do domínio da potência do sinal para o domínio das coordenadas físicas. Como indicado anteriormente, esta conversão é discreta, ou seja, pode ser feita apenas através dos pontos conhecidos. A filtragem é normalmente feita através da média das coordenadas dos pontos que oferecem a melhor conversão. Este artifício é usado no RADAR.



**Figura 34: Desempenho usando filtragem de dados de saída, com uma *bridge*.**

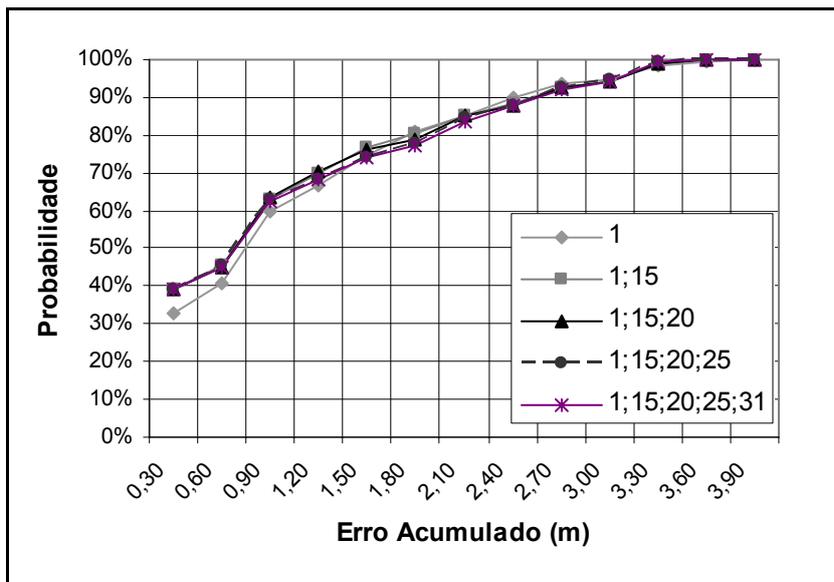
Ao contrário da filtragem de entrada, a filtragem das coordenadas dos melhores pontos retornados pelo algoritmo não parece ser sempre benéfica. Na verdade, a filtragem de valores de saída oferece um compromisso entre a exatidão de curto alcance contra a exatidão de longo alcance. Mais especificamente, quanto mais pontos são incluídos na média das coordenadas, menor é a precisão do sistema para erros pequenos.

A explicação para este comportamento é simples: não existe garantia de que todos os pontos mais próximos dos valores medidos (no domínio da potência do sinal) estejam também fisicamente mais próximos da localização correta. Ou seja, supõe-se que a média das coordenadas dos melhores pontos seja benéfica apenas para sistemas que possuem uma baixa densidade de pontos de referência.

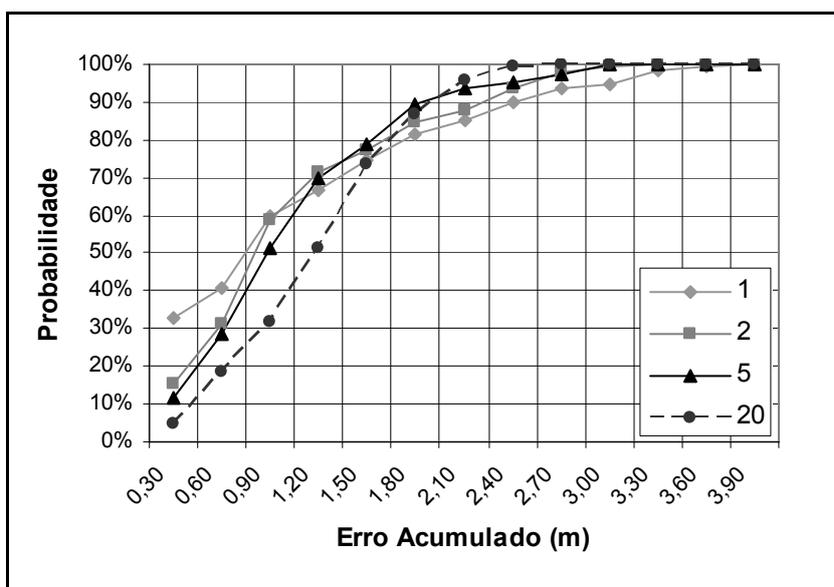
O uso de duas *bridges* não influencia a exatidão do sistema, exceto pela eliminação do *offset* causado pelos pontos cegos.

