



UNIVERSIDADE DE COIMBRA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA INFORMÁTICA

# Localização no Interior de Edifícios Recorrendo a Assinaturas GSM

Marco António Morais Veloso

Coimbra  
Setembro de 2007

# **Localização no Interior de Edifícios Recorrendo a Assinaturas GSM**

Marco António Morais Veloso

Dissertação submetida à Universidade de Coimbra para a obtenção do grau de Mestre em Informática e Sistemas, sob a orientação do Prof. Doutor Carlos Lisboa Bento, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Informática da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.



## Resumo

A capacidade de determinar a localização é uma característica importante em muitos sistemas ubíquos. Esta questão toma relevante interesse no interior de edifícios, onde o processo de localização se torna mais complexo devido à existência de inúmeros obstáculos físicos que impedem a aplicação de abordagens adequadas para o exterior, como o *Global Positioning System* (GPS).

Várias técnicas foram aplicadas, baseadas em diferentes tecnologias, recorrendo, na sua generalidade, a infra-estruturas dedicadas, o que torna este processo oneroso. Recentes abordagens procuraram analisar as assinaturas produzidas pelas redes de Rádio Frequência (RF), como as *Wireless Fidelity* (Wi-Fi) e *Global System for Mobile Communications* (GSM) que eliminam o peso de uma infra-estrutura dedicada.

O presente trabalho procura apresentar uma abordagem alternativa ao processo de localização no interior de edifícios, recorrendo às assinaturas GSM e apoiado num algoritmo de predição baseado em instâncias. Para este efeito, estudou-se o comportamento dos sinais de Rádio-Frequência GSM em edifícios com topologias distintas e desenvolveu-se um algoritmo de predição.

O algoritmo desenvolvido permitiu uma pequena melhoria na precisão do processo localização comparativamente aos algoritmos tradicionalmente aplicados. Esta abordagem surge assim como uma alternativa aos mecanismos de localização no interior de edifícios.

## **Abstract**

The ability to fix the location is an important characteristic in many ubiquitous systems. This question is especially relevant when we are dealing with indoor environments where the location process become more complex due the amount of physical obstacles that prevent the use of approaches applied on outdoor environments, such as Global Positioning System (GPS).

Several techniques have been applied based in different technologies, usually resorting to dedicated infra-structure, which make the process heavy. Recent approaches seek to analyse the fingerprints produced by the Radio-Frequency networks, such as Wi-Fi and Global System for Mobile Communications (GSM) that remove the weight of a dedicated infra-structure.

The present work seeks to present a new approach to the indoor location process, resorting to GSM fingerprints and supported by a prediction algorithm based on instance-search. To accomplish this, it was studied the behaviour of the GSM Radio-Frequency signals in buildings with distinct topologies and a prediction algorithm was implemented.

The developed algorithm achieves a small improvement in the precision of the location process comparatively to the algorithms traditionally applied. This approach appears as an alternative to the indoor location mechanisms.

# Agradecimentos

A presente dissertação é o culminar da minha decisão pessoal de continuar os estudos, após ter terminado a minha licenciatura em Engenharia Informática. Esta decisão foi influenciada por dois aspectos: o meu próprio interesse na formação contínua, e o interesse da instituição que me acolheu profissionalmente: a Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Oliveira do Hospital (ESTGOH), Instituto Politécnico de Coimbra (IPC). Assim, com o apoio (tanto moral como financeiro) da direcção desta instituição, personificado no Eng. Francisco Neves e no saudoso Eng. Cunha Torres, e mais recentemente do Dr. Nuno Fortes, avancei com este novo passo na minha vida. Num outro âmbito, também agradeço a todo o grupo de informática da ESTGOH pelo auxílio profissional que disponibilizaram.

Após ter regressado ao Departamento de Engenharia Informática para ingressar no Mestrado em Sistemas Informáticos e Apoio à Decisão, o Prof. Carlos Bento foi um elemento determinante na progressão do meu trabalho. A ele agradeço toda a dedicação que demonstrou deste o início, no fornecimento de material, de informação, de dados, na orientação do trabalho, no apoio nas decisões e na motivação fornecida, entre outros. Sem ele, sem dúvida, o trabalho inerente a esta dissertação nunca teria sido iniciado, muito menos terminado. Poderei concluir afirmando que esta dissertação tanto é minha como sua.

Ao ingressar no Mestrado também incorporei o Laboratório de Inteligência Artificial (LIA), mais concretamente o grupo de Sistemas Ubíquos, bem como o Centro de Informática e Sistemas da Universidade de Coimbra (CISUC). A todos estas instituições e às pessoas que as constituem, o meu agradecimento pelo apoio em vários níveis, nomeadamente o financeiro, por parte do CISUC, no apoio à publicação e participação em conferências. Neste âmbito, de realçar o trabalho e a camaradagem do Bruno Baptista que foram inestimáveis.

Amigos de labutas comuns passadas, presentes e garantidamente futuras são as pessoas que partilham paixões, interesses e vícios. E acima de tudo as "palavras amigas". Realço o apoio dos grandes amigos Nuno Gil, Ricardo Rodrigues e Gonçalo Faria que foram impagáveis, tanto pelos desabafos, pelas trocas de ideias como pela simples presença. A eles o meu obrigado, e o desejo de que assim continuemos no futuro.

A família foi a muleta mais importante nesta fase. Aos meus pais e irmãos agradeço o seu apoio incondicional, do início ao fim, partilhando as minhas alegrias e tristezas ao longo de todo o processo.

Por fim, alguém muito especial que há muito entrou na minha vida, ocupa parte da minha atenção e quem sofreu pela minha dedicação ao mestrado. À minha amada Sofia o meu obrigado pela paciência, pelo auxílio, e por tudo mais que ajudou a ultrapassar esta fase.

A todos os que não especifiquei anteriormente mas também proporcionaram a realização e conclusão deste trabalho, apoiando nas mais diversas formas, o meu profundo agradecimento.



# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação . . . . .	1
1.2	Enquadramento . . . . .	3
1.3	Objectivos . . . . .	5
1.4	Estrutura do documento . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>7</b>
2.1	Tecnologia GSM . . . . .	8
2.1.1	Evolução . . . . .	8
2.1.2	Arquitectura . . . . .	9
2.1.3	Comportamento dos sinais de RF GSM . . . . .	11
2.2	Técnicas de localização . . . . .	14
2.3	Dimensões para classificação das técnicas de localização . . . . .	18
2.4	Localização no interior de edifícios . . . . .	24
2.4.1	Baseada numa infra-estrutura existente . . . . .	24
2.4.2	Baseada em infra-estrutura dedicada . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Um Algoritmo de Localização Baseado em Assinaturas GSM</b>	<b>35</b>
3.1	Caracterização das assinaturas GSM . . . . .	35
3.1.1	Processo de transformação de amostras . . . . .	38
3.2	Algoritmo para predição da localização . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Resultados Experimentais</b>	<b>45</b>
4.1	Ambiente experimental . . . . .	45
4.1.1	Descrição do processo de recolha de amostras . . . . .	45
4.1.2	Caracterização das amostras recolhidas . . . . .	51
4.2	Efeito do processo de transformação de amostras . . . . .	53
4.3	Análise de métodos de aprendizagem em localização . . . . .	55
4.3.1	Caracterização do estudo . . . . .	55
4.3.2	Comportamento dos algoritmos genéricos . . . . .	58
4.3.3	Comportamento dos algoritmos da família do kNN . . . . .	61
4.4	Estudo do comportamento do algoritmo de localização . . . . .	65
4.4.1	Efeito do distanciamento temporal entre amostras . . . . .	65
4.4.2	Efeito do número de canais no processo de localização . . . . .	67
4.4.3	Efeito da acuidade na precisão . . . . .	70
4.4.4	Distribuição dos erros de classificação . . . . .	71



<b>5 Conclusões</b>	<b>77</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>79</b>
<b>Anexos</b>	<b>83</b>
Anexo A - Plataforma de predição da localização . . . . .	83
Anexo B - Estrutura de uma assinatura GSM . . . . .	85

# Lista de Figuras

2.1	Estrutura da rede GSM. . . . .	9
2.2	Variação da potência de sinal de um conjunto de canais BCCH. . . . .	12
2.3	Valor médio e desvio padrão da potência de sinal ao longo do tempo. . . . .	12
2.4	Variação da potência de sinal de um conjunto de canais BCCH em espaço fechado. . . . .	13
2.5	Distância Euclidiana entre amostras. . . . .	13
2.6	Determinação da posição por lateralização. . . . .	14
2.7	Determinação da posição por ângulos. . . . .	15
3.1	Terminal GSM. . . . .	36
3.2	Representação de um instância. . . . .	40
4.1	Apartamentos residenciais. . . . .	47
4.2	Edifícios institucionais. . . . .	47
4.3	Exemplo de zonas em espaço aberto e de zonas em DEF. . . . .	48
4.4	Mapa de leituras no apartamento da UQL. . . . .	49
4.5	Mapa de leituras no apartamento da UQB. . . . .	49
4.6	Mapa de leituras no edifícios do DEI. . . . .	50
4.7	Mapa de leituras nos edifício da ESTGOH. . . . .	50
4.8	Efeito da variação temporal na predição da localização. . . . .	66
4.9	Valor médio e desvio padrão da potência de sinal ao longo do tempo. . . . .	67
4.10	Efeito da variação do número canais no processo de localização na UQB. . . . .	68
4.11	Efeito da variação do número canais no processo de localização no DEI. . . . .	68
4.12	Efeito da acuidade na predição da localização em DEA. . . . .	70
4.13	Distribuição da classificação de amostras do DEI em DEA com acuidade de 5m. . . . .	71
4.14	Distribuição da classificação de amostras do DEI em DEA com acuidade de 10m. . . . .	72
4.15	Distribuição da classificação de amostras da ESTGOH em DEF. . . . .	73
4.16	Distribuição da classificação de amostras do DEI em DEF. . . . .	74
5.1	Aplicação GSMile. . . . .	83
5.2	Equipamento móvel para leitura de sinais GSM. . . . .	84

# Lista de Tabelas

4.1	Descrição das amostras recolhidas em DEF e DEA. . . . .	51
4.2	Percentagem de amostras para treino e classificação. . . . .	52
4.3	Percentagem da classificação em DEF com o algoritmo kNN. . . . .	56
4.4	Percentagens da classificação em DEA com as configurações 10FCV, 75/25 e 50/50. . . . .	58
4.5	Percentagens da classificação em DEF com as configurações 10FCV, 75/25 e 50/50. . . . .	60
4.6	Predição da localização em DEF com 50/50. . . . .	62

# Capítulo 1

## Introdução

O presente capítulo tem como intuito apresentar a motivação que impulsionou o estudo da localização no interior de edifícios recorrendo a assinaturas da rede *Global System for Mobile Communications* (GSM), bem como o seu enquadramento na área da computação ubíqua. Uma vez exposto este preâmbulo serão apresentados os objectivos que o presente trabalho pretende atingir.

### 1.1 Motivação

Segundo Dey *et al.* [Dey 2000], a percepção de contexto (derivado do termo anglo-saxónico *Context Awareness*) é qualquer informação que pode ser usada para descrever o ambiente em que uma aplicação está a ser usada. Pode ser informação sobre o indivíduo que usa uma determinada aplicação ou equipamento, a sua localização, actividades e intenções. Abowd *et al.* [Abowd 2000] apresentaram cinco elementos do contexto, que designaram por "five W's":

- (*who*) quem é o utilizador e/ou as outras pessoas que o envolvem (identidade)?
- (*what*) o que é que o utilizador está a fazer (actividade)?
- (*where*) onde é que o utilizador se encontra (localização)?
- (*when*) quando é que o evento ocorreu (tempo)?
- (*why*) porque razão o utilizador se encontra a executar determinada acção?

Com os avanços tecnológicos, o desenvolvimento de novos equipamentos de comunicação sem fios e a integração de vários componentes de *hardware*, como sensores, surgiram aplicações que usam o contexto do utilizador para

## 1. Introdução

a execução de diversas tarefas. Muitas decisões de pró-actividade recorrem usualmente à localização do utilizador para fornecer informação útil, ou, agir perante um evento. O tipo de localização necessária e a sua precisão dependerá dos objectivos e necessidades de cada aplicação a executar.

Os dispositivos móveis, como telemóveis ou *Personal Digital Assistant* (PDA) compreendem diversos equipamentos com funções distintas, nomeadamente em termos de interacção com a rede GSM. Enquanto o seu tamanho se torna cada vez mais reduzido a sua capacidade computacional e de armazenamento, bem como a autonomia, aumenta. Englobando diversas funcionalidades, estes dispositivos acompanham continuamente o utilizador de uma forma discreta no quotidiano, estando assim disponíveis em qualquer momento e lugar. Isto dota-os de características perfeitamente ubíquas, podendo integrar diversas tecnologias de comunicação, como o GSM, o 802.11, os infra-vermelhos ou o *bluetooth*.

A necessidade e possibilidade de integração num dispositivo de diversos equipamentos de hardware, como sensores, bem como o surgimento de aplicações pró-activas, deram o mote para a necessidade de desenvolvimento de técnicas que permitam a determinação da localização. O presente trabalho pretende apresentar uma nova abordagem para a resolução da problemática da localização, focando-se na localização no interior de edifícios.

## 1. Introdução

### 1.2 Enquadramento

Sendo um equipamento ubíquo caracterizado pela sua contínua presença, um aspecto essencial nestes sistemas é a sua capacidade de determinar, com um certo grau de precisão, a sua localização, e, por inerência, da pessoa que o acompanha [Kindberg 2002]. A localização no exterior de edifícios está assegurada pelo GPS. Este sistema permite uma acuidade que pode variar em alguns metros [Kaplan 1996]. No entanto, recorrendo à técnica de *Differential GPS* é possível reduzir a acuidade para 0,5 metros [Dana 2001]. Porém, este sistema apresenta uma elevada sensibilidade a percursos múltiplos e interferências [Kaplan 1996], bem como necessita de um funcionamento em "linha de vista" entre os receptores GPS e um conjunto de satélites, não se adequando assim à utilização no interior de edifícios.

Desta forma, é necessário encontrar técnicas de localização no interior de edifícios. A atenção, nesta área de investigação, tem-se centrado no uso de sinais de radiofrequência (RF) de curto alcance, como nas tecnologias Wi-Fi [Bahl 2000], Bluetooth [Aalto 2004] e *Radio-Frequency IDentification* (RFID) [Hightower 2000], Infra-Vermelhos [Hopper 1993], ou recorrendo a Ultra sons [Ward 1997]. Estas tecnologias podem ser reunidas em dois grupos: o primeiro caracteriza-se pela necessidade de uma infra-estrutura específica, destinada exclusivamente à localização. Aqui, podemos englobar os sistemas baseado nas tecnologias de Infra-Vermelhos ou Ultra Sons. A necessidade da instalação de uma infra-estrutura específica implica várias restrições, nomeadamente, o tempo necessário para a sua execução e os custos financeiros inerentes. Por outro lado, a existência de obstáculos físicos entre os receptores e os emissores pode inviabilizar a comunicação. Estas características tornam este grupo de tecnologias pouco atraente.

O segundo grupo aborda o problema da localização no interior de edifícios com uma perspectiva diferente, analisando as assinaturas dos sinais de RF (do termo anglo-saxónico *fingerprinting*) transmitidos por estações de rádio, redes locais ou redes *ad-hoc* Bluetooth.

Recentemente, surgiram novas abordagens recorrendo à análise de sinais de RF de médio/longo alcance, como o sistema GSM [LaMarca 2005] e [Otsason 2005], permitindo uma localização com uma razoável acuidade (entre 3 e 5 metros) e resultados semelhantes aos obtidos com sinais de RF de curto alcance.

Existem vários factores que tornam a localização no interior de edifícios baseada em assinaturas GSM uma tecnologia interessante [Otsason 2005]:

## 1. Introdução

- à partida, poderemos englobar esta abordagem no grupo das tecnologias que não necessita de uma infra-estrutura específica, não possuindo desta forma custos temporais ou financeiros que decorrem do processo de instalação da infra-estrutura de suporte;
- recorre à análise dos sinais de RF produzidos pelo conjunto de estações base que compõem a rede GSM. Existindo uma elevada penetração do equipamento móvel no quotidiano, um uso intensivo deste meio de comunicação e uma cobertura sensivelmente plena de todo o território nacional e Europeu, estamos perante um sistema verdadeiramente ubíquo, já que mundialmente existem cerca 1.900 Milhões de utilizadores [GSM World 2006];
- existe uma elevada cobertura do território nacional e Europeu pela rede GSM, permitindo assim a aplicação adequada das técnicas de localização baseadas nesta tecnologia;
- a rede GSM funciona numa banda do espectro de RF licenciada, não estando assim sujeita a um elevado número de perturbações devido à transmissão de outros equipamentos na mesma frequência, não sucedendo o mesmo, por exemplo, nas redes 802.11 ou nas redes *bluetooth*, que operam em bandas não licenciadas;
- a infra-estrutura física que suporta a rede GSM é independente da rede eléctrica, pelo que continuará a funcionar mesmo quando existe uma falha eléctrica.

Existem, no entanto, algumas características negativas:

- devido às necessidades do mercado, a segmentação das estações base pode sofrer diversas alterações;
- o movimento de pessoas ou objectos afecta o percurso dos sinais de RF GSM podendo alterar a respectiva potência de sinal.

Estamos assim perante uma tecnologia amplamente difundida, independente e estável, caracterizada pela sua ubiquidade. Porém, as possíveis perturbações a que os sinais de RF GSM estão sujeitos podem afectar o processo de localização. Embora a implantação da infra-estrutura base de uma rede GSM apresente um elevado custo financeiramente, a sua utilização não apresenta custos adicionais para o utilizador final (ou existindo, são reduzidos).

A par do desenvolvimento da tecnologia GSM existiu uma evolução dos equipamentos móveis que fazem uso dos serviços disponibilizados por esta rede. Esta difusão torna a tecnologia GSM interessante de explorar no âmbito da localização no interior de edifícios.

## 1. Introdução

### 1.3 Objectivos

O objectivo do presente trabalho prende-se com o estudo da localização no interior de edifícios, recorrendo a assinaturas GSM. Para o efeito, pretende-se apresentar uma abordagem alternativa nesse âmbito, desenvolvendo um algoritmo de predição baseado na procura por instâncias e realizar um estudo do comportamento de diferentes algoritmos no processo de localização.

Existindo actualmente técnicas de predição para o interior de edifícios, pretende-se melhorar esse processo explorando os sinais de RF GSM. O algoritmo proposto surge assim como uma extensão dos sistemas de localização existentes. A abordagem desenvolvida caracteriza-se pela implementação de um algoritmo de procura simples, baseado no *Weighted k-Nearest Neighbor* (WkNN), que sendo uma abordagem *lazy learning*, procura classificar instâncias a partir de um conjunto de treino, aproximando as amostras mais semelhantes.