#### 5.1.4. Testes Usando Subconjuntos dos Pontos de Referência

Tendo observado o pobre desempenho da filtragem de saída, uma nova série de testes foi executada para confirmar a hipótese de que a filtragem de saída é benéfica apenas para sistemas com baixas densidades de pontos de referência. Para isso, o conjunto de pontos de referência original foi truncado, e o algoritmo de cálculo da localização teve acesso apenas a um subconjunto do mesmo durante a simulação.



**Figura 35: Desempenho para um subconjunto com 25% dos pontos de referência, com duas *bridges*.**



**Figura 36: Desempenho para um subconjunto com 25% dos pontos de referência, usando filtragem de saída e com duas *bridges*.**

Os testes confirmaram que para menores densidades de pontos de referência a filtragem das coordenadas retornadas através da média dos melhores pontos parece oferecer um desempenho melhor (ver Figura 35 e Figura 36). O ganho observável é pequeno, mas acredita-se que o ganho venha a ser mais significativo com uma maior diminuição da densidade de pontos de referência. Estes resultados confirmam os resultados apresentados no RADAR, que indicavam uma melhoria de 48% em seu desempenho ao fazer a média dos 4 melhores resultados.

## 5.2. Implementação do Servidor de Localização

O servidor de localização foi implementado em Java. Esta escolha foi motivada por duas razões: primeiramente, o uso de Java permite a implementação de um servidor portátil entre plataformas; em segundo lugar, a integração com plataformas de serviço voltados para a Internet é facilitada. De fato, o versão atual é distribuída na forma de uma *webapp* para o servidor Tomcat [26].

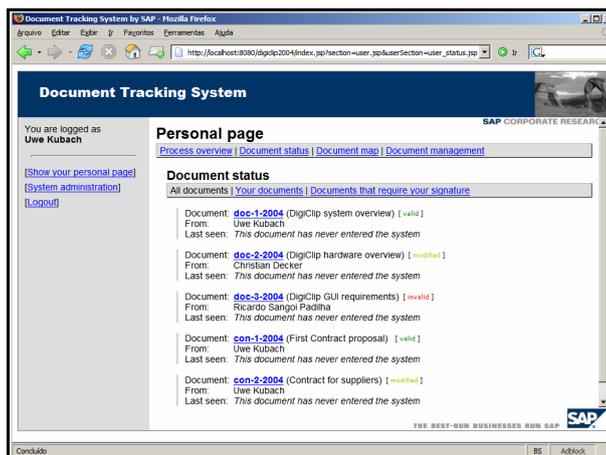


Figura 37: Interface *web* para o servidor de localização.

A interface *web* oferece o acesso completo aos dados do servidor: é possível ver um mapa do ambiente com a localização de cada dispositivo e obter mais informações sobre cada objeto associado. Para isso, cada usuário recebe uma conta no servidor que lhe permite adicionar, manipular e localizar documentos (ver Figura 37).

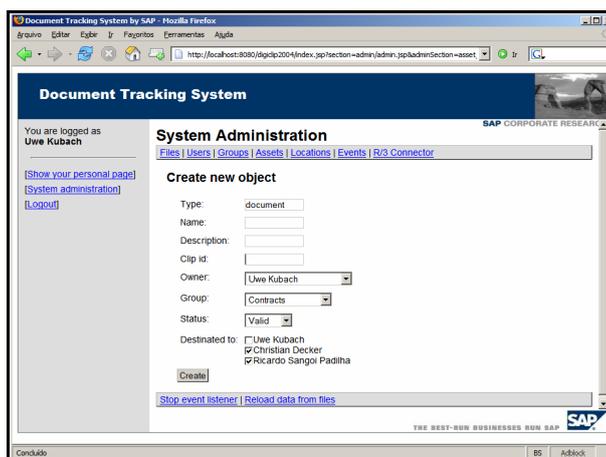
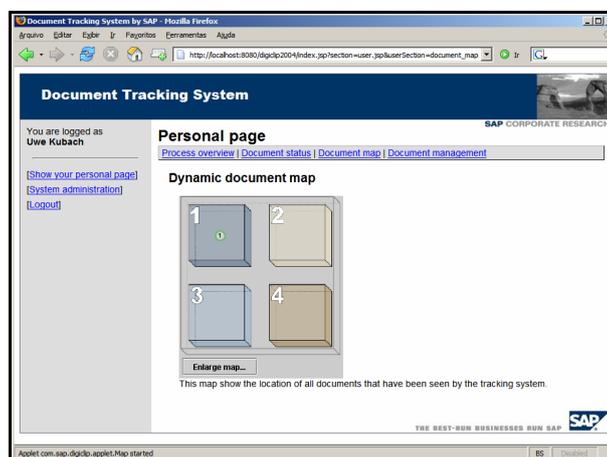


Figura 38: Associação de um documento eletrônico com a versão impressa.

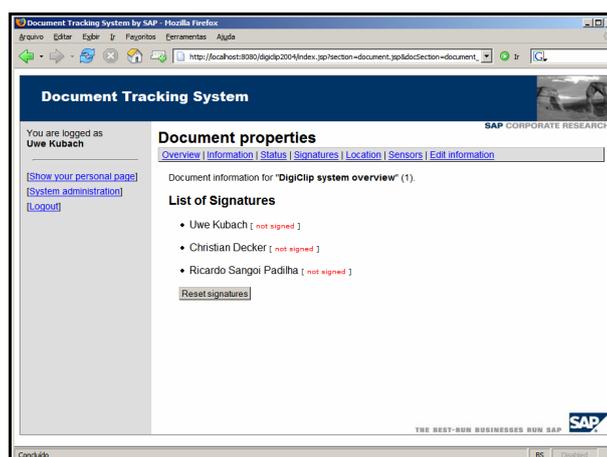
O processo de gerenciamento é bastante simples: cada vez que um usuário deseja associar um documento impresso com sua versão eletrônica, basta indicar o identificador

do dispositivo móvel que vai ser anexado ao documento (ver Figura 38). A partir do momento que o documento é associado a um dispositivo móvel, ele passa a ser rastreado pelo sistema. A interface permite então ao usuário saber a posição atual do documento impresso ou acompanhar em tempo real o seu deslocamento (ver Figura 39).



**Figura 39: Mapa de localização de documentos em tempo real.**

Entre as informações armazenadas pelo servidor de localização, podemos citar o histórico de assinaturas e o estado do documento. Estas informações são definidas durante a associação com o dispositivo móvel: o usuário escolhe quais outros usuários devem assinar o documento e o estado atual do mesmo. A interface permite então que o histórico de assinaturas seja listado a qualquer momento (ver Figura 40).



**Figura 40: Histórico de assinaturas de um documento.**

O estado do documento é representado por três valores possíveis: Válido, Modificado e Inválido. Estes valores significam:

- **Válido:** o documento não foi alterado, ou seja, pode ser avaliado e assinado;

- **Modificado:** o documento sofreu pequenas alterações que não modificam sua essência, como por exemplo, correções ortográficas ou gramaticais;
- **Inválido:** a estrutura do documento foi alterada de maneira substancial, ou seja, uma nova versão está disponível e esta versão deve ser abandonada.

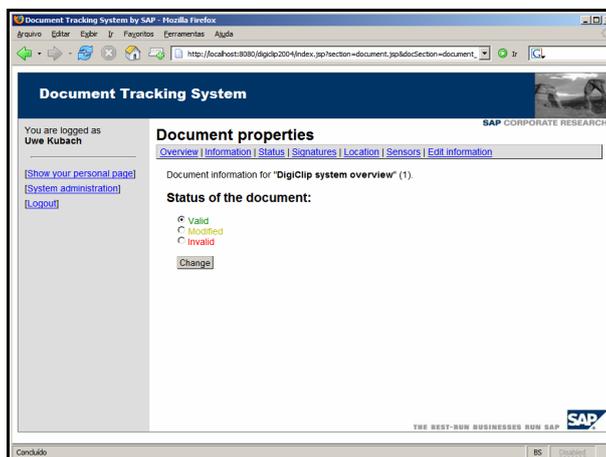


Figura 41: Indicação do estado de um documento.

Na interface gráfica, os usuários podem visualizar esta informação pela cor que é usada para representar o documento: um documento válido é verde, um documento modificado é amarelo, e um documento inválido é vermelho (ver Figura 41).