O recurso à tecnologia GSM, embora sendo amplamente difundida, foi pouco explorada. Os sinais de RF GSM apresentam um percurso mais longo de propagação do que outras tecnologias, como a Wi-Fi, podendo estar sujeitos a diversas perturbações. Esta característica dos sinais de RF GSM leva-nos a procurar algoritmos de procura simples, como o WkNN, base da nossa abordagem. Partindo de uma base de treino estável e existindo um pequeno passo indutivo pressupõem-se uma menor taxa de erro por parte dos algoritmos baseados em instâncias. Pretende-se assim verificar se as abordagens *lazy learning* são adequados para o processo de localização no interior de edifícios. O estudo comparativo procura esclarecer se algoritmos *eager learning*, como as redes neuronais ou árvores de decisão, caracterizados por um passo indutivo superior, podem igualmente ser adaptados à predição da localização neste tipo de ambientes.

Genericamente, pretende-se estudar a capacidade de realizar a localização no interior de edifícios, melhorar o processo de predição e perceber os mecanismos que afectam este processo. Para o efeito, recorre-se a uma base de assinaturas GSM na forma de instâncias classificadas (designadas por casos ou exemplos). O processo de localização baseia-se num algoritmo de procura por casos. Um estudo comparativo permitirá verificar a adequabilidade da abordagem proposta, bem como de algoritmos alternativos, na localização no interior de edifícios.



## 1. Introdução

### 1.4 Estrutura do documento

A dissertação é formada por 5 capítulos. Neste primeiro capítulo realiza-se uma introdução à temática da localização no interior de edifícios recorrendo a assinaturas GSM, descrevendo a motivação e o enquadrando do trabalho, bem como os objectivos que se pretendem atingir.

O segundo capítulo pretende descrever o Estado da Arte no âmbito da localização. Inicialmente, descreve-se a arquitectura do GSM e o comportamento dos sinais de RF GSM no interior de edifícios. Seguidamente, abordam-se e classificam-se os principais métodos para a determinação da localização. Por fim, as diversas tecnologias e abordagens no processo de localização no interior de edifícios são agrupadas em 2 conjuntos: o grupo das técnicas de localização que recorrem a infra-estruturas existentes e o grupo das técnicas de localização que necessitam de uma infra-estrutura dedicada.

Após a introdução e o estudo das alternativas existentes, apresenta-se, no terceiro capítulo, a abordagem proposta para localização. Descreve-se o processo de comunicação com terminais GSM e o procedimento para aquisição de dados, apresenta-se o processo de transformação de amostras em instâncias classificadas, que constituem a base de treino do sistema, e define-se a estrutura do algoritmo de localização bem como a integração dos diversos elementos num processo de localização.

O quarto capítulo tem como objectivo apresentar os resultados experimentais do processo proposto. Descreve o ambiente experimental, realiza um estudo comparativo entre diferentes algoritmos no processo de localização e apresenta os resultados do processo de predição baseado na abordagem proposta no terceiro capítulo. Adicionalmente, analisa-se o efeito da acuidade, do distanciamento temporal entre amostras do número de canais que compõem as assinaturas GSM e do método de transformação de amostras na precisão do algoritmo.

Por fim, são apresentadas as conclusões no último capítulo, indicando os objectivos atingidos, vantagens e limitações da abordagem proposta, e um possível trabalho futuro no seguimento do estudo efectuado.

## Capítulo 2

# Estado da Arte

No capítulo anterior foi introduzida a noção de que a localização é uma característica importante para a percepção do contexto em alguns sistemas ubíquos. O presente capítulo pretende apresentar o estado da arte na localização no interior de edifícios.

Para contextualizar o trabalho realizado é apresentada e caracterizada a tecnologia GSM. Posteriormente, serão descritas as técnicas usuais para a inferência da localização e discutidas as dimensões que caracterizam o processo de localização. Após introduzidos estes conceitos, serão então descritas e classificadas as principais abordagens na localização no interior de edifícios, agrupadas em dois conjuntos de acordo com a infra-estrutura de suporte.

Embora a análise de sistemas baseados em assinaturas GSM apresente uma maior relevância para o nosso trabalho, por uma questão de evolução, apresentam-se primeiro os sistemas baseados em assinaturas 802.11, pioneiros no recurso a assinaturas de sinais de RF.

## 2. Estado da Arte

### 2.1 Tecnologia GSM

#### 2.1.1 Evolução

No início da década de 80 existiam diversos sistemas para a comunicação móvel na Europa. Devido à necessidade de permitir o *roaming* entre os diferentes países procurou-se desenvolver um sistema comum. Em 1982 surgiu o *Groupe Speciale Mobile* (GSM) do esforço de alguns países no sentido de normalizar as comunicações móveis. Em 1988 o grupo GSM foi incluído no *European Telecommunication Standards Institute* (ETSI) e a norma desenvolvida pelo grupo GSM torna-se a norma em vigor para todas as telecomunicações na Europa [GSM World 2006].

O principal trabalho do grupo GSM foi desenvolvido entre 1988-1990, do qual resultaram 12 séries de especificações que detalhavam o sistema GSM. Em 1990, termina a primeira fase da especificação e, nessa altura, existem 3 sistemas de telecomunicações mundialmente dominantes, sendo todos eles analógicos: a Americana AMPS desde 1984, com redes nos Estados Unidos, a Inglesa TACS desde 1985, com redes na Inglaterra e a Nórdica NMT desde 1981, com redes nos países nórdicos.

Ao contrário destes sistemas, o GSM era um sistema totalmente digital, permitindo a transmissão de voz e dados, bem como *roaming* através das redes dos diversos países aderentes. O termo GSM foi seleccionada como marca do sistema, significando a partir de então *Global System for Mobile Communications*, enquanto o grupo responsável foi denominado por *Special Mobile Group* (SMG) [GSM World 2006].

O sistema GSM é o sistema de telecomunicações celulares com maior crescimento e maior número de utilizadores em todo o mundo. Encontra-se disponível em mais de 210 países, num total de quase 700 operadores. No final do primeiro semestre de 2006 existiam aproximadamente 1.900 Milhões de subscritores do serviço GSM, correspondendo a cerca de 80% do total de utilizadores de serviços de telecomunicações celulares, sendo em muitas regiões a única norma de telecomunicações celulares, como o caso da Europa. Excluindo o sistema GSM, a tecnologia seguinte mais difundida é a *Code Division Multiple Access* (CDMA), estando em força nos Estados Unidos da América, onde o GSM só apresenta uma taxa de penetração de 30% [GSM World 2006].

## 2. Estado da Arte

### 2.1.2 Arquitectura

A arquitectura da rede GSM pode ser dividida em 3 componentes (figura 2.1). As Estações Móveis (*Mobile Stations* - MS) são constituídas pelos equipamentos móveis (telefones celulares) que os utilizadores possuem. As Estações Base (*Base Stations* - BS) suportam as células e lidam com as ligações rádio para com as MS. Por fim, o Subsistema da Rede (*Network Subsystem* - NS) é responsável por fazer a comutação das chamadas entre utilizadores da rede móvel e entre estes e os utilizadores da rede fixa [Silva 2005].

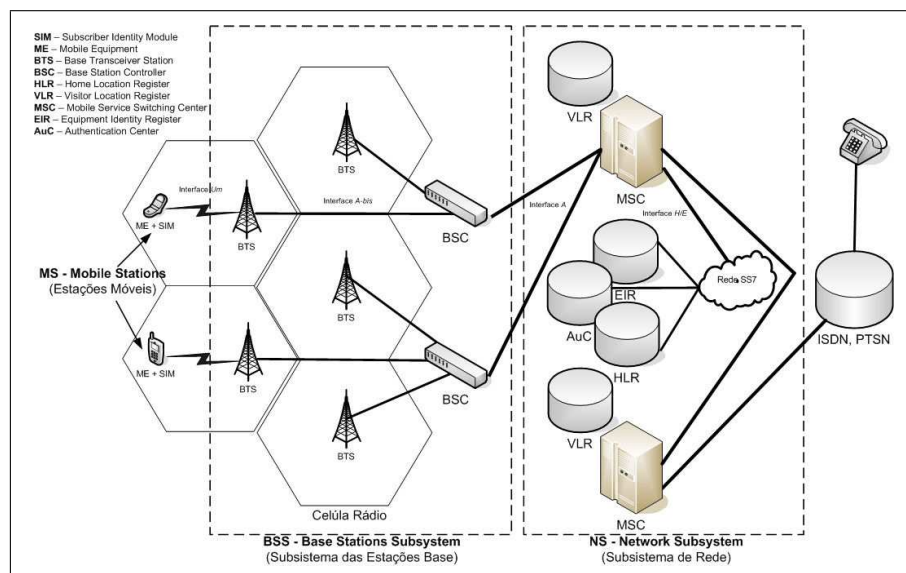


Figura 2.1: Estrutura da rede GSM (elementos principais).

A interface rádio do sistema GSM usa uma combinação entre *Frequency Division Multiple Access* (FDMA), *Time Division Multiple Access* (TDMA) e *Frequency Hopping* (FH). O FDMA divide a largura de banda por frequência em *Radio Frequency Channels* (RFCH) espaçados em 200kHz. As frequências são atribuídas em pares para que cada conjunto de *uplink/downlink* seja separado exactamente por 45MHz. Cada uma destas frequências de transporte (*carrier frequencies*) é dividida em 8 canais lógicos (*timeslots* ou *burts*) recorrendo ao TDMA, numerados de 0 a 7. Um *timeslot* demora 0.577 ms e necessita de 200 kHz da largura de banda. Cada *slot* de uma *frame* TDMA tem um comprimento de 4.615 ms [Rahnema 1993].

Os canais são logicamente divididos em canais de tráfego - *Traffic*

## 2. Estado da Arte

*CHannels* (TCH), que transportam informação dos assinantes, e canais de controlo. Estes por sua vez dividem-se em [Silva 2005]:

- BCCH (*Broadcast Control CHannels*), para difusão de informação referente ao sistema para todas as estações móveis;
- FCCH (*Frequency Correction CHannels*), para as estações móveis ajustarem a sua frequência de serviço a uma frequência estável de uma estação de base;
- PCH (*Paging CHannel*), para chamada de estações móveis;
- RACH (*Random Access CHannels*), usados para acesso aleatório das estações móveis a uma estação de base, para envio de sinais de controlo (por exemplo, pedido de um canal para início de uma chamada);
- SACCH (*Slow Associated Control CHannels*), para transmissão de sinais de controlo lentos, juntamente com sinais informativos;
- FACCH (*Fast Associated Control CHannels*), que usam falhas temporais de tráfego para acções de controlo rápidas, tais como a transferência de controlo (*handoff*).

As redes GSM podem usar diferentes frequências. Na Europa e na maior parte do globo são usadas as bandas 900 MHz e 1800 MHz. Na América do Norte e alguns países latinos recorrem às bandas 805 MHz e 1900 MHz. Algumas regiões mais turísticas, como as Caraíbas, usam as 4 bandas de forma a suportar os equipamentos de todos os viajantes [Otsason 2005]. Diferentes bandas são atribuídas para a comunicação *uplink* (MS para BS) e *downlink* (BS para o MS). Na América do Norte existem 124 RFCH bidireccionais na banda de 850 MHz e 299 na banda de 1900 MHz, totalizando assim 423 canais. Na Europa o total de canais disponíveis é de 548 [GSM World 2006].

A interface rádio do sistema GSM altera a frequência de transmissão em intervalos regulares, denominando-se a este processo por *slow frequency hopping*. A frequência apenas é alterada entre os *timeslots* pelo que cada canal lógico é transmitido na mesma frequência. A informação sobre a sequência da mudança de frequência é remetida a todos os MS através do canal de controlo. Dependendo da MS em uso, a potência de transmissão pode ser alterada de forma a reduzir a energia necessária e diminuir as interferências, mas, mantendo a qualidade da ligação. Este processo de controlo da potência de transmissão deve ser implementando do lado das MS, sendo opcional nas BS, restringidas a uma decréscimo até 30 db do nível máximo da potência do sinal de saída [Silva 2005].

## 2. Estado da Arte

### 2.1.3 Comportamento dos sinais de RF GSM

A localização no interior de edifícios, explorada neste trabalho, parte de dois princípios relativos aos sinais de RF GSM transmitidos pelos canais BCCH<sup>1</sup>:

- existe uma relativa estabilidade temporal num dado local (ou seja, a potência de sinal de um canal BCCH tende a manter-se inalterado ao longo do tempo), e
- existe diversidade no espaço (ou seja, quando nos deslocamos num espaço, as potências dos sinais podem variar, podendo mesmo implicar a captação de novos canais em detrimento de outros que deixam de ser recebidos).

Estes princípios foram confirmados por Bento *et al.* [Bento 2007]. No seu trabalho estudaram o comportamento dos sinais de RF GSM em várias situações, nomeadamente, a sua variação ao longo do tempo, a sua variação no espaço e a influência das condições climatéricas.

Tanto em espaços abertos como em espaços fechados a potência dos sinais de RF GSM tende a ser relativamente estável no tempo. Esse comportamento é visível no gráfico da figura 2.2 (onde o eixo das ordenadas representa a potência de sinal em dBm e o eixo das abcissas o número de amostras<sup>2</sup>, sendo visível apenas parte das amostras). O gráfico da figura 2.3 evidencia a estabilidade temporal ao longo de um período contínuo de 24h, na mesma localização, apresentando o valor da potência de sinal dos canais de RF GSM que constituem a última assinatura obtida, juntamente, com o valor médio e o respectivo desvio padrão do conjunto de todas as amostras.

No entanto, embora estáveis, os sinais BCCH apresentam pequenas variações ao longo do tempo<sup>3</sup>. Este efeito deve-se a vários factores, como os mecanismos de reflexão resultantes das flutuações de propagação no meio ambiente. Com efeito, Bento *et al.* [Bento 2007] demonstraram no seu trabalho que os sinais de RF GSM são fortemente afectados pelo movimento de pessoas no meio circundante, sofrendo igualmente uma ligeira perturbação devido à influência das condições climatéricas.

Contrariamente à estabilidade temporal, em termos espaciais existe uma clara variação dos sinais de RF GSM. O gráfico da figura 2.4 ilustra

---

<sup>1</sup>Para o processo de localização apenas tem interesse os canais BCCH (*Broadcast Control Channels*) devido à sua potência de sinal relativamente constante.

<sup>2</sup>Uma amostra corresponde a uma assinatura GSM, constituída por um conjunto de canais BCCH e o respectivo vector de potências de sinal, medidos em dBm.

<sup>3</sup>Existe uma variação esporádica acima da média na potência do sinal de alguns canais que pode corresponder a erros de leitura do terminal GSM. Este comportamento apresenta uma baixa ocorrência, inferior a 0,5%.

## 2. Estado da Arte

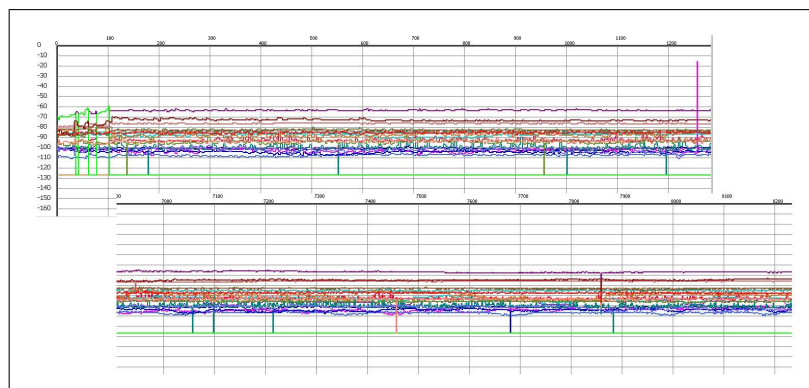


Figura 2.2: Variação da potência de sinal dos diversos canais BCCH durante um período de 24h no apartamento da UQB (Urbanização da Quinta da Boavista).

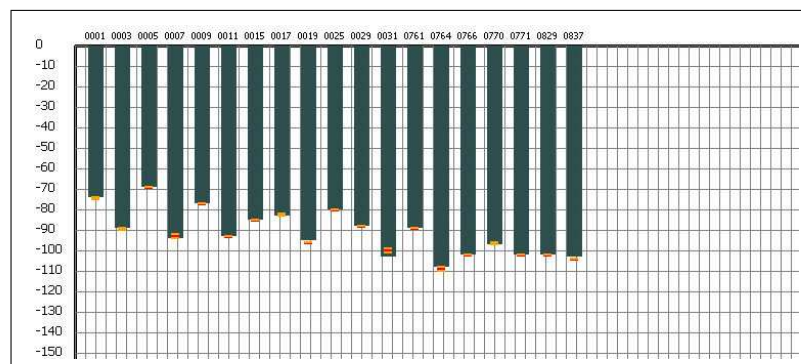


Figura 2.3: Potência de sinal dos canais de RF GSM que constituem a última assinatura de um conjunto de amostras recolhido no apartamento UQB ao longo de 24h, com o valor médio e o respectivo desvio padrão.

esse cenário, representando o comportamento das diversas potências de sinal dos canais BCCH. Para o efeito, foram recolhidas 10 amostras em divisões distintas. Após a recolha de um conjunto de 10 amostras numa divisão procedeu-se à leitura na divisão seguinte.

No final de cada conjunto de 10 amostras pode-se observar uma alteração significativa da potência de sinal de alguns canais GSM. Após esta mudança, a potência mantém-se estável durante as 10 amostras seguintes, variando novamente em cada mudança de divisão. Este efeito é igualmente observável quando se calcula a distância Euclidiana de cada amostra relativamente à primeira amostra (gráfico da figura 2.5). Novamente é perceptível uma estabilidade em cada conjunto contínuo de 10 amostras

## 2. Estado da Arte

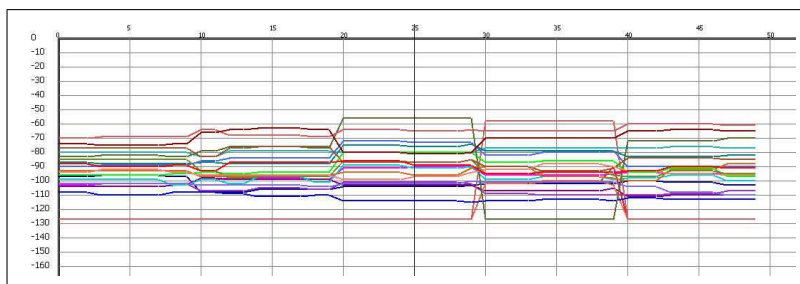


Figura 2.4: Variação da potência de sinal da totalidade dos canais BCCH em amostras recolhidas no apartamento da UQB, em espaço fechado.