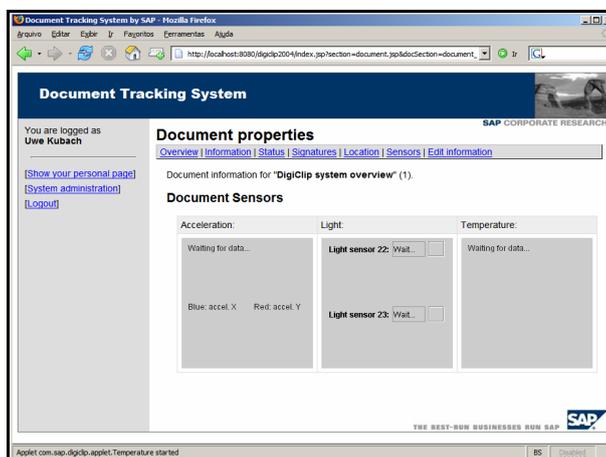


Figura 42: Mostradores dos sensores do documento.

Finalmente, a fim de testar a flexibilidade do sistema, foram integrados com a interface gráfica os sensores disponíveis na placa adicional: com uso de *applets* Java, é possível observar em tempo real os valores dos sensores de aceleração, luminosidade e temperatura da placa adicional (ver Figura 42).

### 5.3. Considerações Sobre a Escalabilidade do Sistema

A divisão do processo de localização em duas etapas contribui para o aumento da escalabilidade do sistema. A primeira etapa, que executa a localização usando apenas proximidade, depende apenas da largura de banda do canal de comunicação sem fio. Com apenas uma mensagem é possível identificar a localização de qualquer dispositivo ao nível de sala.

A segunda etapa (localização baseada em análise de cenário) é mais complexa e custosa em quantidade de mensagens trocadas: os *Smart-Its* usam um protocolo TDMA e cada mensagem pode ter uma duração máxima de 13 ms. Ou seja, do ponto de vista teórico, é possível transferir até 77 mensagens por segundo. Como a largura de banda da rede Ethernet é muito superior à do canal de comunicação sem fio dos *Smart-Its*, iremos desconsiderar as limitações da mesma.

Usando a seqüência de dados mais completa, ou seja, os valores medidos para cinco potências de emissão diferentes, serão necessárias cinco mensagens, ou seja, 65 ms por dispositivo. Este valor desconsidera eventuais filtragens dos valores de entrada, que necessitariam ainda mais mensagens.

Se todas as medidas tivessem que estar disponíveis ao mesmo tempo para efetuar o cálculo da localização, cada *bridge* poderia apenas fornecer medidas simultaneamente para 15 dispositivos. Entretanto, usando o algoritmo apresentado no item 4.4 é possível localizar dispositivos usando a análise de cenário com apenas um subconjunto das medidas, e aprimorar a localização de acordo com a carga do canal de comunicação. De fato, conforme os resultados apresentados no item anterior, com apenas uma mensagem é possível localizar 75% dos casos com um erro inferior a 2 metros. Desta maneira é possível atingir o limite do canal de comunicação sem fio: cada *bridge* poderia fornecer medidas para 77 dispositivos em um segundo.

O protótipo do servidor de localização foi implementado em Java e integrado em um servidor de aplicações Tomcat. A versão atual é capaz de processar até 15 mensagens por segundo. Este valor é relativamente baixo, porém é bastante satisfatório, dado que a versão não foi otimizada para o processamento de grandes volumes de mensagens. Melhorias na velocidade de processamento podem ser implementadas facilmente: uma versão que

fizesse uso da biblioteca Java NIO [27] ao invés da biblioteca tradicional de comunicação do Java poderia triplicar<sup>7</sup> o número de mensagens processadas por segundo.

#### 5.4. Considerações Sobre a Expansibilidade do Sistema

Entre os problemas observados com sistemas de gerenciamento de *workflow* tradicionais, foi salientada sua incapacidade de manter coerente o estado de versões eletrônicas e impressas de documentos.



**Figura 43: Protótipo de dispositivo móvel com LEDs acesos.**

A versão atual do sistema tenta resolver o problema de integração do documento eletrônico com a versão impressa através de uma placa de sensores adicional, que é acoplada ao DigiClip para oferecer o *feedback* necessário para manter a coerência entre as diferentes representações do documento. Esta placa adicional contém as seguintes características:

- **Um conjunto de LEDs** que podem ser usados para a indicação visual sobre o estado do documento;
- **Um botão** que pode ser usado para enviar algum tipo de notificação para o servidor;
- **Diversos sensores** que fornecem informações sobre o contexto do dispositivo.

Os LEDs foram usados para apresentar o estado do documento conforme a informação disponível no servidor: um LED verde indica que o documento é válido, um

---

<sup>7</sup> Testes simples feitos com a manipulação de *byte arrays* indicam um aumento da velocidade de processamento por um fator de 3 nas operações de leitura e armazenamento de dados. Uma explicação mais detalhada do procedimento de teste está disponível em: [http://jroller.com/page/cpurdy/20040405#raw\\_nio\\_performance](http://jroller.com/page/cpurdy/20040405#raw_nio_performance)

LED amarelo indica que o mesmo foi modificado e um LED vermelho indica que o documento é inválido. A atualização dos LEDs é feita de acordo com a disponibilidade dos dispositivos móveis: caso o dispositivo móvel esteja ao alcance da infra-estrutura, a atualização é feita imediatamente; caso contrário, o servidor coloca o pedido de atualização em uma fila de espera até que o dispositivo volte a entrar em contato com a infra-estrutura.

O botão foi usado para implementar um mecanismo de notificação: por exemplo, cada vez que um usuário termina de avaliar e assina um documento que lhe é destinado, este pressiona o botão no dispositivo móvel para enviar uma notificação ao servidor de localização. O envio é confirmado por um LED azul no dispositivo. O servidor pode então notificar outros sistemas que, por exemplo, serão responsáveis por encaminhar o documento impresso para os outros usuários.

Para que o sistema de notificação funcione de maneira correta, é necessário identificar o usuário que está pressionando o botão. A solução encontrada para este problema foi o desenvolvimento de pequenos “crachás” baseados na mesma plataforma: cada usuário, ao ser cadastrado no servidor de localização, é associado a um crachá. Para habilitar a função de notificação pelo botão, o dispositivo móvel do documento precisa detectar a presença de um crachá: se não houver nenhum crachá próximo ao documento, o botão simplesmente não funciona e um LED vermelho indica que a operação foi rejeitada. Se um crachá for detectado, o dispositivo móvel envia uma mensagem contendo sua identificação e a identificação do crachá.

Para evitar preocupações relacionadas com o rastreamento de indivíduos, os crachás foram especialmente construídos para ter um alcance extremamente limitado: os sinais emitidos por um crachá podem ser recebidos apenas à distância de um braço. Além disso, os crachás permanecem “mudos” até receber um pedido de identificação do dispositivo de um documento. Apenas quando este pedido de identificação é recebido, o crachá envia uma mensagem de resposta contendo a sua identificação. Finalmente, o servidor ignora quaisquer mensagens recebidas que não contenham pelo menos a identificação de um documento. Obviamente, ainda é possível estimar a localização de um usuário a partir das notificações.

O processo de identificação é bastante simples, porém eficaz: o servidor de localização é capaz de identificar com exatidão absoluta o usuário e o momento em que o botão foi pressionado. Do ponto de vista de segurança, o processo poderia ser bastante

aprimorado, mas o estudo da segurança do sistema como um todo foge ao escopo deste trabalho.

Os diversos sensores colocados na placa adicional também permitiram avaliar novos cenários de uso do dispositivo. O sensor de luminosidade poderia ser usado para determinar se o documento se encontra sob uma pilha de outros documentos, ou dentro de uma gaveta. Os outros sensores, apesar de não serem de grande utilidade para o cenário de rastreamento de documentos, poderiam ser facilmente empregados em outras situações dentro de uma empresa: caso o SLR fosse usado para rastrear outros pertences da empresa, como por exemplo, projetores para apresentações, a medida da temperatura poderia indicar se o projetor está em uso ou não.

## **5.5. Conclusão do Capítulo**

Os testes feitos com a implementação do sistema de localização e rastreamento para o DigiClip permitiram confirmar as características desejadas: o desempenho do sistema baseado em análise de cenário ofereceu uma exatidão surpreendente no melhor caso, e a escalabilidade do sistema pôde ser comprovada através das características do sistema.

Graças à plataforma de *hardware* escolhida, a implementação das diversas funcionalidades necessárias para a integração entre o documento eletrônico e a versão impressa foi relativamente simples: tanto a transferência de informações do servidor para o dispositivo móvel como no sentido contrário foram facilitados pela flexibilidade da plataforma, e com apenas uma placa adicional foi possível oferecer toda a funcionalidade necessária e até experimentar com novos cenários de uso para o sistema.

O sistema de notificação teve de ser aprimorado para levar em conta a identidade do usuário interagindo com o documento impresso. Com isso surgiu a necessidade de implementar um mecanismo de identificação simples, baseado em uma troca de mensagens entre o dispositivo do documento e um crachá que identifica unicamente o usuário. Para evitar problemas de invasão de privacidade, a potência e o alcance do crachá foram limitados e o protocolo de comunicação entre o dispositivo do documento e o crachá se resume a uma troca de mensagens.