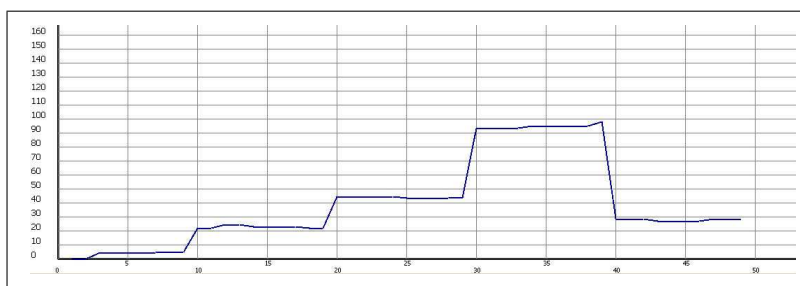


Figura 2.5: Distância Euclidiana relativamente à primeira amostra em amostras recolhidas no apartamento da UQB, em espaço fechado.

(leituras realizadas na mesma divisão), existindo uma variação em cada mudança de divisão. À medida que que passamos de uma divisão para outra as respectivas assinaturas tornam-se mais distintas.



## 2. Estado da Arte

### 2.2 Técnicas de localização

Existem várias técnicas para a determinação da localização (do termo anglo-saxónico *location sensing*). Hightower *et al.* [Hightower 2001] definem a triangulação, análise de cenários e proximidade, como as principais técnicas para a determinação da localização, que serão descritas seguidamente.

A **triangulação** usa as propriedades geométricas dos triângulos. Esta, de acordo com as características do sistema em estudo, é subdividida em lateralização (*lateration*) e angulação (*angulation*).

A lateralização calcula a posição de um ponto a partir de medições relativas a pontos de referência conhecidos. O sistema *Active Bat* [Hopper 1997] recorre a esta técnica. O cálculo de um ponto  $x$  num ambiente bi-dimensional necessita de 3 pontos de referência não colineares, P1, P2 e P3, como é representado na figura 2.6. Num cenário a 3 dimensões são necessários 4 pontos não coplanares.

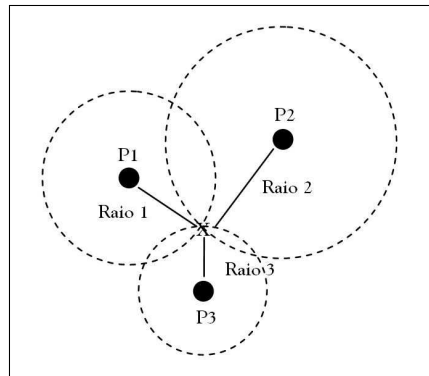


Figura 2.6: Determinação da posição por lateralização entre o ponto  $x$  e três pontos não colineares [Hightower 2001].

A questão surge em como medir as respectivas distâncias na lateralização. Existem três abordagens que são seguidas: medição directa, tempo de ocorrência (*time-of-flight*) e atenuação (*attenuation*).

A primeira, medição directa, recorre a uma acção ou movimento físico (por exemplo, usando um instrumento com comprimento conhecido). O tempo de ocorrência, define-se pelo tempo necessário para um sinal percorrer a distância entre o ponto pretendido e um ponto de referência. Esta viagem é realizada a uma velocidade conhecida, permitindo desta forma calcular a distância física entre os dois pontos. Nesta medição é

## 2. Estado da Arte

necessário ter em conta que os sinais podem ser desviados ou reflectidos, caso do som ou da luz. Por outro lado, existem sistemas que necessitam de obter uma concordância entre o emissor e o receptor, de forma a que estes se mantenham sincronizados. Outros sistemas recorrem a tempos diferenciais e nesse caso a sincronização deve ser garantida entre emissores e entre emissores e receptores. Por fim, a atenuação caracteriza-se pelo facto de a intensidade do sinal emitido diminuir com a distância ao emissor. Este decréscimo da potência do sinal representa uma atenuação relativamente à potência original do sinal, designação que define esta abordagem.

Sistemas como o GPS [Djuknic 2001], *Cricket* [Priyantha 2000], *Bluesoft* ou *PulsOn* [Hightower 2001] recorrem ao tempo de ocorrência, enquanto o sistema *SpotOn* usa a atenuação [Hightower 2001].

A angulação é similar à lateralização, no entanto, ao invés de recorrer ao conceito de distâncias, baseia-se na medição de ângulos para a determinação da posição de um objecto. Para esta situação, num espaço bidimensional, são necessárias duas medidas de ângulos entre o ponto  $x$ , a determinar, e os pontos de referência,  $P1$  e  $P2$ , ângulos relativos a um vector que serve como referencial ( $0^\circ$ ), e por fim, uma medida de comprimento entre os dois pontos se referência, tal como apresentado na figura 2.7.

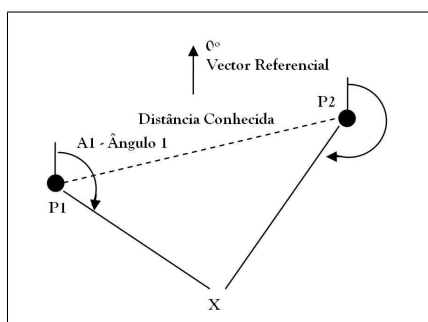


Figura 2.7: Determinação da posição por ângulos [Hightower 2001].

A **análise de cenários** recorre a características do cenário observado a partir de um determinado ponto, procurando determinar os aspectos distintivos desse cenário. Recolhidos estes elementos, procura-se concluir sobre a posição do observador, ou dos objectos observados. De notar que, devido à complexidade de alguns cenários, estes podem por vezes ser simplificados de forma a representar apenas silhuetas ou contornos dos objectos.

Existem duas abordagens passíveis de serem aplicadas nesta situação:

## 2. Estado da Arte

análise estática e análise diferencial. Na primeira, procura-se determinar um conjunto de formas que caracterizam o cenário. Na segunda, processa-se a diferença entre cenários sucessivos de forma a estimar a localização. Diferenças no cenário observado vão corresponder a movimentos do observador, e, se objectos observados corresponderem a posições conhecidas, é possível determinar a posição relativa entre o observador e esses pontos de referência.

Note-se que nesta técnica não é necessário recorrer a medições de comprimentos ou ângulos, como nas técnicas anteriores. A posição é determinada a partir de uma observação passiva, sem interferir com o ambiente de estudo. No entanto, é necessário conhecer com antecedência as características do ambiente de forma a ser possível comparar o cenário observado com o cenário previamente armazenado. O sistema RADAR recorre a esta técnica para observar os cenários de RF da rede 802.11 [Bahl 2000].

A localização recorrendo a assinaturas é uma exemplo da análise de cenários. Uma assinatura pode ser composta por um vector contendo a potência dos sinais e/ou pelo tempo de propagação, medidos em localizações conhecidas, representando um cenário. O vector é responsável pela semelhança ou distinção entre duas assinaturas. O uso de assinaturas, contrariamente ao uso ao a um único sinal, permite uma maior granularidade ao conseguir distinguir entre vários pontos. O uso de um vector poderá, também, possibilitar uma maior robustez ao processo de localização.

Quando uma assinatura relativa a uma posição desconhecida necessita de ser classificada basta comparar os valores do seu vector com as assinaturas de posições conhecidas e previamente determinadas, ou seja, a base de treino. A localização da assinatura conhecido que apresente as características mais semelhantes é atribuída à assinatura recolhida numa posição desconhecida. Esta técnica denomina-se por localização por assinaturas (do termo anglo-saxónico *fingerprinting*), enquanto que o conjunto de características associado ao vector de potências de sinal designa-se por assinatura (do termo anglo-saxónico *fingerprnt*) [Otsason 2005]. Existe assim um processo procura de semelhanças entre as características de uma assinatura com localização desconhecida e as características de um conjunto de assinaturas com localizações conhecidas.

Esta técnica baseia-se em dois factores essenciais: a potência dos sinais que constituem o vector devem apresentar uma variação segundo a dimensão espaço, mas sendo estáveis segundo a dimensão tempo. Ou seja, num dado local as assinaturas ao longo do tempo tendem a apresentar o mesmo vector de potências de sinal de RF, no entanto, variando à medida

## 2. Estado da Arte

que se desloca para outras posições. Isto significa que é possível distinguir as leituras de diferentes locais e reconhecer leituras recolhidas no passado obtidas em posições idênticas. Porém, estes factores dependem do ambiente envolvente. Se estivermos num local amplo, sem obstáculos, a variação espacial pode não ser significativa. Por outro lado, se estivermos num ambiente dinâmico, em que existem alterações constantes das posições de objectos ou pessoas, podemos não encontrar uma estabilidade temporal.

A **análise da proximidade** procura detectar quando um objecto se encontra num espaço próximo. A determinação da proximidade é conseguida através de fenómenos físicos de curto alcance. Para o efeito existem 3 abordagens: a detecção por contacto físico, a monitorização dos pontos de acesso (como os *access points* das redes *wireless*) e a observação de sistemas de identificação automática. Sistemas baseados nesta técnica podem ser associados a processos de identificação, reconhecendo, simultaneamente, a proximidade e identidade de um objecto.

O sistema *Contact*, que possibilita a comunicação entre objectos com os quais o utilizador se encontra em contacto, recorre à análise da proximidade [Hightower 2001]. A localização a partir da identificação de células é outro exemplo desta técnica. Parte-se do princípio de que numa arquitectura baseada em células, ao invés de um transmissor de longa distância, existem várias estações emissoras com um raio de acção mais reduzido, transmitindo informações sobre a respectiva localização ou um identificador único. As estações móveis que captam este sinal podem então inferir a sua própria localização pela proximidade, de acordo com a informação recebida. A precisão desta técnica dependerá do raio de cada célula. Quando a área de diversas células se sobrepõem pode-se recorrer adicionalmente à técnica da lateralização para estimar, com uma maior precisão, a localização nas zonas de intersecção [Otsason 2005].

No presente estudo procuramos explorar as técnicas da localização recorrendo a assinaturas (análise de cenários) como forma de predição da localização no interior de edifícios. A versatilidade desta técnica permite a sua aplicação a diferentes tecnologias, como a Wi-Fi ou GSM. Esta abordagem será aplicada ao sistema GSM, analisando os canais transmitidos e os respectivos vectores de potências de sinal. No entanto, existem restrições a ter em conta. Esta técnica implica a existência de uma fase de aprendizagem, que pode ser dispendiosa, para a construção de uma base de treino, necessária para treinar o algoritmo desenvolvido. Caso sejam efectuadas alterações ao meio envolvente (desde a disposição das estações base, alteração das potências dos sinais GSM, edificação ou remoção de obstáculos, como edifícios, entre os equipamentos móveis e as estações base, entre outros) é necessário proceder à actualização da base de casos.

## 2. Estado da Arte

### 2.3 Dimensões para classificação das técnicas de localização

Hightower *et al.* [Hightower 2001], apresentam uma taxonomia para a classificação dos sistemas de localização. Esta taxonomia é constituída por 6 dimensões que permitem caracterizar as diferentes abordagens de localização.

**Localização física *versus* simbólica.** Os sistemas de localização podem disponibilizar dois tipos de informação: física e simbólica. A localização física (ou numérica) fornece-nos uma informação absoluta, sendo real ou mensurável, logo mais precisa. Localizações baseadas em coordenadas, como por exemplo "40.2000° N, 8.4170° W", com uma elevação de 59 metros, são localizações físicas, permitindo especificar um local único e preciso. A localização simbólica apresenta uma ideia discreta da localização do objecto, sendo, geralmente, menos exacta do que a localização física. Designações como "cozinha", "comboio aproximando-se de Coimbra", "perto da cama", são localizações simbólicas. Um sistema que forneça uma localização física pode ser optimizado para, adicionalmente, fornecer simultaneamente localização simbólica [Hightower 2001].

A abordagem de localização proposta no presente estudo disponibiliza uma localização simbólica, indicando posições relativas ao interior de cada edifício.

No entanto, é usualmente possível realizar uma conversão entre o conjunto de coordenadas da localização física e as respectivas designações simbólicas, mais intuitivas para os utilizadores. Para a localização no interior de edifícios a descrição simbólica de uma posição tem mais interesse do que a descrição física, caso esta informação seja disponibilizada ao utilizador final. O ser humano lida melhor com a informação simbólica, interpretando mais rapidamente a informação "Coimbra" (simbólica) do que "40.2000° N, 8.4170° W" (física).

**Absoluta *versus* relativa.** Uma localização absoluta recorre a uma grelha comum para referenciar todos os objectos. O uso de uma localização segundo os parâmetros longitude, latitude e altitude é um exemplo de uma localização absoluta. Na localização relativa, cada objecto necessita de um ponto de referência, podendo um objecto apresentar várias localizações (relativas) de acordo com os diferentes pontos de referência. Tal como na localização física e simbólica, uma localização absoluta pode ser transformada numa localização relativa [Hightower 2001].

## 2. Estado da Arte

No presente estudo recorre-se a uma localização relativa. Associada a cada edifício existe uma base de treino que apenas disponibiliza amostras sobre as localizações no interior desse edifício. Existem assim diversas bases de treino mapeando, cada uma delas, edifícios distintos. O recurso a uma base de treino global, sendo esta solução exigente em termos computacionais e de armazenamento, não foi analisada. Pretendendo-se com o trabalho realizado distinguir divisões no interior de um edifício, é adequado recorrer a um processo de localização relativa.

**Centralizada *versus* localizada.** O local onde a localização é processada é relevante devido às necessidades computacionais, às restrições de privacidade e à escalabilidade do sistema.

Caso o processamento seja efectuado no lado do cliente, implica uma maior capacidade computacional da parte deste, no entanto, não se levantam questões de privacidade. O conjunto que compõe o sistema GPS é um exemplo desta vertente. Os satélites apenas transmitem a sua posição fixa relativamente ao globo terrestre e o respectivo parâmetro temporal, devendo cada equipamento que detecte este sinal realizar os cálculos necessários baseados nessa informação para aferir a sua própria localização. Desta forma, nenhum satélite tem informação sobre quais os equipamentos que estão a receber os seus sinais, nem as suas localizações. O peso computacional da determinação da localização é delegado em cada equipamento cliente. Assim sendo, o sistema é perfeitamente escalonável, independentemente do número de equipamentos receptores que usam o sinal GPS para determinar a sua localização.

Contrariamente, se estivermos perante um sistema centralizado onde o processamento é realizado do lado do servidor, o peso computacional deixa de estar no cliente, sendo transmitido pela rede a informação do local onde o utilizador se encontra, o que pode levantar questões sobre segurança e protecção da privacidade. Adicionalmente, existe a necessidade de uma maior largura de banda devido à maior quantidade de informação transferida entre o servidor e o cliente. Esta é uma vertente menos escalonável que a anterior, devendo a infra-estrutura ser robusta o suficiente para atender a todos os pedidos de localização. No entanto, reduzem-se as necessidades computacionais dos dispositivos clientes a localizar. Reduzindo os recursos necessários destes dispositivos permite-se que um maior número de aplicações e equipamentos possam usufruir do serviço disponibilizado [Hightower 2001].

Dependerá da arquitectura do sistema em uso a disponibilização de informação suficiente para que o equipamento cliente processe a sua localização. Na ausência desta informação, o cliente será forçado a

## 2. Estado da Arte

questionar o servidor para o obter da sua própria localização.

Na localização baseada em assinaturas GSM, a privacidade encontra-se salvaguardada sendo o processamento efectuado no equipamento cliente. Não existe comunicação entre o equipamento móvel e o servidor (as estações base), apenas são analisadas as assinaturas GSM detectadas pelo equipamento cliente. Os dispositivos móveis determinam os sinais transmitidos pelas estações base e realizam a medição da sua potência, usando essa informação para gerar uma base de casos e posterior predição da localização. No entanto, a colocação do peso da computação no lado cliente implica a existência de equipamento com capacidade de processamento e armazenamento suficientes.

**Acuidade e Precisão.** Os termos advêm dos termos anglo-saxónicos *Accuracy* e *Precision*. Um sistema de localização deve apresentar resultados com acuidade e precisão consistentes com as leituras realizadas. A acuidade corresponde ao nível mais fino de localização de um objecto por um determinado sistema. Por seu lado, a precisão corresponde à qualidade do sistema em garantir essa mesma exactidão. Por exemplo, receptores GPS de baixo custo apenas conseguem determinar localização num espaço de sensivelmente 10 metros em 95% dos casos. Receptores GPS mais robustos podem determinar a localização num espaço de 1 a 2 metros e em 99% dos casos. A distância representa a acuidade (*accuracy*) enquanto a percentagem de classificações correctas define a precisão (*precision*).

Os sistemas de localização devem jogar com estes dois parâmetros. A redução de um deles pode permitir o incremento do outro. Por exemplo, se estivermos dispostos a abdicar um pouco da acuidade do sistema podemos melhorar os valores da respectiva precisão.

Alguns sistemas de localização dependem do número de sensores existentes para a recolha de dados sobre o ambiente envolvente. Neste cenário é possível melhorar os valores de acuidade e precisão relativos à localização aumentando o número de sensores disponíveis (gerando assim mais informação) ou realizando uma fusão entre diferentes tipos de sensores (informação mais rica) [Hightower 2001].

**Escalabilidade.** A escalabilidade significa a capacidade de um sistema suportar um incremento dos pedidos de localização, mantendo o seu desempenho. O sistema GPS é um exemplo de um sistema escalável, permitindo um número ilimitado de receptores, em funcionamento contínuo, numa escala global, enquanto sistemas que recorrem a identificadores por RFID apenas suportam um pedido em cada instante para um local específico.

## 2. Estado da Arte

Soluções dependentes da arquitectura cliente-servidor podem estar restringidas ao número de acessos permitidos pela largura de banda do meio de transmissão adoptado. Este cenário é visível em sistemas de comunicação centralizados recorrendo a sinais de RF, cuja largura de banda apenas permite um limitado número de acessos antes do congestionamento dos canais disponibilizados. Acima desse limite poderemos obter um aumento da latência na determinação da localização dos objectos ou sofrer uma diminuição da respectiva acuidade.

O recurso à rede GSM implica uma dependência da sua cobertura e da disponibilidade do sistema. A capacidade de localização de um sistema baseado nesta tecnologia depende da área que a infra-estrutura GSM abrange, existindo, no entanto, uma elevada cobertura. No processo de localização recorrendo a assinaturas GSM não existe necessidade de comunicação entre os equipamentos móveis e as estações base (apenas é necessário analisar os sinais de RF transmitidos pelas estações base), não existindo assim restrições de largura de banda. Por outro lado, o processo ocorre em cada dispositivo móvel e não de forma centralizada, nas estações base. Desta forma, o sistema de localização baseado em assinaturas GSM encontra-se continuamente operacional desde que a infra-estrutura GSM esteja disponível. Este processo é assim perfeitamente escalável, permitindo o acesso a um número virtualmente ilimitado de dispositivos móveis.