## Capítulo 6: Considerações Finais e Perspectivas Futuras

A escolha de um sistema de localização e rastreamento (SLR) voltado para o uso em ambientes fechados ainda oferece uma série de desafios: a natureza mutável do ambiente, as diversas fontes de interferência e a complexidade de modelagem matemática são restrições que devem ser cuidadosamente consideradas.

Por causa destas restrições, os diversos trabalhos existentes na área oferecem soluções voltadas para a solução de apenas alguns destes problemas. Normalmente, os SLRs são projetados de maneira a resolver um problema específico, dentro de uma aplicação bem definida.

O DigiClip surgiu com a mesma premissa: permitir a localização e rastreamento de documentos impressos dentro de uma empresa. Para isto, foram desenvolvidos dispositivos na forma de cliques, e que podem ser anexados aos documentos monitorados. Usando estes dispositivos, o sistema projetado e implementado neste trabalho oferece uma série de propriedades necessárias para a aplicação em ambiente empresarial:

- **Tolerância a faltas através do suporte à replicação:** o SLR é capaz de tolerar faltas de hardware e oferece um funcionamento ininterrupto, se inserido em um contexto que gerencie a replicação. Isso é possível graças ao uso de comunicação via difusão de mensagens (*broadcast*), ao invés de uma conexão ponto-a-ponto;
- **Escalabilidade e degradação suave do serviço:** o SLR oferece uma boa escalabilidade, pois oferece duas modalidades de localização (por proximidade e análise de cenário), que são usadas de maneira complementar. Além disso, graças ao uso de um algoritmo de localização iterativo, o cálculo da localização pode ser

degradado de maneira suave, conforme a disponibilidade do canal de comunicação sem fio;

- **Expansividade e adaptabilidade:** tanto o servidor como o *hardware* permitem a adição de funcionalidade que não foi prevista no projeto do sistema. Mais especificamente, placas adicionais podem ser fabricadas para implementar todas as funcionalidades necessárias para aplicação desejada.

Este trabalho também introduz um novo algoritmo de cálculo de localização através de análise de cenário. Este algoritmo inova em relação às propostas anteriores por funcionar de maneira iterativa. Com o recebimento de apenas uma medida de potência de sinal já é possível calcular a localização de um dispositivo, mesmo que com baixa exatidão. A cada nova medida o algoritmo consegue aumentar a exatidão do cálculo de maneira significativa, chegando a um erro de localização inferior a 30 centímetros para 99% dos casos. Estes resultados já foram submetidos e aceitos na forma de um artigo para o quinto *International Workshop on Smart Appliances and Wearable Computing* (IWSAWC 2005) [28].

Por outro lado, foi observado que a exatidão do algoritmo depende fortemente da qualidade e densidade das medidas dos pontos de referência. A plataforma usada, *Smart-Its*, oferece o *hardware* necessário para a aquisição de dados de alta qualidade, pois a conversão analógico-digital das medidas é feita usando 10 *bits*. Entretanto, testes indicam que a diminuição da densidade de pontos de referência causa uma diminuição proporcional na exatidão e precisão do sistema.

Para validar o sistema foi projetado e desenvolvido um servidor de localização. O servidor de localização funciona de maneira adequada para os propósitos de validação do sistema: a implementação atual, em Java, é capaz de processar 15 mensagens por segundo e oferece uma interface convívial através de uma aplicação *web* para o servidor Tomcat. O servidor é facilmente instalado, e diversas réplicas podem funcionar em paralelo sem conflitos.

A versão atual do sistema permite uma maior integração entre documentos eletrônicos e suas versões impressas. Esta integração é feita, primeiramente, através de LEDs no dispositivo móvel, que apresentam o estado do documento eletrônico. Esta

informação sobre o estado do documento é atualizada nos dispositivos móveis imediatamente após qualquer mudança feita no servidor.

A integração é completada por um sistema de notificação, na forma de um botão, que é usado para informar o servidor que um determinado usuário terminou de avaliar ou assinou um determinado documento. Para identificar o usuário que está apertando o botão, foi necessário criar um outro dispositivo, um crachá, que é usado pelos usuários para identificá-los. Este crachá interage com o dispositivo do documento no momento em que o botão é pressionado e envia a identificação do usuário junto com a notificação. Se nenhum crachá está presente no momento que o botão é pressionado, a notificação não é enviada.