**Reconhecimento.** Para aplicações que necessitam de reconhecer ou classificar os objectos localizados (de forma a executarem uma acção específica dependente do local onde se encontram) é essencial a existência de um mecanismo automático de identificação. A rede GSM, na sua componente de comunicação de voz e dados, permite e realiza a identificação automática dos dispositivos móveis que acedem à sua infra-estrutura, através do *International Mobile Equipment Identity* (IMEI) que cada dispositivo possui, sendo um identificador unívoco do equipamento, enquanto que o utilizador é identificado pelo *Subscriber Identity Module* (SIM). Porém, o processo de localização recorrendo a assinaturas GSM não implica qualquer comunicação específica entre os dispositivos móveis e as estações base. O dispositivo móvel apenas se autentica perante a rede GSM quando entra em funcionamento. Desta forma, não existe qualquer mecanismo de identificação automática (reconhecimento) dos dispositivos móveis, por parte das estações base, durante o processo de localização. Adicionalmente, não existindo reconhecimento, garante-se a sua privacidade.

**Custo.** O custo de um sistema de localização pode ser determinado partindo de diversos factores. Poderemos estar perante custos temporais, que incluem o processo de desenvolvimento e instalação da infra-estrutura, dos mecanismos de localização, bem como do processo de administração ou



## 2. Estado da Arte

gestão de todo o sistema. Os custos em termos de espaço incluem a área necessária para a instalação da infra-estrutura de suporte e todo o *hardware* necessário para o processo de localização. O custo financeiro (também designado por capital) implica o preço dos equipamentos necessários para o sistema. Por fim, surge o custo computacional [Hightower 2001]. Por exemplo, uma ferramenta baseado no sistema GPS apresenta custos de instalação e administração mínimos, já que o sistema GPS se encontra globalmente difundido e em funcionamento. No entanto, o desenvolvimento da infra-estrutura base apresenta custos elevados, tanto em termos temporais como financeiros.

A instalação e administração da infra-estrutura base da rede GSM apresenta custos extremamente elevados, seja em termos temporais, de área ou capital. No entanto, o processo de localização em si não tem em conta este conjunto de custos associados à infra-estrutura. A predição recorre às infra-estruturas da rede GSM existentes, não com o intuito de reservar recursos (como ocorre no estabelecimento de comunicações de voz ou de dados) mas procurando apenas analisar os sinais de RF transmitidos pelas estações base, não produzindo qualquer efeito sobre a rede GSM. Existem, porém, custos temporais relacionados com o processo de configuração da plataforma de localização nos dispositivos móveis, bem como o tempo necessário para o próprio processo de localização decorrer. Ambos se prevêem reduzidos, embora exista sempre a necessidade de um período de aprendizagem e actualização. Não existem custos em termos de espaço, sendo apenas necessário um equipamento móvel com acesso à rede GSM (actualmente apresentando tamanhos reduzidos) e os custos capitais estão associados ao valor da aquisição de cada equipamento móvel. Neste cenário, os custos variam entre algumas dezenas e algumas centenas de euros, dependendo das funcionalidades disponibilizadas pelo dispositivo móvel. Porém, para o processo de localização apenas é necessário possuir um equipamento simples com um modem GSM integrado.

**Limitações.** As limitações caracterizam-se pelas restrições que um sistema de localização apresenta para o seu correcto funcionamento. Ou seja, os requisitos que permitem o processo de localização.

A localização baseada em assinaturas GSM apresenta diversas limitações. Inicialmente, existe a necessidade de uma fase de aprendizagem para a construção de uma base de casos, necessária para o treino do algoritmo de predição. No entanto, caso existam modificações na infra-estrutura da rede GSM, como alteração das estações base, é necessário actualizar a base de treino. Por outro lado, os sinais de RF são sensíveis a perturbações do meio ambiente. Desta forma, o movimentos de pessoas e objectos, e a alteração da paisagem, como a edificação ou demolição de edifícios, pode produzir

## 2. Estado da Arte

erros no processo de localização.

Diferentes equipamentos GSM podem apresentar diferentes sensibilidades na detecção de sinais de RF, existindo, no entanto, uma relação linear entre as leituras realizadas pelos diferentes equipamentos. Assim, é necessário estabelecer uma função de transformação entre os diferentes equipamentos móveis e as amostras da base de casos.

## 2. Estado da Arte

### 2.4 Localização no interior de edifícios

#### 2.4.1 Baseada numa infra-estrutura existente

Neste capítulo iremos abordar os sistemas de localização que não necessitam de uma infra-estrutura dedicada para o seu funcionamento. Desta forma, estes sistemas baseiam-se em infra-estruturas físicas já existentes, usufruindo dos recursos disponibilizados.

Estas soluções são extremamente apelativas pois diminuem os custos de implementação do sistema (custos temporais e capitais). Convém realçar que na prática estes custos existem e podem ser elevados (como o caso do sistema GSM), porém, não se aplicam ao processo de localização. No entanto, embora recorram a infra-estruturas já disponíveis, estes sistemas de localização não absorvem recursos, analisando unicamente os sinais de RF, sem introduzirem entropia no sistema, tornando-se assim extremamente escaláveis.

Os sistemas baseados na análise de sinais de RF são bastante polivalentes, adaptando-se a qualquer configuração da infra-estrutura de suporte. Mais concretamente, os sistemas de localização baseados na tecnologia GSM, usualmente, podem ser aplicados em qualquer instante e em qualquer edifício devido à elevada cobertura da tecnologia de base<sup>4</sup>.

Neste grupo podemos encontrar soluções baseadas em tecnologias de RF, nomeadamente as redes Wi-Fi 802.11 ([Bahl 2000], [Ladd 2002], [Battiti 2002] e [Elnahrawy 2004]) e GSM ([Otsason 2005] e [LaMarca 2005])

#### Recorrendo à tecnologia Wi-Fi 802.11

Bahl *et al.* verificaram que o sinal proveniente do ponto de acesso (do termo anglo-saxónico *access points*) de uma rede 802.11 não sofre variações significativas num determinado local, mantendo-se razoavelmente estável. Este foi o princípio para o desenvolvimento do sistema Radar [Bahl 2000], um sistema de localização que procura determinar quais pontos de acesso que emitem os dados recebidos, em que localização e com que potência de sinal.

Este é o primeiro sistema a recorrer à análise de assinaturas de RF. Otsason [Otsason 2005], por seu lado, recorreu adicionalmente à análise de assinaturas de RF GSM, procurando comparar ambas as tecnologias (Wi-Fi 802.11 e o GSM). No decorrer do seu trabalho, Otsason verificou

---

<sup>4</sup>Existem cenários onde não é possível a sua aplicação. Por exemplo, em edifícios onde não existe cobertura GSM, ou onde ainda não tenha sido criada uma base de treino

## 2. Estado da Arte

que as assinaturas GSM permitem uma precisão semelhante, e por vezes superior, à obtida a partir de assinaturas 802.11. Embora Otsason afirme que uma das principais vantagens do uso de assinaturas GSM relativamente às assinaturas 802.11 seja a estabilidade das suas bases treino, actualmente o cenário é diferente, uma vez que a estrutura das estações base GSM pode ser alterada por diversos factores.

**RADAR** [Bahl 2000] Este foi o primeiro sistema a usar as assinaturas dos sinais de RF, recorrendo a uma rede 802.11. Esta técnica prima pelo facto de, ao invés de forçar a instalação de uma infra-estrutura física, recorrer à rede Wi-Fi existente.

As máquinas que estabelecem ligação com a rede enviam periodicamente pacotes que serão recebidos pelos *access points*, medindo a potência de sinal. Serão estes os dados usados para treinar o sistema, permitindo assim a localização de equipamento móvel.

O processo de localização é composto por duas soluções: uma empírica e outra baseada nos modelos de propagação dos sinais. A abordagem empírica baseia-se na análise das assinaturas da rede. Durante a fase de aprendizagem mede-se a potência dos sinais em diferentes locais ao longo do edifício, construindo assim uma base de treino. Originalmente procurou-se realizar medições em cada metro quadrado, no entanto, tornado-se morosa embora se tenham explorado formas de reduzir o tempo necessário para esta fase. A estimação advém da comparação das novas amostras com os existentes na base de treino, recorrendo ao algoritmo *Nearest Neighbors in Signal Space* para realizar as comparações. Como referido, esta abordagem necessita de uma fase inicial para a construção da base de treino e a consequente actualização numa eventual alteração da infra-estrutura.

De forma a reduzir o tempo necessário para o processo de recolha de leituras num edifício recorre-se à segunda abordagem. Neste caso, os sinais são estimados a partir de um factor de atenuação das paredes sobre os sinais, como função da distância e do número de paredes entre o equipamento móvel e os *access points*. Para o efeito, é necessário possuir uma planta detalhada das paredes do edifício, bem como um conjunto de medições que permita determinar o factor de atenuação de cada parede. Porém, os resultados obtidos recorrendo a esta abordagem apresentam uma qualidade inferior aos obtidos usando unicamente a abordagem empírica.

**Extensão ao sistema RADAR.** Após a primeira abordagem, Bahl *et al.* [Bahl 2000] apresentaram um conjunto de aperfeiçoamentos ao sistema

## 2. Estado da Arte

RADAR. Nomeadamente, propuseram o uso de um algoritmo designado *Viterbi* para a localização contínua de um utilizador. O algoritmo mantém um histórico contendo o padrão do movimento do utilizador para permitir o desempate em situações onde o sistema se encontra perante diversas localizações candidatas. Adicionalmente, também foi proposto um conjunto de bases de amostras distintas para diferentes cenários, permitindo o recurso à base de amostras mais adequada de acordo com a situação.

Outros autores procuraram igualmente aperfeiçoar a localização baseada em assinaturas da rede 801.11. Ladd *et al.* [Ladd 2002] aplicaram as abordagens tradicionais da área da robótica no processo de localização, introduzindo a modelação da localização como uma distribuição probabilística e uma manipulação explícita da distribuição do ruído. Battiti *et al.* [Battiti 2002] preocuparam-se em explorar outros métodos de aprendizagem para além do *k-Nearest Neighbors* (KNN). As suas abordagens incorporam o *Weighted k-Nearest Neighbors*, Rede Bayesianas e Redes Neurais. Com um objectivo semelhante à abordagem de Bahl *et al.* [Bahl 2000], Elnahrawy *et al.* [Elnahrawy 2004] procuraram diminuir o período necessário para a obtenção das leituras dos sinais da rede sem uma perda substancial da precisão, propondo para o efeito uma técnica baseada na interpolação.

### **Recorrendo à tecnologia GSM**

De forma idêntica ao uso das assinaturas de sinais de RF da rede 802.11, também é possível recorrer às assinaturas de sinais de RF GSM para a predição da localização. Um dos primeiros sistemas a explorar esta abordagem foi o PlaceLab [LaMarca 2005], no entanto, aplicada à localização no exterior. Embora recorrendo a uma vasta gama de fontes para além dos sinais de RF GSM (como os sinais provenientes das redes Wi-Fi 802.11 e Bluetooth), o sistema procurou reduzir o peso da construção da base de treino recorrendo a um processo de *war-driving*, que permitia obter os dados a partir do voluntarismo de instituições e indivíduos. Assim, foi possível cobrir uma elevada área geográfica de forma rápida, bem como obter dados de diversas zonas dispaes e distantes entre si.

De uma forma mais simplificada, Laasonen *et al.* [Elnahrawy 2004] propõem um sistema para a localização simbólica, baseado apenas na informação obtida a partir da estação base que se encontra a fornecer o serviço. Laitinen *et al.* [Laitinen 2001], por seu lado, recorrem ao uso das assinaturas GSM para a localização no exterior, no entanto, apenas recorrendo aos canais com a potência sinal mais elevado. Adicionalmente, mantêm a informação sobre o percurso do utilizador.

## 2. Estado da Arte

Mais recentemente, La Marca *et al.* [LaMarca 2005] e Otsason [Otsason 2005] procuraram explorar toda a informação disponível nos sinais de RF da rede GSM. Assim, ao contrário das abordagens anteriores, todos os canais recebidos num equipamento GSM foram tidos em conta para construir as amostras correspondentes às assinaturas GSM. Recorrendo a um algoritmo do tipo *K-Nearest Neighbors* (kNN) demonstraram que era possível obter resultados semelhantes, ou mesmo superiores, aos obtidos com recurso às assinaturas da rede Wi-Fi 802.11.

**Localização por assinaturas GSM (Otsason).** La Marca *et al.* [LaMarca 2005] e Otsason [Otsason 2005] partiram da assumpção de que os sinais de RF GSM apresentavam uma estabilidade temporal, mas variando entre diferentes posições, pelo que a localização de estações móveis poderia ser obtida com um elevado grau de precisão. O processo passa por uma fase de aprendizagem onde são realizadas leituras dos sinais de RF. Otsason realizou simultaneamente leituras da rede GSM bem como da rede 802.11, nos mesmos locais, com o intuito de comparar entre ambas as tecnologias no processo de localização. A inovação introduzida advém do facto de não usar apenas os 6 canais com a potência mais elevada mas a totalidade dos canais disponíveis (até um máximo de 32) captados pelo modem GSM. Os canais utilizados no processo de localização são do tipo BCCH (*Broadcast Control CHannels*), mantendo a potência de sinal estável, descartando os canais são do tipo PCH (*Paging CHannel*), cuja potência de sinal pode ser variável, de acordo com o FCCH (*Frequency Correction CHannel*).

Durante o processo de leituras recorreu-se a dois receptores de rádio-frequência, de forma a aceder simultaneamente à rede 802.11 e GSM. As leituras foram realizadas entre locais com um espaçamento de 1,5 metros, ao longo de 3 tipos de edifícios distintos, em zonas urbanas e rurais, com estruturas de betão e madeira.

Tal como sugerido por Bahl *et al.* [Bahl 2000], o processo de predição baseou-se no algoritmo *Weighted k-Nearest Neighbors*, recorrendo a valores baixos para o parâmetro  $k$  (usualmente 1, 2 e 4). Este algoritmo foi, em parte, seleccionado para possibilitar uma comparação directa entre os resultados obtidos com assinaturas GSM e com assinaturas 802.11.

Para efeitos de análise foram realizados testes com algoritmos alternativos, propostos por outras abordagens, para além do referido WkNN. Com o objectivo de comparar o uso de assinaturas GSM com o uso de assinaturas da rede 802.11 foram realizados testes entre o algoritmo proposto e o sistema RADAR. Para verificar a influência do número de canais que formam uma assinatura GSM, realizou experiências com diversas

## 2. Estado da Arte

configurações de canais. foram definidos 3 cenários: recorrendo apenas a 1 canal (com a potência mais elevada); recorrendo aos 6 canais com potência mais elevada; e recorrendo à totalidade dos canais disponibilizados pelo modem.

Os melhores resultados foram obtidos quando o processo de localização foi aplicado aos diferentes pisos isoladamente, agrupando as amostras em bases de treino separadas por edifício e por piso. Também foi demonstrado que o uso de assinaturas GSM consegue uma precisão semelhante, e por vezes ligeiramente superior, à obtida com assinaturas da rede 802.11. A manipulação dos diversos canais permitiu verificar que o uso da totalidade dos canais disponíveis é essencial para se obter uma precisão elevada. A acuidade foi inferior com amostras obtidas no edifício da zona rural (variando sensivelmente de 3 a 4 metros), enquanto as amostras recolhidas em edifícios de zonas urbana apresentaram uma acuidade entre entre 4 e 5 metros. O recurso a algoritmos alternativos apresentou precisões inferiores no processo de localização.

Com o seu trabalho, Otsason demonstrou a aplicabilidade das assinaturas GSM para o processo de localização no interior de edifícios. Verificou que o uso de assinaturas GSM permite uma precisão semelhante ou superior ao uso de assinaturas de RF 802.11, e que existe uma influência do número de canais que intervêm no processo embora não tenha explorado esse cenário. No entanto, Otsason não analisou a influência do meio ambiente, tanto nas condições climatéricas, como na variação do movimento de pessoas e objectos, ou ainda, o acesso à rede GSM em períodos de elevada ou baixa utilização do serviço de comunicação.

### 2.4.2 Baseada em infra-estrutura dedicada

Já foram desenvolvidos inúmeros sistemas de localização para o interior de edifícios recorrendo a diversas tecnologias. Os sistemas como o *Active Badge* [Want 1992] [Hopper 1993] ou o *ParcTab* [Want 1995] recorrem a emissores e detectores de infra-vermelhos, obtendo uma precisão de 5 a 10 metros. Outros sistemas, como o *Cricket* [Priyantha 2000] ou o *Active Bat* [Hopper 1997], usam a tecnologia de ultra-sons para estimarem a localização. Estes sistemas podem obter precisões que variam de alguns centímetros a vários metros, dependendo esta variação da calibração e densidade dos sensores.

Abordagem diferente é seguida pelos sistemas *SpotOn* [Hightower 2000] e *Landmarc* [Ni 2004] que recorrem a medições da potência de sinal de RFID para poderem determinar a localização num espaço a 3 dimensões.

## 2. Estado da Arte

Os sistemas que recorrem à tecnologia Bluetooth [Aalto 2004] [Patil 2002] podem recorrer às rede Bluetooth existentes, no entanto, estas não são estáveis e a sua cobertura é reduzida. Para manter fixas estas redes seria necessário a instalação de uma infra-estrutura específica para o efeito.

Todos estes sistemas se caracterizam por estarem restringidos a uma área física delimitada, ou, necessitarem de um infra-estrutura específica para poderem operar. Assim, a sua aplicação é limitada, devido à sua reduzida área de acção e/ou aos custos inerentes (tempo e capital) da instalação da infra-estrutura de suporte.

### **Active Badge**

Want *et al.* [Want 1992] [Hopper 1993] propuseram em 1992 o sistema de localização denominado *Active Badge*. Este sistema consiste na utilização de uma etiqueta por parte de cada indivíduo que imite um código único em cada 15 segundos através de emissores de infra-vermelhos. Distribuídos pelo edifício existem sensores que captam estes sinais e remetem-nos para uma base de dados centralizada, que processa a informação e a disponibiliza para as aplicações cliente. Sendo o sistema centralizado, este tem completo conhecimento da localização de todos os elementos. Apenas tem relevância o código transmitido pelo emissor, não sendo dada atenção a outros aspectos, como a potência do sinal ou o tempo de transmissão.