Graças ao uso da notificação e do rastreamento dos dispositivos móveis, o sistema é capaz de oferecer informação atualizada automaticamente na interface gráfica e no dispositivo móvel.

### **6.1. Perspectivas Futuras**

Apesar do sistema ter cumprido com todos os objetivos definidos para este trabalho, existe uma série de pontos que poderiam ser aprimorados ou aprofundados.

Primeiramente, o sistema usa um modelo de comunicação *push* para a notificação da posição de um dispositivo. Ou seja, cada dispositivo periodicamente envia uma mensagem que é usada para identificar a sua locação e, se necessário, calcular a sua localização. Este modelo de comunicação usado talvez não seja o mais adequado para todos os casos, principalmente se levarmos em conta o ciclo de vida de um documento.

Documentos têm um ciclo de vida que pode ser dividido em duas etapas: uma etapa ativa, na qual o documento é criado, corrigido, avaliado e manipulado constantemente; e uma etapa passiva, que corresponde ao arquivamento do documento.

Durante a etapa ativa, é necessário saber a locação de um documento a qualquer instante. Ou seja, o modelo de comunicação *push* é o mais adequado. Entretanto, este modelo de comunicação é mais custoso do ponto de vista do consumo de energia.

Durante a etapa passiva, a locação de um documento é constante por longos períodos de tempo. Neste caso um modelo de comunicação *pull*, onde o sistema iniciaria um pedido ao dispositivo para o que mesmo se identifique, faz mais sentido não somente do ponto de

---

vista energético, mas também evita a saturação do canal de comunicação sem fio em áreas de estocagem, que podem conter centenas ou milhares de documentos.

Os testes com a densidade de pontos de referência indicam uma proporção direta entre a densidade e a exatidão do sistema. Entretanto, trabalhos como o MoteTrack indicam que existe um valor limite de pontos de referência que é suficiente para o cálculo da localização. O valor limite de densidade obtido pelo MoteTrack e as densidades usadas neste trabalho são bastante diferentes: trabalhos futuros poderiam avaliar quais características influenciam a densidade mínima de pontos de referência necessária.

Finalmente, apesar da arquitetura do servidor de localização ter sido escolhida de maneira adequada para o problema abordado neste trabalho, o desempenho do mesmo ainda é insuficiente para uso em um ambiente de produção. Este problema pode ser resolvido, primeiramente, com a migração da implementação para uma biblioteca de funções de entrada e saída mais eficazes, como a Java NIO. Testes de desempenho feitos por terceiros com a nova biblioteca indicam um aumento potencial de pelo menos três vezes no volume de mensagens processadas por segundo. A carga também pode ser distribuída entre diversos servidores particionando os elementos da infra-estrutura: por exemplo, cada servidor pode estar conectado apenas as *bridges* de um andar. Esta solução requer também algum tipo de sincronização dos dados entre os diversos servidores.

Os dispositivos usados atualmente oferecem apenas um subconjunto limitado de funcionalidades possíveis neste sistema. Por exemplo, no lugar de LEDs, a informação sobre o estado do sistema poderia ser apresentada usando algum tipo de LCD: desta maneira, outras informações sobre o documento poderiam ser encaminhadas para o dispositivo móvel. Esta expansão pode ser facilmente implementada: a funcionalidade necessária para o envio de texto já está disponível no sistema.

O mecanismo usado para identificar um usuário é extremamente simples e vários problemas relacionados com a segurança podem ser facilmente identificados. De fato, os aspectos de segurança do sistema não foram avaliados neste trabalho. Entretanto, uma avaliação completa dos aspectos de segurança é necessária antes da implantação deste sistema em um ambiente corporativo.

Estes possíveis aprimoramentos do sistema já estão sendo discutidos no grupo de desenvolvimento do DigiClip para se tornarem parte da segunda revisão do sistema.