Recorre-se à tecnologia de infra-vermelhos para suportar este sistema. Isto implica a existência de algumas restrições inerentes à tecnologia de infra-vermelhos, como a necessidade de uma proximidade entre os emissores e os receptores (cerca de 6 metros), e inexistência de obstáculos entre o emissor e o receptor, não podendo o sinal transpor paredes ou qualquer outro objecto que se encontre entre ambos. Isto implica que estas etiquetas tenham de ser utilizadas em linha de vista, sobre o vestuário de cada indivíduo. Para um funcionamento eficiente do sistema, os sensores devem ser colocados o mais alto possível, perto dos tectos, nas entradas e saídas dos espaços públicos, não devendo existir sobreposições das zonas abrangidas por diferentes sensores.

O custo total dos receptores, emissores e toda a cablagem necessária é elevado, aumentando de acordo com a dimensão do edifício a cobrir pelo sistema. Estando dependente das propriedades dos infra-vermelhos, a sua aplicação fica restringida a áreas de reduzidas dimensões, devido ao curto alcance desta tecnologia, não permitindo a existência de obstáculos entre o emissor e o receptor, bem como não tolerando locais expostos directamente à luz solar.



## 2. Estado da Arte

### **Active Bat**

O sistema *Active Bat* [Hopper 1997], operacionalizado pelos investigadores da AT&T em 1999, usa a técnica de lateralização aplicada ao tempo de transmissão de impulsos ultra-sónicos, permitindo assim uma precisão superior ao sistema *Active Badge* [Hightower 2001].

Tal como no método anterior, os utilizadores necessitam de transportar um dispositivo (*Active Bat*), no entanto, produzindo neste caso pulsos ultra-sónicos. Dispostos pelo edifício, idealmente em tectos ou paredes, encontram-se os sensores que formam a infra-estrutura do sistema. Quando o controlador envia pedidos, recorrendo a ondas de RF de curto-alcance, os dispositivos respondem emitindo um pulso ultra-sónico que é detectado pelos sensores. Ao mesmo tempo que é emitido o pedido de RF por parte do controlador, também é enviado um sinal de sincronização, através da cablagem, para os sensores. Cada sensor mede o intervalo temporal entre o momento em que foi recepcionado o sinal do controlador e o momento em que foi detectado o pulso ultra-sónico do dispositivo, calculando assim a distância deste. O controlador remete então as diversas medidas dos sensores para um sistema centralizado que calcula a localização através do método de lateralização. Como os sensores podem receber, além do sinal de RF original emitido pelo dispositivo (que efectuou um percurso directo até ao sensor), reflexões desse sinal, é necessário aplicar um algoritmo estatístico para eliminação de erros gerados pelo processo.

Este sistema consegue detectar dispositivo com um erro de 9 cm da sua verdadeira localização em 95% das medições efectuadas. No entanto, para usar um método baseado no tempo de transmissão dos impulsos ultra-sónicos, é necessário um elevado número de sensores, sendo o sistema sensível à forma como são dispostos.

### **Cricket**

O sistema *Cricket* [Priyantha 2000], desenvolvido pelo MIT em 2000, baseia-se numa infra-estrutura de emissores de sinais de RF paralelamente com pulsos ultra sónicos, emitidos em simultâneo. O emissor, denominado *beacon*, é um equipamento associado a uma localização relativa ao espaço no edifício que o sistema abrange.

Os sinais emitidos são captados pelos receptores associados aos equipamentos que necessitam de obter a informação sobre a localização. Estes receptores, podendo ser móveis ou estáticos, recebem e analisam a informação, inferindo a sua localização. Assim, o sistema é descentralizado, ao contrário do *Active Badge* que centraliza e processa a localização de

## 2. Estado da Arte

cada emissor.

Os emissores são usualmente dispostos em locais onde não existam obstruções, como em tectos ou paredes, distribuídos pelo edifício. Os sinais de RF transmitidos são compostos por conjuntos de caracteres que identificam o local ao qual estão associados. Os receptores ao detectarem o sinal de RF activam o sensor de ultra sons aguardando pelo pulso ultra sónico que será recebido momentos após o sinal de RF, aproveitando o facto da velocidade do som ser muito inferior à velocidade da luz. O cálculo da localização é realizado medindo a diferença do tempo de recepção do sinal de RF e do pulso ultra sónico, fornecendo assim a distância até ao emissor mais próximo. Este sistema não permite determinar uma posição específica mas apenas uma área possível de localização.

### **RightSpot**

Cermak *et al.* [Cermak 2003] propuseram um algoritmo para a determinação da localização baseada na análise da potência de sinais provenientes de estações de rádio em FM regulares.

Partindo do princípio de que cada vez mais existem equipamentos móveis com capacidade de receber dados digitais codificados em sinais de rádio em FM, se for possível medir a potência dos sinais recebidos é então possível estabelecer a localização do equipamento. Para identificar a sua localização o sistema usa um vector de potências de sinal obtidas em diferentes frequências que são posteriormente classificadas, recorrendo a um algoritmo baseado em cálculos probabilísticos.

Embora não necessite de uma infra-estrutura específica existem, no entanto, algumas restrições a solucionar, nomeadamente o facto de diferentes equipamentos demonstrarem diferentes sensibilidades na recepção dos sinais de rádio em FM (um problema comum em sistemas baseados na análise de potências de sinais de RF).

### **PARCTab**

[Want 1995] foi desenvolvido pela Xerox Parc em 1993, sendo um protótipo com o objectivo de explorar as capacidades dos computadores móveis, como os PDAs, num ambiente de escritório.

O sistema consiste num (ou mais) PDAs com capacidade de comunicação sem fios (*wireless*) através de *transceivers* (transmissores-receptores) de infra-vermelhos. Estes *transceivers* são controlados por *gateways* que se encontram directamente ligados a postos de trabalho fixos (*workstations*)

## 2. Estado da Arte

contendo aplicações que controlam o sistema. Cada PDA é controlado por um agente, localizado nos postos de trabalho fixo. Com o sistema procurou-se garantir 3 princípios: portabilidade, constante conectividade e conhecimento da localização dos equipamentos.

Em qualquer momento, as aplicações em rede conseguem determinar a localização dos equipamentos móveis, possibilitando o seu controlo. Assim, os PDAs funcionam mais como terminais do que como computadores independentes, realizando funções locais de acordo com os pedidos invocados.

Com o objectivo de reduzir o recurso à tecnologia de infra-vermelhos para transmissão de sinais, procurou-se desenvolver aplicações onde o peso da computação fica-se localizado do lado dos postos de trabalho fixos, enquanto os equipamentos móveis lidavam apenas com as questões de interface. Esta solução, embora reduzindo o tráfego, implica a necessidade de capacidade computacional por parte dos equipamentos móveis.

Três aspectos essenciais restringem esta solução:

- a necessidade de uma infra-estrutura específica para suportar a comunicação com os equipamentos móveis, tendo sempre em atenção a obrigatoriedade de não existirem obstáculos entre os *transceivers* e os equipamentos móveis (devido à natureza dos sinais de infra-vermelhos que necessitam de linha de vista para a sua transmissão);
- a complexidade da arquitectura para gestão das aplicações nos postos de trabalho fixo e nos equipamentos móveis;
- a largura de banda necessária para transferência de dados.

### **Baseada no GPS**

O sistema GPS, devido à sua elevada sensibilidade, não é adequado para a localização no interior de edifícios [Kaplan 1996] [Global Locate Inc 2006]. Este sistema necessita de uma comunicação em linha de vista entre o conjunto dos satélites geo-estacionários e o equipamento receptor. Assim, não podem existir obstáculos na transmissão, como sucede no interior de edifícios, pelo que não é adequado à localização em espaços fechados.

A necessidade de efectuar diversos cálculos para a computação da localização implica um elevado período temporal inicial (de alguns segundos a alguns minutos) para que o receptor GPS determine a sua posição [Global Locate Inc 2006]. Um método denominado *Assisted GPS* [Djuknic 2001] tem por objectivo à redução desse tempo. Esta solução

## 2. Estado da Arte

assume interesse para equipamento móvel que possua um receptor GPS integrado, reduzindo assim o tempo de computação. No entanto, este processo, embora apresente um bom grau de precisão no espaço exteriores, continua a não possibilitar uma localização no interior dos edifícios devido à ausência de linha de vista entre o equipamento móvel com receptor GPS e um conjunto de satélites.

Uma nova tecnologia, denominada por *indoor GPS* [Abraham 2001] possibilita o uso do sistema GPS no interior de edifícios no âmbito da localização. No entanto, é necessário disponibilizar um elevado número de emissores de sinais de RF no interior do edifício que funcionam como repetidores do sinal original. O método de localização é baseado na trilateração, não tendo em conta as questões relacionadas com a propagação dos sinais, necessitando assim de um elevado número de repetidores ou espaços sem obstáculos.



## Capítulo 3

# Um Algoritmo de Localização Baseado em Assinaturas GSM

Como fora exposto anteriormente, o presente trabalho tem como objectivo apresentar uma abordagem alternativa para a localização no interior de edifícios, surgindo como uma extensão dos sistemas de localização já existentes, descritos no capítulo anterior. A tecnologia GSM tem sido pouco explorada neste contexto, embora já existam trabalhos nesse campo ([Otsason 2005], [LaMarca 2005]).

Para o efeito, pretende-se estudar e manipular as assinaturas GSM e a sua possível aplicação no processo de localização, recorrendo a um algoritmo baseado na procura por instâncias. O presente capítulo descreve o processo para a aquisição de assinaturas a partir da rede GSM, a sua manipulação e transformação numa base de casos e o respectivo algoritmo de predição da localização.

### 3.1 Caracterização das assinaturas GSM

Uma assinatura GSM é constituída por um vector de canais de RF GSM e a respectiva potência de sinal transmitidos pela rede GSM<sup>1</sup>, que se designa por vector de potências. Uma amostra, ou uma instância, é

---

<sup>1</sup>Na prática, quando um terminal GSM produz uma amostra realiza um conjunto de leituras sucessivas da rede GSM, armazenando, para cada canal, um vector com as diversas potências de sinal recolhidas. A potência de sinal de cada canal (campo `rx1`) corresponde a uma média desses valores. Assim, uma amostra é composta por um vector (os vários canais) de vectores (as diversas potências de sinal para cada canal). Por simplicidade, refere-se que uma amostra é constituída por um vector de potências de sinal.

### 3. Um Algoritmo de Localização Baseado em Assinaturas GSM

composta a partir de uma assinatura GSM recolhida por um terminal GSM à qual posteriormente será anexada informação complementar. Quando a instância é classificada, adicionando a informação sobre a localização onde foi recolhida, passa a ser designada por caso ou exemplo. O conjunto dos vários casos armazenados forma a base de treino (ou base de casos) que permitirá a classificação de futuras instâncias.

O processo de predição da localização baseia-se no análise de casos construídas a partir de assinaturas GSM. A construção de uma base de casos passa por um processo de recolha, manipulação e armazenamento de assinaturas GSM, sendo então necessário acesso à rede GSM para a aquisição e análise dos respectivos sinais. Este acesso é possível através de um terminal GSM e um cartão SIM, para autenticação e autorização perante o operador de telecomunicações GSM. Para o presente trabalho recorreu-se ao terminal Sony Ericsson GT-47 (figura 3.1). O seu controlo e manipulação são realizados através do envio de comandos AT (também designados por *Hayes Command Set*).



Figura 3.1: Terminal Sony Ericsson GT-47.

O acesso à informação da potência de sinal dos diferentes canais transmitidos pelas estações base é conseguido recorrendo ao comando `AT+E2EMM=5`, designado *engineering mode*. A estrutura do resultado deste comando pode ser verificada na secção de anexos (Anexo B).

Os valores mais relevantes para o estudo da localização são os parâmetros `ch` (*Channel*, que representa o *Absolute Radio Frequency Channel Number* ou ARFCN), disponibilizando o valor absoluto do canal de RF que identifica o portador *Broadcast Control Channel* (BCCH) e `rx1`, representando a potência do sinal (*Received Signal Strength Level*), em mili-decibel (dBm). O conjunto destes parâmetros permite identificar os canais recebidos e a respectiva potência de sinal. Será a partir deste valores que serão construídas as assinaturas GSM.

### 3. Um Algoritmo de Localização Baseado em Assinaturas GSM

Um terminal GSM detecta, dependendo da organização das estações base, sensivelmente de 16 a 32 canais distintos do tipo BCCH, apresentando uma potência estável e constante. Durante o estabelecimento de comunicações de voz ou dados existe um conjunto de canais do tipo PCH - (*Paging CHannel*), cuja potência pode ser variável. Pela sua estabilidade temporal, apenas os canais BCCH são usados no processo de localização.

A par do canal BCCH existe ainda um conjunto de dados disponibilizados disponível pela rede GSM, não explorado actualmente mas à qual se poderá recorrer para melhorar a qualidade do processo de localização. Entre essa informação encontra-se o parâmetro **Bsic** (*Base Stations Identification Code*), indicando o código identificador único da estação base. Uma base de treino que armazene casos recolhidas em edifícios de diferentes regiões geográficas<sup>2</sup> poderá recorrer a este parâmetro para distinguir entre casos semelhantes, embora recolhidos em edifícios distintos.

Para cada localização que se pretende mapear no interior de um edifício é realizado um conjunto leituras sucessivas. O número de amostras a recolher deve ser semelhante para todas as divisões do edifício. Um excessivo ou reduzido número de amostras poderá afectar o processo de predição, tanto na sua precisão como no tempo necessário para a sua execução. O conjunto de amostras recolhido, após classificado, constituirá a base de casos.

---

<sup>2</sup>Assinaturas GSM recolhidas em diferentes regiões, distantes entre si, podem apresentar uma estrutura semelhante, pois diferentes estações base que não se sobreponham na sua área de cobertura podem recorrer os mesmos canais de transmissão.



## 3. Um Algoritmo de Localização Baseado em Assinaturas GSM

### 3.1.1 Processo de transformação de amostras

O processo de transformação é realizado em dois passos. O primeiro, embora facultativo, pretende reduzir possíveis erros de leitura e caracteriza-se pela geração de um novo caso a partir de um conjunto de casos da base de treino. O segundo, sendo obrigatório, pretende enriquecer a informação disponibilizada pelos casos da base de treino adicionando dados complementares, como o valor de interesse dos respectivos canais.

#### Primeiro passo - geração de novos casos

O objectivo do primeiro passo do processo de transformação é a eliminação ou redução do efeito de erros esporádicos ou situações anómalas ocorridas durante a aquisição de dados. Estes erros podem ter origem no equipamento GSM que realiza as leituras ou provenientes da própria rede GSM (propagados a partir das estações base ou por interferências do meio ambiente). O princípio passa pelo cálculo da média dos vectores de potências de sinal de um conjunto de amostras, ao invés de recorrer a cada amostra individualmente durante o a predição da localização.

Durante a fase de recolha de amostras são realizadas diversas leituras para cada localização. Cada posição tem assim associado um conjunto de amostras, que estando classificadas designam-se por casos. O primeiro passo do processo de transformação parte de um grupo de casos para a mesma localização produzindo um novo caso<sup>3</sup>. Cada caso é constituído por um vector de potências, onde cada potência está associada a um canal distinto. O respectivo vector do novo caso é preenchido pelo cálculo da média dos vectores de potências dos casos originais. Para cada posição do vector do novo caso (que representa um canal distinto), a par do cálculo da média que representa a potência de sinal, também é determinado o respectivo desvio padrão. Tendo sido produzido um novo caso, os originais, que podem apresentar erros de leitura, são descartados. O conjunto das novas amostras será sujeito ao segundo passo do processo de transformação, constituindo a base de treino final.

---

<sup>3</sup>É preferível recorrer a um número de casos base que seja divisor do valor total de leituras realizadas para cada posição. Por exemplo, no presente estudo realizaram-se 10 leituras em cada posição, logo, deveriam-se usar idealmente 2, 5 ou 10 casos base no processo de transformação para não existir perda de casos (embora 1 seja divisor de 10 não tem interesse neste processo). Se recorrermos a outros valores existem casos que não podem ser agrupadas e como tal não serão utilizados. Por exemplo, se usarmos 3 casos base, em cada 10 casos geram-se 3 novos casos e um caso não consegue ser agrupado pelo que não será utilizado. Se recorrermos a 4 casos base, isto permite gerar 2 novos casos (cada um com 4 casos base), porém, os restantes 2 casos base não são suficientes para criar um novo caso, pelo que não serão utilizados.

### 3. Um Algoritmo de Localização Baseado em Assinaturas GSM

O processo de transformação reduz a quantidade de casos disponíveis. Cada conjunto de  $n$  casos permite a geração de apenas um novo caso. Este valor deve ser adequado ao ambiente em causa. Se se detectar uma reduzida percentagem de erros o número de amostras para produzir um novo caso deve ser baixo. Contrariamente, se a probabilidade de erro nas leituras é elevada então o número de amostras necessário deve ser superior para permitir reduzir a influência dos erros durante a predição da localização.

#### Segundo passo - adição de informação aos casos

O segundo passo do processo de transformação pretende anexar informação adicional a cada caso. Estes novos dados vão posteriormente auxiliar o processo comparação das novas instâncias com os casos da base de treino.

Sendo um caso constituído por um conjunto de potências de sinal associado a cada canal, é possível determinar os valores médios e os respectivos desvios padrão. Partindo destes valores podemos calcular uma função de interesse, que caracteriza os diferentes canais que compõem um caso. Esta função de interesse, ou *Valor de Interesse* (VI), é definida pela fórmula:

$$ValorInteresse = \frac{MediaPotenciasSinal}{DesvioPadrao} \quad (3.1)$$

A fórmula anterior representa o inverso do coeficiente de variação<sup>4</sup> (também designado de coeficiente de dispersão), sendo esta uma medida de dispersão com o objectivo de comparar distribuições distintas. O resultado da aplicação desta fórmula favorece os canais com um maior valor médio da potência do sinal e reduzida variação. Kaemarungsi [Kaemarungsi 2004] defende que, para canais com maior desvio padrão, existe uma reduzida probabilidade da instância de treino estar próximo do valor médio da potência do sinal.

Um caso, após o processo de transformação, é constituído pela identificação do local onde a assinatura foi recolhida e um vector de potências. Cada posição do vector corresponde a um canal distinto, onde é armazenada a identificação do canal, a potência de sinal (cálculo médio), respectivo desvio padrão e o valor de interesse. O vector de potências é ordenando pelo valor de interesse dos diversos canais. Associado a cada canal existe um parâmetro binário. Este parâmetro permite seleccionar

---

<sup>4</sup>O desvio padrão é uma medida de dispersão relativa à média. Duas distribuições podem apresentar médias distintas, pelo que o seu desvio padrão não é directamente comparável. Para o efeito recorre-se ao coeficiente de variação definido pela razão entre o desvio padrão e a média.

### 3. Um Algoritmo de Localização Baseado em Assinaturas GSM

quais os canais que devem intervir durante o processo de predição da localização, permitindo assim estudar a sua influência. A Figura 3.2 representa o exemplo de um instância classificada para uma localização simbolicamente designada por "1.2".