## Referências Bibliográficas

- [1]. H. Kopetz and W. Ochsenreiter, "Clock synchronization in distributed real-time systems," IEEE Transactions on Computers, Vol. 36, No. 8, Aug. 1987, pp. 933-940.
- [2]. R. Want et al., "The Active Badge Location System," ACM Transactions on Information Systems, Vol. 10, No. 1, Jan. 1992, pp. 91-102.
- [3]. D. Powell, Delta-4: A Generic Architecture for Dependable Distributed Computing, Springer-Verlag, Mar. 1992.
- [4]. Federal Communications Commission, "Revision to the commission's rules to ensure compatibility with enhanced 911 emergency calling system," July 1996, CC Docket no. 94-102.
- [5]. A. Ward, A. Jones and A. Hopper, "A New Location Technique for the Active Office," IEEE Personal Communications Magazine, Vol. 4, No. 5, October 1997, pp. 42-47.
- [6]. U. Leonhardt, Supporting Location-Awareness in Open Distributed Systems, doctoral dissertation, University of London, May 1998.
- [7]. P. Bahl and V.N. Padmanabhan, "User Location and Tracking in an In-Building Radio Network," Tech. Report MSR-TR-99-12, Microsoft Research, Feb. 1999.
- [8]. P.H. Dana, "Global Positioning System Overview," [http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps\\_f.html](http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html) (current Jan. 2000).
- [9]. J. Hightower, R. Want and G. Borriello, "SpotON: An Indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength," Tech Report UW CSE 00-02-02, University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, Seattle, WA, February 2000.
- [10]. P. Bahl, V. N. Padmanabhan, and A. Balachandran, "Enhancements to the RADAR User Location and Tracking System," Tech. Report MSR TR-00-12, Microsoft Research, Feb. 2000.
- [11]. P. Bahl, V. N. Padmanabhan, "Radar: An In-Building RF-based User Location and Tracking System," Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Vol. 2, Tel-Aviv, Israel, Mar. 2000, pp. 775-784.
- [12]. N. Bulusu, J. Heidemann and D. Estrin, "GPS-less low-cost outdoor localization for very small devices," IEEE Personal Communications Magazine, Vol. 7, No. 5, Oct. 2000, pp. 28-34.

- 
- [13]. J. Hightower and G. Borriello, "Location Sensing Techniques," Tech. Report UW CSE 01-07-01, University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, Seattle, July 2001.
- [14]. J. Hightower and G. Borriello, "Location Systems for Ubiquitous Computing," IEEE Computer, Vol. 34, No. 8, IEEE Computer Society Press, Aug. 2001, pp. 57-66.
- [15]. J. Hightower and G. Borriello, "A Survey and Taxonomy of Location Sensing Systems for Ubiquitous Computing," Tech. Report UW CSE 01-08-03, University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, Seattle, Aug. 2001.
- [16]. I.F. Akyildiz et al., "A Survey on Sensor Networks," IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 8, Aug. 2002.
- [17]. J. Hill and D. Culler, "Mica: A Wireless Platform for Deeply Embedded Networks," IEEE Micro, Vol. 22, No. 6, Nov./Dec. 2002, pp. 12-24.
- [18]. D. Saha, A. Mukherjee, "Pervasive Computing: A Paradigm for the 21<sup>st</sup> century," IEEE Computer Society, March 2003, pp. 25-31.
- [19]. M. Beigl and H. Gellersen, "Smart-Its: An Embedded Platform for Smart Objects," Proceedings of the Smart Objects Conference, Grenoble, France, May 2003.
- [20]. "The Disappearing Computer Initiative," <http://www.disappearing-computer.net/> (current Oct. 2003).
- [21]. C. Wood "VOR Navigation," <http://www.navfltsm.addr.com/vor-nav.htm>, "VOR Basics," (current 2004).
- [22]. C. Decker et al., "DigiClip: Activating Physical Documents," Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems, IEEE Computer Society, Tokyo, Mar. 2004, pp. 388-393.
- [23]. A. Smith et al., "Tracking Moving Devices with the Cricket Location System," Proceedings of the 2<sup>nd</sup> USENIX/ACM MOBISYS Conference, Boston, June 2004.
- [24]. K. Lorincz, M. Welsh, "A Robust, Decentralized Approach to RF-Based Location Tracking," Tech. Report TR-19-04, Harvard University, Sep. 2004.
- [25]. The Workflow Management Coalition, "About WfMC," <http://www.wfmc.org/about.htm> (current Jan. 2005).
- [26]. The Apache Jakarta Project, "Jakarta Tomcat," <http://jakarta.apache.org/tomcat/> (current Jan. 2005).
- [27]. Sun Java Documentation, "New I/O APIs," <http://java.sun.com/j2se/1.5.0/docs/guide/nio/> (current Jan. 2005).
- [28]. R. S. Padilha, U. Kubach, "Quantitative Evaluation of Location Systems Techniques for Short-Range RF-Based Sensor Networks," Proceedings of the 5th International Workshop on Smart Appliances and Wearable Computing, Columbus, Ohio, June 2005 (submetido a publicação).