Place	Channel	Rx 001	Rx 002	Rx 003	Rx 004	...	Average	St Dev	Used
1.2	1	41	47	42	31		40.25	6.70	N
	5	23	34	18	24		24.75	6.70	Y
	21	1	2	1	2		1.50	0.58	Y
	7	1	3	5	1		2.50	1.91	Y
	17	1	1	2	3		1.75	0.96	Y
	19	2	0	1	2		1.25	0.96	N
	29	3	2	3	3		2.75	0.50	Y
	25	2	3	3	2		2.50	0.58	Y
	31	2	3	4	5		3.50	1.29	Y
	11	1	2	3	2		2.00	0.82	Y
	9	2	4	1	1		2.00	1.41	Y
	23	2	5	3	3		3.25	1.26	Y
	499	4	1	0	2		1.75	1.71	Y
	500	6	3	2	3		3.50	1.73	Y
	424	5	3	4	4		4.00	0.82	Y
	431	6	4	4	5		4.75	0.96	Y

Figura 3.2: Representação de um instância localizada para a posição 1.2.

O processo de transformação descrito é aplicado a todas as amostras obtidas na fase de recolha de dados, produzindo uma base de treino. Esta fase de aprendizagem é essencial para permitir o mapeamento das diversas localizações. Uma maior acuidade implica uma maior quantidade de amostras recolhidas. Porém, existe um custo temporal associado, tanto na recolha de dados como no seu processamento.

Alterações na configuração da infra-estrutura física da rede GSM implicam a actualização da base de treino. Soluções cooperativas podem ser exploradas para a criação e manutenção das bases de casos, tal como proposto por La Marca *et al.* no sistema *PlaceLab* [LaMarca 2005]. Com o intuito de reduzir o peso das bases de treino nos dispositivos móveis (com recursos limitados) podem procurar-se soluções centralizadas que disponibilizem num servidor as bases de casos disponíveis. Desta forma, cada dispositivo obteria do servidor a base de treino necessária de acordo com a sua posição. Porém, colocam-se questões de escalabilidade do sistema, bem como da arquitectura de suporte.

### 3. Um Algoritmo de Localização Baseado em Assinaturas GSM

## 3.2 Algoritmo para predição da localização

O algoritmo de predição tem como objectivo determinar a localização de uma assinatura GSM partindo da comparação desta com a base de casos. Para o efeito, percorre-se o conjunto de casos que constituem a nossa base de treino e procuram-se semelhanças com a instância que se pretende classificar.

Esta abordagem é definida como um mecanismo de aprendizagem baseada em instâncias, recorrendo a um algoritmo *lazy learning*. Existindo um passo indutivo mais curto do que os algoritmos *eager learning* espera-se uma menor taxa de erro. Este processo caracteriza-se por uma fase de recolha de instâncias que serão classificadas e armazenados em memória formando uma base de casos. Numa fase posterior, novas instâncias (não classificadas, das quais se desconhece a sua localização) serão comparados com a informação em memória, procurando-se então o caso mais semelhante. Existe assim uma aproximação local de cada caso da base de treino com a instância a classificar.

Um aspecto essencial para todo o processo de localização é a capacidade de determinar a semelhança entre a instância e os casos da base de treino. Em algoritmos alternativos, como o kNN, o processo de cálculo da semelhança recorre à distância Euclidiana<sup>5</sup>. Outros algoritmos podem implementar o Coeficiente de Correlação de Spearman<sup>6</sup> (CCS). Estes são processos perfeitamente definidos e testados, caracterizados pela sua simplicidade de implementação e execução. A sua aplicação generalizada na resolução de problemas distintos não permite integrar informação específica sobre cada problema, como por exemplo o comportamento dos sinais de RF GSM.

Para o algoritmo proposto, o cálculo da semelhança entre instâncias é realizado a partir de uma função designada por *Valor de Dissemelhança* (VD). Esta função tem o intuito de incorporar na sua definição parâmetros sobre o comportamento dos sinais de RF GSM, nomeadamente a informação sobre a potência e ordenamento dos canais que constituem uma assinatura GSM. A sua definição é expressa pela seguinte fórmula:

---

<sup>5</sup>Considerando dois vectores  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  e  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ , a distância Euclidiana é calculada através da seguinte fórmula:

$$\sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2}$$

<sup>6</sup>Considerando dois vectores ordenados com a mesma dimensão  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  e  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ , o coeficiente de correlação de Spearman é definido pela seguinte fórmula:

### 3. Um Algoritmo de Localização Baseado em Assinaturas GSM

$$ValorDissemelhanca_{(c,i)} = \sum_{j \in \{0 \dots n\}} ((dist_{ci} + 1) * ABS(Rx_{c_j} - Rx_{i_j})) \quad (3.2)$$

A função é composta por vários parâmetros, onde a variável  $c$  representa um caso da base de treino (instância classificada),  $i$  a instância (não classificada),  $j$  a posição do canal na instância,  $dist_{ci}$  a distância entre a posição do canal na instância e no caso,  $n$  o número de canais considerados,  $ABS$  o valor absoluto, e  $Rx_c$ ,  $Rx_i$  o *Received Signal Strength Indication* (RSSI), ou seja a potência do sinal, para o canal número  $j$ , no caso e na instância. Esta abordagem permitiu-nos obter resultados superiores aos adquiridos recorrendo à distância Euclidiana ou ao coeficiente de correlação de Spearman.

O processo de comparação entre a instância e cada caso da base de treino consiste em percorrer o vector <sup>7</sup> dos canais da instância e determinar a posição do canal correspondente no caso, calculando a diferença entre ambas as posições<sup>8</sup> ( $dist_{ci}$ ).

Este processo pretende penalizar assinaturas que apresentem um ordenamento<sup>9</sup> dos vectores de canais distinto entre si, o que representa assinaturas potencialmente diferentes. Ao valor obtido aplicamos o produto da diferença (o seu valor absoluto) entre a potência de sinal do canal no caso e a potência de sinal do canal na instância. Este passo procura penalizar instâncias e casos divergentes (que apresentam diferentes potências de sinal para os mesmos canais) e valorizar os semelhantes. O valor de dissemelhança entre a instância e o caso é então o somatório das diferenças entre os canais de ambos. Quanto maior for este valor mais diferenças são acumuladas e mais distintas são as instâncias entre si. Contrariamente, quando menor for o valor, menor é o número de diferenças entre as instâncias, existindo assim uma maior semelhança entre si. Procuram-se então as instâncias classificadas com um reduzido valor de dissemelhança.

---


$$1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n rank(x_i) - rank(y_i)^2}{n(n-1)^2}$$

medindo a correlação entre duas sequências de valores ordenados, de acordo com os pesos associados, sendo o seu resultado um valor entre a gama 1 e -1. Quanto mais próximo do valor 1, mais semelhança existe entre os dois conjuntos.

### 3. Um Algoritmo de Localização Baseado em Assinaturas GSM

Num cenário em que a instância apresente um canal que não existe no caso, não é possível calcular a respectiva diferença de posições do canal. Esta situação deve ser penalizada pois representa uma nítida diferença entre a instância e o caso. Assim, o parâmetro correspondente à diferença de posições ( $dist_{ci}$ ) deve ser definido com um elevado valor, preferencialmente acima de 32, sendo esse o número de possíveis canais (BCCH) em cada assinatura. É necessário ter em atenção que esta penalização não deve ser excessiva. A omissão de um canal numa instância pode dever-se à sua inexistência (não sendo transmitido pela estação base), como devido a outros factores não relacionados com a rede GSM, por exemplo, devido a uma falha ou reduzida sensibilidade por parte do terminal GSM que realizou as leituras.

A descrição anterior refere-se ao cálculo da semelhança entre um caso e uma instância, sendo o primeiro relativa a uma localização conhecida e a segunda pertencente a uma posição desconhecida (não classificada). Uma base de treino é composta por diversos casos. Assim sendo, este processo será aplicado entre a instância e todos os casos que fazem parte da base de treino, determinando os respectivos valores de dissemelhança. Os casos que apresentem um menor valor de dissemelhança relativamente à instância correspondem aos casos mais semelhantes (logo mais próximos). A localização da instância é obtida através do caso com menor valor de dissemelhança. Se existam vários casos com o menor valor possível de dissemelhança, então, a localização da instância é determinada seleccionando aleatoriamente um dos casos. Esta solução, embora simples, é susceptível de um estudo mais aprofundado.

Para a implementação do algoritmo apresentado não foi prestada atenção às questões de eficiência e optimização. No entanto, esta é uma questão premente, especialmente quando nos referimos a equipamento móvel como *Personal Data Assistants* (PDA) e telemóveis (ou *smart phones*), onde os recursos, como a memória e a capacidade computacional, são limitados. No futuro, devem ser procuradas técnicas que permitam reduzir o peso da base de casos no processo de localização.

---

<sup>7</sup>No capítulo 4 é apresentado um estudo relativamente à influência do número de canais no processo de localização.

<sup>8</sup>Por exemplo, se uma instância apresenta o canal 99 na 1.<sup>a</sup> posição da lista de canais disponíveis, e o caso, com a qual será comparada, também apresenta o mesmo canal 99 na 1.<sup>a</sup> posição, então a distância das posições dos canais será de 0. Se, contrariamente, o caso apresenta o canal na 3.<sup>a</sup> posição (e não na 1.<sup>a</sup>), então a distância entre as posições dos canais será de 2.

<sup>9</sup>Os canais são ordenados pelo seu *Valor de Interesse* no passo anterior, durante o segundo passo do processo de transformação de instâncias.



## Capítulo 4

# Resultados Experimentais

### 4.1 Ambiente experimental

#### 4.1.1 Descrição do processo de recolha de amostras

O processo de recolha de dados (assinaturas GSM) decorreu seguindo um plano específico que englobou diversos cenários. Este foi desenvolvido no âmbito de uma colaboração com a empresa PT-Inovação, que financiou o estudo do comportamento dos sinais de RF GSM no interior de edifícios e a sua adequabilidade no processo de localização [Bento 2007]. Esta fase permitiu obter cerca de 480 000 assinaturas GSM, das quais foi seleccionado um conjunto (1230 amostras) para análise do comportamento dos sinais de RF GSM e da capacidade preditora do algoritmo proposto.

Especificaram-se 4 edifícios para recolha de dados:

- um apartamento residencial amplo na periferia de uma cidade densamente povoada (Urbanização da Quinta da Lomba, Coimbra - UQL), com pouca movimentação no meio envolvente. A estrutura do edifício é composta por betão com paredes internas de tijolo, englobando isolamento térmico (figura 4.1);
- um apartamento residencial numa vivenda geminada na periferia de uma cidade densamente povoada (Urbanização Quinta da Boavista, Coimbra - UQB), com reduzida movimentação no meio envolvente, mas próximo de vias de comunicação movimentadas. A estrutura do edifício é composta por betão com paredes internas de uma só camada de tijolo, sem englobar isolamento térmico (figura 4.1);
- um edifício de grandes dimensões, com topologia heterogénea, composto por salas de aulas, grandes espaços como corredores, anfiteatros e jardins internos que interagem com pequenos espaços condicionados, como gabinetes e salas de aulas de pequena dimensão



## 4. Resultados Experimentais

(Departamento de Engenharia Informática, Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Coimbra - DEI-FCTUC) localizado na periferia de uma cidade densamente povoada (Coimbra), com muita movimentação no seu interior e no meio envolvente. O edifício encontra-se numa zona não residencial e não industrial, sendo um polo universitário. Como tal, existe um elevado movimento de pessoas durante o dia. A estrutura do edifício é composta essencialmente por betão e paredes de tijolo, embora apresente janelas externas de diversas dimensões (figura 4.2);

- um edifício de média/grande dimensão, com topologia heterogénea, composto por divisões com diversos tamanhos (usualmente de pequenas dimensões) como salas de aulas, anfiteatros e gabinetes (Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Oliveira do Hospital, Instituto Politécnico de Coimbra - ESTGOH-IPC) no centro de uma cidade de média dimensão (Oliveira do Hospital). A zona é caracterizada por um misto de habitações residenciais e comerciais, com muita movimentação no meio envolvente. A estrutura do edifício é composta essencialmente por betão nas paredes externas e um conjunto de paredes de tijolo e contraplacado nas paredes internas (figura 4.2).

O plano de leituras é composto por 2 cenários distintos, aplicados aos diversos edifícios. Em cada cenários, o processo de leituras repetiu-se 4 vezes. Em cada ponto foram recolhidas 10 amostras. Sabendo que o a movimentação de pessoas afecta o esquema de reflexão dos sinais de RF GSM [Bento 2007], influenciando assim a potência dos diversos canais que constituem uma assinatura GSM, procurou-se obter as amostras em períodos com uma movimentação reduzida (ou mesmo nula) de pessoas. Os cenários caracterizam-se da seguinte forma:

- Sequência de leituras em vários pontos num espaço aberto, sem obstáculos (por exemplo, um corredor). As leituras são realizadas no mesmo período temporal (período inferior a uma hora), mantendo assim as condições temporais e as perturbações pela movimentação de pessoas no edifício. As leituras foram realizadas com um espaçamento de 5 metros entre cada ponto de recolha de amostras. Este esquema de leituras é designado por leitura Dinâmica em Espaço Aberto (DEA);
- Sequência de leituras em vários pontos ao longo de um espaço fortemente compartimentado por paredes (que dependendo do local onde foram recolhidas poderiam ser constituídas por diversos materiais, como betão, tijolo ou contraplacado). Tal como no cenário anterior, as leituras são realizadas no mesmo período de temporal (período inferior a uma hora), mantendo assim as condições temporais

#### 4. Resultados Experimentais

e as perturbações pela movimentação de pessoas no edifício. Os pontos de leitura localizaram-se no centro dos compartimentos, existindo apenas um ponto de recolha de amostras. Este esquema de leituras é designado por leitura Dinâmica em Espaço Fechado (DEF).

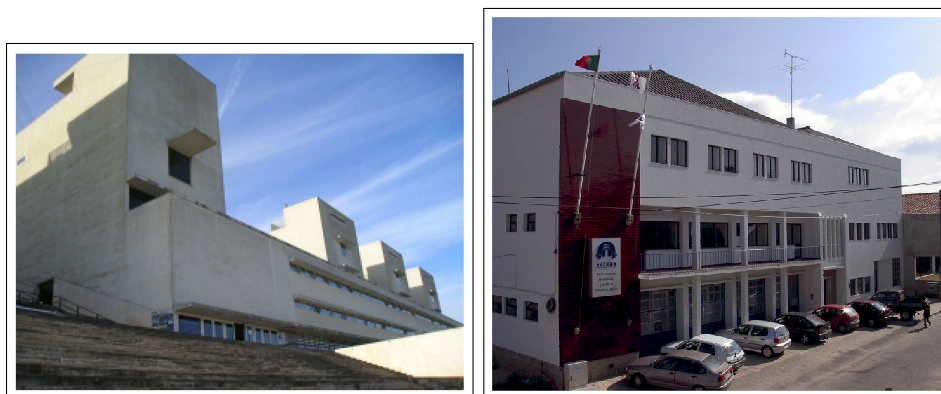
A figura 4.3 apresenta alguns exemplos de espaço aberto e fechado nos edifícios do DEI e da ESTGOH. As figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 representam as estruturas internas dos 4 edifícios onde foram realizadas as recolhas de amostras, identificando os percursos realizado em espaço aberto e espaço fechado.



(a) Apartamento na Urbanização da Quinta da Lomba

(b) Apartamento na Urbanização da Quinta da Boavista

Figura 4.1: Apartamentos residenciais na Urbanização da Quinta da Lomba (a) na Urbanização da Quinta da Boavista (b).



(a) Edifício do DEI

(b) Edifício da ESTGOH

Figura 4.2: Edifícios institucionais do DEI(a) e da ESTGOH (b).

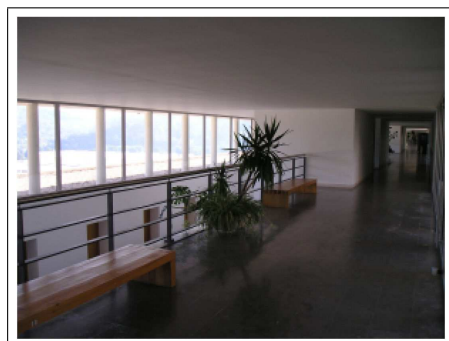
## 4. Resultados Experimentais



(a) Espaço aberto (corredor) na ESTGOH



(b) Espaço fechado (sala de aula) na ESTGOH



(c) Espaço aberto (corredor) no DEI



(d) Espaço fechado (sala de aula) no DEI

Figura 4.3: Exemplo de zonas em espaço aberto, representando um corredor no edifício da ESTGOH (a) e do DEI (c) e exemplo de zonas em espaço fechado, representando uma sala de aula do edifício da ESTGOH (b) e do DEI (d).

#### 4. Resultados Experimentais

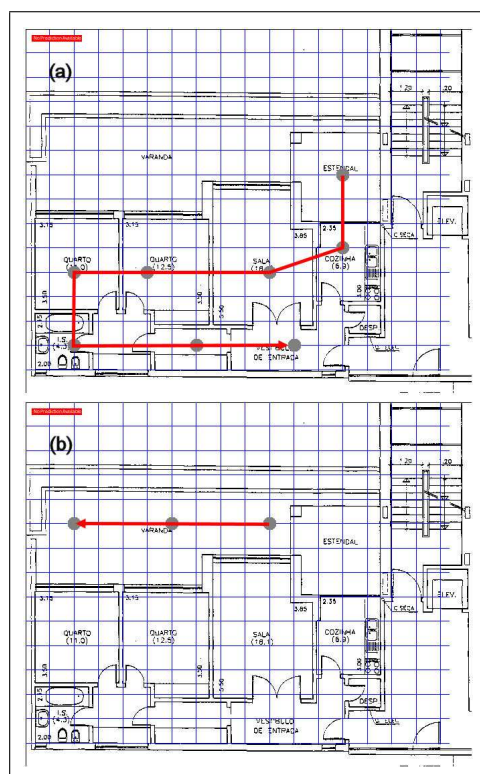


Figura 4.4: Mapa de leituras no apartamento da Urbanização da Quinta da Lomba, indicando a orientação da recolha de amostras em espaço fechado (a) e em espaço aberto (b).

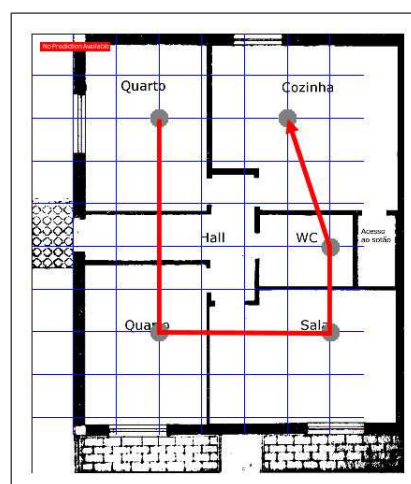


Figura 4.5: Mapa de leituras no apartamento da Urbanização da Quinta da Boavista, indicando a orientação da recolha de amostras em espaço fechado.

## 4. Resultados Experimentais

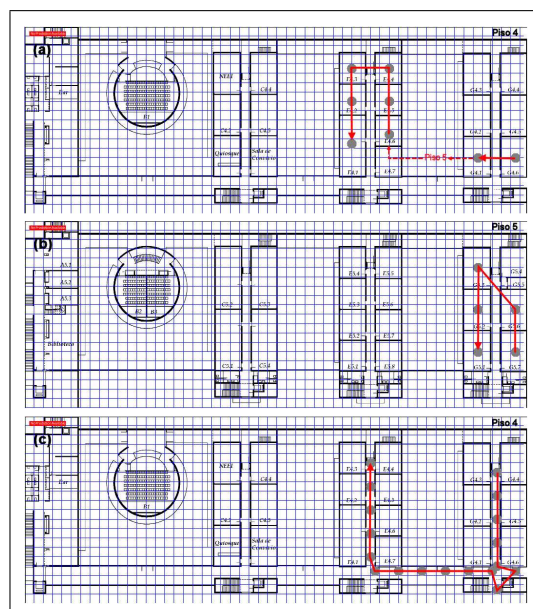


Figura 4.6: Mapa de leituras no edifícios do DEI, indicando a orientação da recolha de amostras em espaço fechado (a) (b) e em espaço aberto (c).

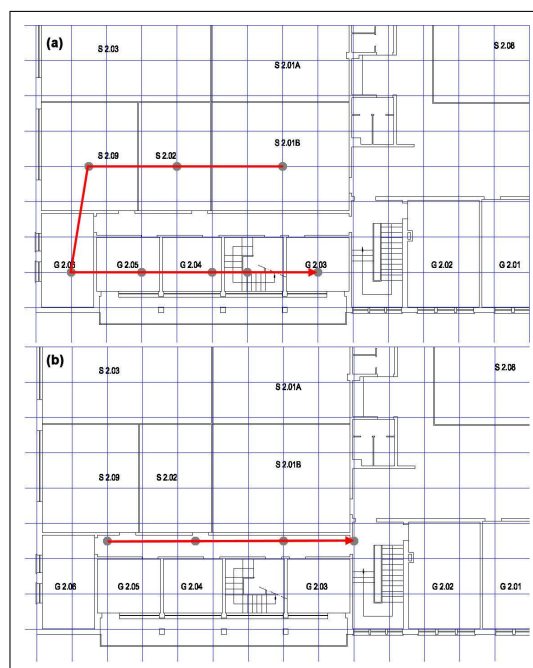


Figura 4.7: Mapa de leituras nos edifício da ESTGOH, indicando a orientação da recolha de amostras em espaço fechado (a) e em espaço aberto (b).

## 4. Resultados Experimentais

### 4.1.2 Caracterização das amostras recolhidas

O processo de recolha de amostras compreendeu 4 edifícios e 2 cenários de leituras distintos aplicados a todos os edifícios: Dinâmica em Espaço Aberto (DEA), em Dinâmica em Espaço Fechado (DEF). No processo de aquisição de amostras em DEA e DEF foram realizadas quatro passagens distintas sobre o mesmo percurso. Este processo totaliza 1230 amostras (869 das quais em espaço fechado e 370 em espaço aberto). A tabela seguinte (4.1) sumaria a distribuição dos dados recolhidos.

	DEI	ESTGOH	UQL	UQB	Total
DEF	260	320	200	80	860
DEA	180	160	30	-	370
Total	440	480	230	80	<b>1230</b>

Tabela 4.1: Descrição das amostras recolhidas em Dinâmica de Espaço Aberto e Dinâmica de Espaço Fechado nos 4 edifícios.

Cada conjunto de amostras recolhido em cada edifício, por cenário (DEF e DEA), compreende 4 subconjuntos, que correspondem às 4 passagens para recolha de dados em cada cenário num edifício. Estes 4 subconjuntos em cada cenário foram aleatoriamente agrupados entre si, gerando assim um único conjunto de amostras por cada edifício e cenário. Posteriormente, procedeu-se à sua subdivisão em 2 grupos: treino e classificação. A tabela seguinte (4.2) descreve a percentagem de amostras para cada grupo, em cada edifício. Esta subdivisão gerou 3 configurações de classificação distintas:

- *K-fold Cross Validation* (10FCV), com o valor 10 para o parâmetro  $k$ , onde um conjunto de  $m$  exemplos é subdividido em  $k$  conjuntos (*folds*) de tamanho  $m / k$ . Para cada conjunto, um classificador é treinado nos restantes grupos e testado nesse mesmo conjunto (validação cruzada);
- 75% das amostras do conjunto são usadas para treino, enquanto 25% são usadas para classificação (75/25);
- 50% das amostras do conjunto são usadas para treino, enquanto 50% são usadas para classificação (50/50).

#### 4. Resultados Experimentais

	Local	10-Fold CV	75% / 25%	50% / 50%	Total
DEF	DEI	234/26	196/65	130/130	260
	ESTGOH	288/32	240/80	160/160	320
	UQL	72/8	60/20	40/40	80
	UQB	180/20	150/50	100/100	200
DEA	DEI	162/18	135/45	90/90	180
	ESTGOH	144/16	120/40	80/80	160
	UQL	27/3	23/7	15/15	30

Tabela 4.2: Percentagem de amostras para treino e classificação, em cada edifício (Percentagem de Treino / Percentagem de Classificação).

## 4. Resultados Experimentais

### 4.2 Efeito do processo de transformação de amostras

O processo de transformação, descrito no capítulo anterior, é composto por 2 passos. O primeiro passo pretende reduzir ou eliminar o efeito das pequenas variações<sup>1</sup> que os sinais de RF GSM (embora estáveis) apresentam. O segundo passo tem o objectivo adicionar a cada caso informação essencial para o processo de localização. Enquanto o segundo passo apenas anexa informação adicional aos diversos casos, o primeiro passo altera a estrutura da base de casos, gerando novos casos a partir dos existentes, pelo que é importante analisar o efeito deste passo sobre o processo de localização.

Para testarmos o efeito do segundo passo do processo de transformação recorreremos ao conjunto de amostras recolhidas num dos edifícios (ESTGOH) variando o número de casos necessários para produzir um novo caso. Desse conjunto de amostras realizamos experiências com a totalidade dos casos disponíveis na base de treino (100%) e com apenas 25% dos casos. A experiência foi posteriormente alargada às amostras recolhidas noutros edifícios. O comportamento descrito de seguida é semelhante em todos os cenários.

Quando se recorre até três casos para a geração de um novo caso a precisão do algoritmo de localização é idêntica à obtida caso não se aplicasse o primeiro passo do processo de transformação. Quando esse valor é elevado até 5 casos existe um decréscimo de 37,5% na precisão do algoritmo de localização. À medida que aumentamos o número de casos necessários para gerar um novo caso, a precisão do algoritmo degrada-se, diminuindo até 12,5% quando se recorre a 10 casos. Contrariamente ao esperado, não houve melhorias na precisão do algoritmo de localização. À medida que se aumenta o número de casos na geração de um novo caso a precisão mantém-se constante, diminuindo a partir do uso de 3 casos.

Os resultados anteriores mostram que o primeiro passo do processo de transformação não auxilia o processo de localização, pelo contrário, degrada a precisão do algoritmo a partir de um determinado número de casos base. A geração de novos casos, recorrendo a valores médios das potências de sinal, permite reduzir os efeitos esporádicos de variações bruscas da potência de sinal. No entanto, ao remover-se os casos originais perde-se o contributo que cada caso individual poderia trazer ao processo

---

<sup>1</sup>Estas variações podem ocorrer devido a um erro de leitura do próprio equipamento GSM, efeitos do meio ambiente circundante ou com origem na própria fonte de emissão, as estações base.



## 4. Resultados Experimentais

de localização, perdendo-se diversidade entre os exemplos. Acresce ainda a este efeito a diminuição do número de casos disponíveis na base de treino<sup>2</sup>. Neste processo, o cálculo da média dos vectores de potências de sinal é na realidade um cálculo sobre uma média. As amostras disponibilizadas pelo terminal GSM já apresentam como potência de sinal de cada canal uma média sobre várias leituras (usualmente 5). Em parte, a aquisição de amostras já realiza um processo de transformação semelhante pelo que uma nova aplicação deste passo se torna desnecessária.

---

<sup>2</sup>No entanto, o efeito do segundo passo do processo de transformação é semelhante recorrendo tanto a 100% como a 25% da base de casos, pelo que a diminuição do número de exemplos de treino neste processo não aparenta ser o principal factor a afectar negativamente a precisão do algoritmo.

## 4. Resultados Experimentais

### 4.3 Análise de métodos de aprendizagem em localização

A abordagem explorada recorre a um algoritmo *lazy learning* baseado em instâncias (como o caso do kNN) devido à sua simplicidade de implementação e ao seu pequeno passo indutivo, o que se supõe permitir obter taxas de erro mais baixas. No entanto, existe interesse em estudar o comportamento dos algoritmos *eager learning*. Estes algoritmos (como o caso das redes neuronais e das árvores de decisão) realizam um passo indutivo superior, podendo estar sujeitos ao efeito das pequenas variações dos sinais de RF GSM ao longo do tempo. O estudo comparativo seguinte pretende verificar a adequabilidade de ambos os algoritmos no processo de localização no interior de edifícios.

#### 4.3.1 Caracterização do estudo

Este estudo foi realizado recorrendo à plataforma WEKA<sup>3</sup>, uma plataforma que disponibiliza uma colecção de algoritmos de aprendizagem. O estudo compreendeu os seis algoritmos recorrendo às configurações padrão disponibilizadas pela plataforma para cada algoritmo. Recorrendo a experiências exploratórias para a definição dos parâmetros de cada algoritmo, verificou-se que, por exemplo, modificando os parâmetros relativos ao factor de confiança e ao número mínimo instâncias por folha da árvore de decisão C4.5, ou os parâmetros sobre o algoritmo de procura local e o estimador na Rede Bayesiana, o efeito sobre a classificação final era reduzido (em algumas circunstâncias nulo). Assim sendo, os algoritmos descritos de seguida mantiveram as configurações padrão.

1. Filtro Bayesiano Simples;
2. Rede Bayesiana, com o algoritmo de procura local K2 e um estimador simples;
3. Rede Neuronal (Perceptrão Multi-Camada), sem camadas escondidas, com uma razão de aprendizagem 0.3, um *momentum* aplicado aos pesos de 0.2, 500 épocas de treino e limiar de validação de 20.
4. *k-Nearest Neighbor*, com valor 1 para o parâmetro *k* (1NN);
5. *k-Nearest Neighbor*, com valor 3 para o parâmetro *k* (3NN), sem validação cruzada e sem distancias pesadas;
6. Árvore de decisão J48 (implementação da árvore de decisão C4.5), com um factor de confiança de corte (*pruning*) de 0.25, um número

---

<sup>3</sup><http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>

## 4. Resultados Experimentais

mínimo de 2 instâncias por folha, e 3 *folds* para a redução do erro de corte (*pruning*);

Sendo a abordagem de localização proposta neste trabalho baseada no algoritmo *Weighted k-Nearest Neighbor*, este estudo comparativo tem especial interesse relativamente aos resultados do algoritmo *k-Nearest Neighbor*, e ao comportamento entre os algoritmos de aprendizagem *lazy learning* e *eager learning*.

Os algoritmos usaram como dados de treino e para classificação as amostras de ambos os cenários (DEF e DEA), de cada edifício. Para cada um dos cenários recorreu-se às 3 configurações anteriormente descritas (*10-folds Cross Validation*, 75/25 e 50/50). Em cada execução realizaram-se 10 repetições<sup>4</sup>.

No processo de comparação com os restantes algoritmos, são usados valores baixos do parâmetro  $k$  para o algoritmo kNN fornecendo melhores percentagens de classificações correctas. Este comportamento é observável na tabela 4.3, onde são usados diferentes valores do parâmetro  $k$  (1,2,3,4,5,10), na classificação das amostras em espaço fechado dos 4 edifícios, recorrendo à configuração *10-fold Cross Validation* (10FCV) para a separação entre instâncias de treino e de classificação.

$k$	1	2	3	4	5	10
DEI	98.85	96.00	92.85	91.81	89.62	85.19
ESTGOH	98.78	98.84	98.59	98.47	98.44	97.50
UQL	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
UQB	100.00	99.95	99.95	99.95	99.95	100.00

Tabela 4.3: Percentagem da classificação correcta em espaço fechado do algoritmo kNN recorrendo à configuração *10-fold Cross Validation*.

À medida que o valor do parâmetro  $k$  aumenta o número de amostras correctamente classificadas diminui progressivamente em alguns cenários, degradando o processo de predição. Porém, existem cenários distintos. À

---

<sup>4</sup>Realizando várias execuções com um diferente número de repetições, verificou-se que os melhores resultados eram obtidos com um valor entre 5 e 10 repetições. Fora deste intervalo existe uma pequena degradação dos resultados. Porém esta degradação é desprezável. Usando como exemplo as amostras em DEF recolhidas na ESTGOH, a melhor classificação foi obtida com 5 repetições para uma precisão de 98.81, enquanto a pior classificação foi obtida com 100 repetições para uma precisão de 98.73, ou seja, apenas uma diferença de 8 centésimas. Assim sendo, o número de repetições não interfere substancialmente no processo de classificação.

#### 4. Resultados Experimentais

medida que o parâmetro  $k$  varia de 1 a 10, o algoritmo apresenta a mesma precisão para as amostras recolhidas no apartamento UQL, apresenta uma ligeira degradação na sua precisão com amostras do edifício da ESTGOH o algoritmo, enquanto que com amostras recolhidas no edifício do DEI essa degradação é mais acentuada. Outro aspecto observável é o facto das amostras dos apartamentos (UQL e UQB) permitirem percentagens de classificações correctas superiores (e mais estáveis), relativamente aos edifícios de maior dimensão (caso do DEI e ESTGOH).

## 4. Resultados Experimentais

### 4.3.2 Comportamento dos algoritmos genéricos

#### Comportamento em espaço aberto

A tabela seguinte (4.4) apresenta as percentagens da classificações correctas das amostras em espaço aberto relativamente aos 6 algoritmos descritos anteriormente: (1) Filtro Bayesiano Simples (*bayes.NaiveBayes*), (2) Rede Bayesiana (*bayes.BayesNet*), (3) Rede Neuronal (Percepção Multi-Camada, *functions.MultilayerPerceptron*), (4) *1-Nearest Neighbor* (*lazy.IB1*), (5) *3-Nearest Neighbor* (*lazy.IBk*), (6) Árvore de decisão J48 (*trees.J48*). As amostras foram recolhidas nos edifícios do DEI e da ESTGOH e no apartamento UQL. Em espaço aberto não foram recolhidas amostras no apartamento UQB.

	DEI			ESTGOH		
	10FCV	75/25	50/50	10FCV	75/25	50/50
(1) bayes	98.33	98.59	97.73	65.56	59.40	63.27
(2) bayes	98.39	96.33	98.89	97.13	93.00	96.26
(3) funct	98.33	98.00	98.43	97.81	97.50	97.76
(4) lazy	98.89	98.33	99.77	96.31	95.50	95.76
(5) lazy	94.78	90.89	96.02	96.25	95.62	95.51
(6) trees	97.50	95.00	97.97	98.13	98.13	98.01

	UQL		
	10FCV	75/25	50/50
(1) bayes	100.00	100.00	100.00
(2) bayes	100.00	100.00	100.00
(3) funct	96.67	98.00	97.32
(4) lazy	100.00	100.00	100.00
(5) lazy	100.00	100.00	100.00
(6) trees	97.00	97.33	100.00

Tabela 4.4: Percentagens da classificação correcta em espaço aberto recorrendo às configurações 10FCV, 50/50 e 75/25.

Em termos de espaços físicos, como verificado na tabela 4.3, as amostras obtidas num apartamento (UQL) possibilitaram percentagens de classificações correctas superiores às amostras recolhidas em edifícios de maior dimensão (caso do DEI e da ESTGOH).

Os algoritmos de aprendizagem *eager learning* apresentam uma boa percentagem de classificações correctas. Apenas o algoritmo bayesiano simples, aplicado às amostras da ESTGOH, apresenta uma baixa percentagem de classificações correctas. Como observado na tabela 4.3,

## 4. Resultados Experimentais

o algoritmo *1-Nearest Neighbor* mostrou-se superior para a classificação das amostras recolhidas no edifício do DEI e no apartamento da UQL, embora não se distanciasse de forma significativa relativamente às restantes abordagens. Porém, relativamente às amostras recolhidas no edifício da ESTGOH, o algoritmo 1NN foi suplantado pela árvore de decisão, pela rede neuronal e pela rede bayesiana.

Observa-se que nenhuma das 3 configurações de separação das amostras em casos de treino e instâncias de classificação (*10-folds Cross Validation*, 75/25 e 50/50) possibilita precisões de localização manifestamente superiores às restantes. Todas as configurações permitem resultados semelhantes, no entanto, verifica-se que a configuração 10FCV possibilita resultados ligeiramente superiores, seguida da configuração 50/50 e por fim da configuração 75/25. Existe um maior distanciamento entre os resultados obtidos com as configurações 50/50 e 75/25 e uma maior proximidade entre os resultados obtidos com as configurações 10FCV e 50/50. Porém, em cerca de 25% das situações em que os resultados divergiram entre as diferentes configurações a diferença foi inferior a 1 décima. Esta última observação vem confirmar que, genericamente, embora existam pequenas diferenças, existe um relativo equilíbrio entre os resultados obtidos com diferentes configurações.

Embora a configuração 75/25 apresente um maior número de casos de treino, relativamente às restantes configurações, não possibilita uma maior precisão ao algoritmos de predição. Existindo um maior número de exemplos de treino (o que pode implicar um maior período de aprendizagem), os algoritmos podem ajustar-se a um determinado conjunto de exemplos, sem relação com as instâncias a classificar, produzindo desta forma uma possível degradação do processo de predição.

### Comportamento em espaço fechado

A tabela seguinte (4.5) apresenta as percentagens das classificações correctas das amostras recolhidas nos 4 edifícios em espaço fechado, recorrendo aos 6 algoritmos descritos anteriormente.

De forma semelhante à localização em espaço aberto, as amostras recolhidas nos apartamentos (UQL e UQB) permitiram que os algoritmos obtivessem uma percentagem de classificação correcta superior às amostras recolhidas em edifícios de maior dimensão (DEI e ESTGOH). Em 50% das situações a percentagem de classificações correctas de amostras recolhidas nos apartamentos atingiu os 100%. O algoritmo *1-Nearest Neighbor* foi superior na generalidade dos cenários, sendo, no entanto, ultrapassado pela rede neuronal na classificação das amostras recolhidas na ESTGOH.

#### 4. Resultados Experimentais

	DEI			ESTGOH		
	10FCV	75/25	50/50	10FCV	75/25	50/50
(1) bayes	97.88	97.85	97.73	81.50	80.46	63.27
(2) bayes	98.42	98.16	98.39	98.13	96.52	96.26
(3) funct	99.15	97.70	98.43	99.38	98.51	97.76
(4) lazy	98.85	98.01	99.77	98.78	97.38	95.76
(5) lazy	92.85	92.19	96.02	98.59	97.26	95.51
(6) trees	95.12	94.02	97.07	99.13	99.47	98.01

	UQL			UQB		
	10FCV	75/25	50/50	10FCV	75/25	50/50
(1) bayes	100.00	98.97	100.00	99.50	99.40	100.00
(2) bayes	99.75	98.97	100.00	99.50	99.60	100.00
(3) funct	98.75	100.00	97.32	99.70	100.00	98.00
(4) lazy	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
(5) lazy	100.00	100.00	100.00	99.95	99.80	100.00
(6) trees	99.88	99.47	100.00	99.50	98.60	97.33

Tabela 4.5: Percentagens da classificação correcta em espaço fechado recorrendo às configurações 10FCV, 50/50 e 75/25.

Os resultados obtidos com as diferentes configurações de separação de amostras em espaço fechado mostram um cenário idêntico ao obtido em espaço aberto. Na generalidade, existe uma semelhança entre os valores de predição obtidos com diferentes configurações de separação de amostras, com uma ligeira superioridade da configuração 10FCV. Verifica-se, no entanto, uma maior proximidade entre os resultados produzidos em espaço fechado do que existiu nos resultados obtidos em espaço aberto.

## 4. Resultados Experimentais

### 4.3.3 Comportamento dos algoritmos da família do kNN

Para averiguar a capacidade predictora do algoritmo proposto no presente estudo (designado por V-WkNN, sendo uma variação do *Weighted k-Nearest-Neighbor*), os seus resultados foram comparados com os algoritmos de base semelhante e igualmente aplicados ao processo de localização no interior de edifícios: o algoritmo proposto por Otsason [Otsason 2005] e o tradicional *k-Nearest-Neighbor* (tabela 4.6). A abordagem de Otsason tem particular interesse ao explorar o processo de localização baseado em assinaturas GSM. O algoritmo *k-Nearest-Neighbor* é uma abordagem tradicional seguida por diversos autores (sendo a base para ambos os algoritmos, a abordagem proposta e a abordagem de Otsason), servindo de ligação ao estudo comparativo anterior entre diferentes métodos de aprendizagem<sup>5</sup> (tabelas 4.4 e 4.5). Na secção anterior o algoritmo kNN obteve os melhores resultados quando o parâmetro  $k$  apresentou o valor 1. Otsason usa igualmente baixos valores para este parâmetro (entre 1 e 4), pelo que no estudo comparativo seguinte iremos recorrer ao valor 1 para o parâmetro  $k$ , tanto no kNN como nos algoritmos dele derivados (V-WkNN e abordagem de Otsason).

O ambiente experimental será semelhante à análise comparativa da secção anterior. Desta forma, são usadas as mesmas amostras recolhidas nos edifícios do DEI e da ESTGOH, e dos apartamentos da UQL e UQB. Para implementação dos algoritmos V-WkNN e Otsason recorreu-se à plataforma GSMile<sup>6</sup> (e não a WEKA do estudo anterior), onde se integrou uma implementação do kNN. Como configuração das amostras de treino e de classificação recorreram-se a dois cenários:

- 75% das amostras do conjunto são usadas para treino, enquanto 25% são usadas para classificação;
- 50% das amostras do conjunto são usadas para treino, enquanto 50% são usadas para classificação.

No estudo comparativo entre métodos de aprendizagem verificou-se que as diferentes configurações das amostras entre treino e classificação permitiram resultados semelhantes. Por uma questão de simplicidade de implementação, apenas as configurações 50/50 e 75/25 foram integradas na plataforma GSMile, ficando de fora a configuração 10FCV.

---

<sup>5</sup>O algoritmo kNN é utilizado em ambos os estudos comparativos.

<sup>6</sup>Plataforma desenvolvida em parceria com a empresa PT Inovação para acompanhar o projecto de localização no interior de edifício recorrendo a assinaturas GSM, descrita em anexo.



## 4. Resultados Experimentais

Embora o ambiente experimental compreenda os mesmos cenários do estudo comparativo anterior (amostras recolhidas em espaço aberto e fechado, ordenadas segundo as configurações 75/25 e 50/50 para amostras de treino e classificação), os resultados obtidos nesses cenários distintos são muito semelhantes. Desta forma, apenas serão apresentados visualmente os resultados de um único cenário que podem ser generalizados, bem como as respectivas conclusões, para os restantes cenários. A tabela 4.6 representa a percentagem de classificações correctas dos 3 algoritmos de base kNN (V-kNN, 1NN e Otsason) recorrendo a amostras recolhidas em ambiente fechados nos 4 edifícios (DEI, ESTGOH, UQL e UQB) com uma configuração de amostras de 50/50. A configuração de amostras de 75/25 em espaço fechado e ambas as configurações de separação de amostras em espaço aberto apresentam resultados idênticos.

Algoritmo	V-WkNN	1NN	Otsason
DEI	97,69%	96,15%	94,62%
ESTGOH, UQL e UQB	100%	100%	100%

Tabela 4.6: Predição (percentagem de classificação correcta) da localização em espaço fechado usando 50% das amostras como treino e 50% para classificação.

A abordagem proposta consegue uma percentagem de classificação semelhante ao algoritmo proposto por Otsason e ao 1NN, nunca sendo suplantada a sua precisão. Possibilita resultados ligeiramente superiores às restantes abordagens com amostras recolhidas no edifício do DEI, tanto em espaço aberto como em espaço fechado. No entanto, essa melhoria não é significativa. Nos restantes edifícios não apresenta qualquer erro de classificação de instâncias, resultado comum a todos os algoritmos. O algoritmo apresenta uma melhor prestação na classificação de instâncias em espaço fechado do que em espaço aberto, independentemente da configuração de separação de amostras.

Tal como sucede no estudo comparativo da secção anterior (tabelas 4.4 e 4.5), as amostras recolhidas em apartamentos (UQL e UQB) possibilitam uma precisão superior aos resultados obtido recorrendo a amostras de edifícios de grande dimensão (como o caso do DEI). Todos os algoritmos apresentam uma classificação sem erros para as amostras recolhidas nos apartamentos e no edifício da ESTGOH.

Observando o comportamento das assinaturas GSM verifica-se que entre divisões de um apartamento existe uma maior variação do vector de

## 4. Resultados Experimentais

potência dos sinal do que entre divisões de um edifício de maior dimensão (caso do DEI). Este comportamento gera amostras mais distintas entre as divisões de apartamentos. Em divisões de edifícios de maior dimensão, com espaços mais amplos, existe uma menor variação do vector de potências de sinal. Embora o edifício da ESTGOH seja um edifício de dimensões superiores a ambos os apartamentos, a sua dimensão global é inferior ao edifício do DEI. Também a sua estrutura interna é distinta do edifício do DEI, apresentando características e dimensões mais próximas dos apartamentos. Esta semelhança estrutural possibilita que os resultados de classificação dos algoritmos recorrendo a amostras recolhidas no edifício da ESTGOH sejam idênticos aos obtidos com amostras provenientes dos apartamentos.

As amostras recolhidas no edifício do DEI geraram as maiores taxas de erro no processo de localização. Comparando o comportamento dos sinais de RF GSM no edifício do DEI e da ESTGOH verifica-se que alguns dos canais predictores (ou discriminadores) das amostras recolhidas no edifício do DEI apresentam uma maior instabilidade ao longo do tempo, para a mesma posição, relativamente aos canais predictores de amostras recolhidas no edifício da ESTGOH. Por outro lado, os canais com maior influência nas classificações incorrectas de algumas instâncias são pouco discriminadores das amostras. Estes canais caracterizam-se pela ausência de variação da potência de sinal entre localizações distintas, mas sujeitos a perturbações esporádicas. Os diversos canais contribuem e influenciam de forma distinta no processo de localização.

Os resultados apresentados na tabela 4.6 permitem ainda descrever um comportamento comum aos cenários de localização que apresentem instâncias incorrectamente classificadas. Usualmente, estas instâncias podem ser agrupadas em 3 conjuntos.

- O primeiro conjunto engloba o grupo de instâncias que são incorrectamente classificadas pela generalidade dos algoritmos, e todos eles atribuem a mesma localização incorrecta. Estas instâncias apresentam uma estrutura de canais de RF GSM semelhante às restantes amostras recolhidas na mesma localização, porém, com variações da potência de sinal em alguns canais predictores, o que as aproxima de instâncias recolhidas numa localização próxima.
- O segundo conjunto integra as instâncias que também são incorrectamente classificadas pela generalidade dos algoritmos, no entanto, cada algoritmo atribui uma localização distinta. Este efeito é característico de instâncias que apresentam uma variação em vários canais (predictores e não predictores) tornando-as demasiado distintas

## 4. Resultados Experimentais

relativamente às instâncias recolhidas na mesma localização e em localizações vizinhas, pelo que a posição atribuída pelos diversos algoritmos não é constante.

- Por fim, surge o grupo mais comum, composto por instâncias que podem ser incorrectamente classificadas por alguns algoritmos, e correctamente classificadas pelos restantes. Usualmente, estas instâncias apresentam variações em canais menos preditores, e afectando menor número de canais.

## 4. Resultados Experimentais

### 4.4 Estudo do comportamento do algoritmo de localização

#### 4.4.1 Efeito do distanciamento temporal entre amostras

Nos estudos anteriores agruparam-se as amostras obtidas durante as 4 fases<sup>7</sup> de recolha de dados num só conjunto de instâncias, para cada edifício, misturando-se assim diferentes períodos temporais de recolha de amostras. Existe interesse em verificar o efeito da proximidade temporal entre amostras sobre o comportamento do algoritmo.

Como ambiente experimental recorreu-se às amostras recolhidas no edifício da ESTGOH, em espaço fechado. Num primeiro passo seleccionou-se o primeiro grupo de amostras recolhido (*Amostra1*, mais antiga) como conjunto de treino, e os conjuntos de amostras seguintes (*Amostra2*, *Amostra3* e *Amostra4*, mais recentes) como instâncias para classificação (gráfico da figura 4.8 (a)). Num segundo passo recorreu-se ao último conjunto de amostras recolhido (*Amostra4*, mais recente) como base de treino, e os restantes conjuntos de amostras (*Amostra1*, *Amostra2* e *Amostra3*, mais antigas) como instâncias para classificação (gráfico da figura 4.8 (b)). Posteriormente, a experiência foi repetida recorrendo a conjuntos de amostras recolhidas nos restantes edifícios.

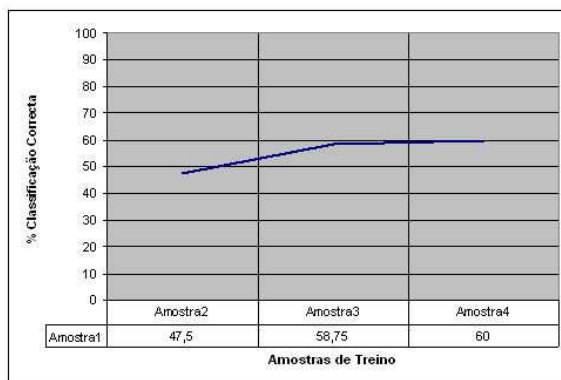
Dois cenários são observados. No primeiro passo, onde se recorre ao conjunto mais antigo de amostras (*Amostra1*) como base de treino, à medida que existe um afastamento temporal entre as amostras a classificar (do conjunto *Amostra2*, mais próximo, ao *Amostra4* mais afastado), existe uma melhoria da precisão do algoritmo de classificação. Contrariamente, no segundo passo, onde se recorre ao conjunto de amostras mais recente (*Amostra4*) como base de treino, à medida que existe um afastamento temporal entre as amostras a classificar (do conjunto *Amostra3*, mais próximo, ao *Amostra1* mais afastado), existe uma degradação da precisão do algoritmo de classificação. Os resultados do segundo passo da experiência apresentam um comportamento inverso aos resultados do primeiro passo da experiência. Porém, os valores máximos e mínimos da precisão são semelhantes.

Quando se alterna a base de treino através dos quatro conjuntos de amostras, recorrendo aos restantes conjuntos como instâncias a classificar,

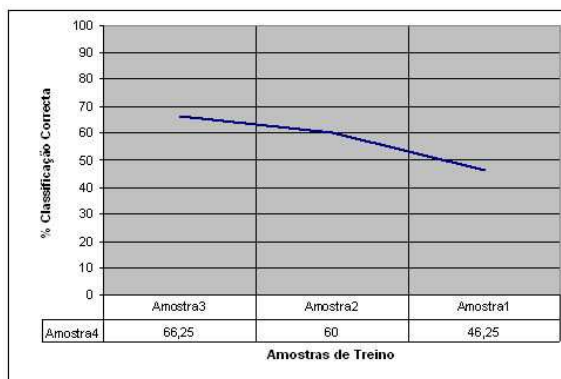
---

<sup>7</sup>Durante o processo de leitura, para cada edifício, foram realizadas 4 fases seguidas de recolha de dados. Em cada fase foi produzido um conjunto de amostras. Existe, para cada edifício, 4 conjuntos de amostras: *Amostra1* (correspondente ao primeiro conjunto de amostras recolhido), *Amostra2*, *Amostra3* e *Amostra4* (correspondente ao último conjunto de amostras recolhido).

## 4. Resultados Experimentais



(a) Efeito da variação temporal recorrendo à Amostra1 como base de treino.



(b) Efeito da variação temporal recorrendo à Amostra4 como base de treino.

Figura 4.8: Efeito da variação temporal entre recolhas de amostras na predição da localização para as dados recolhidos no edifício da ESTGOH em espaço fechado recorrendo à Amostra1 (a) e Amostra4 (b) como bases de treino.

observa-se que o conjunto de amostras da da quarta fase de recolha de dados (*Amostra4*), enquanto conjunto de classificação, possibilita tendencialmente a melhor precisão do algoritmo de localização, seguido do conjunto de amostras da terceira fase (*Amostra3*) e do conjunto de amostras da segunda fase (*Amostra2*). O conjunto de amostras correspondente à primeira fase (*Amostra1*) é aquele possibilita uma menor precisão do algoritmo de localização. Os comportamentos descritos também são observáveis recorrendo a amostras recolhidas nos restantes edifícios, sendo mais consistente em amostras recolhidas em espaço fechado do que em espaço aberto.

## 4. Resultados Experimentais

### 4.4.2 Efeito do número de canais no processo de localização

As assinaturas GSM apresentam uma estabilidade ao longo do tempo, mas variando em posições distintas, no entanto, os canais BCCH que as constituem podem apresentar comportamentos distintos. Este comportamento é observável no gráfico 4.9, pressupondo que os diversos canais contribuem de forma diferente para o processo de localização.

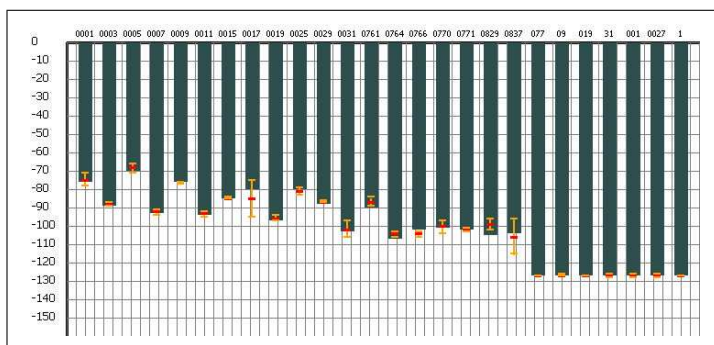


Figura 4.9: Potência de sinal dos canais de RF GSM que constituem a última assinatura de um conjunto recolhido no edifício da ESTGOH ao longo de 24h, com o valor médio e o respectivo desvio padrão.

O gráfico da figura 4.10 apresenta o resultado do processo de localização variando o número de canais BCCH disponíveis. A base de treino é constituída pelo conjunto de amostras obtidas no edifício da Urbanização da Quinta da Boavista em espaço fechado durante a primeira fase de recolha de dados, enquanto que conjunto de amostras da quarta fase correspondeu às instâncias para classificação. Os diversos cenários são compostos pelos  $n$  primeiros canais disponíveis de acordo com o seu *valor de interesse*<sup>8</sup>, removendo os restantes. No cenário com 17 canais removeram-se os dois canais extremos, com o *valor de interesse* mais elevado e mais reduzido.

À medida que se disponibilizam canais BCCH para o processo de localização a precisão aumenta, atingindo um máximo global de 70% com 10 e 12 canais. Neste ponto, o aumento do número de canais degrada o processo de localização, reduzindo a sua precisão quando o número de canais é igual a 14. A partir deste momento existe uma estabilização da precisão, independentemente do número de canais disponíveis. A variação do número de canais BCCH permitiu ao algoritmo atingir uma precisão mais

<sup>8</sup>Por exemplo, quando  $n$  toma o valor 1, apenas é o usado o primeiro canal (aquele que apresenta um *valor de interesse* mais elevado). Quando  $n$  toma o valor 5, apenas são usados os 5 primeiros canais.

#### 4. Resultados Experimentais

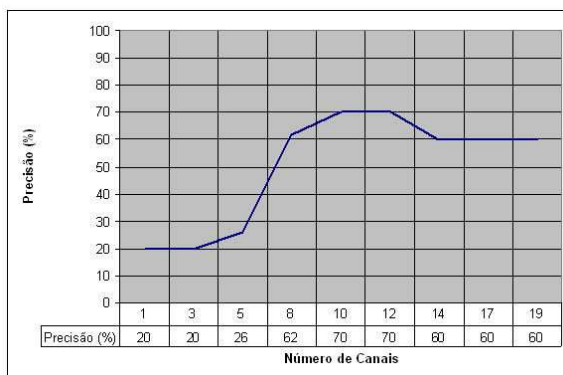


Figura 4.10: Efeito da variação do número canais no processo de localização no apartamento da UQB em espaço fechado.

elevada (70%) do que recorrendo a todo o vector de canais disponível (60%).

No gráfico da figura 4.12 observa-se um comportamento semelhante. Neste caso recorreu-se a todo o conjunto de amostras recolhidas em espaço aberto no edifício do DEI<sup>9</sup> organizadas segundo uma configuração 75/25.

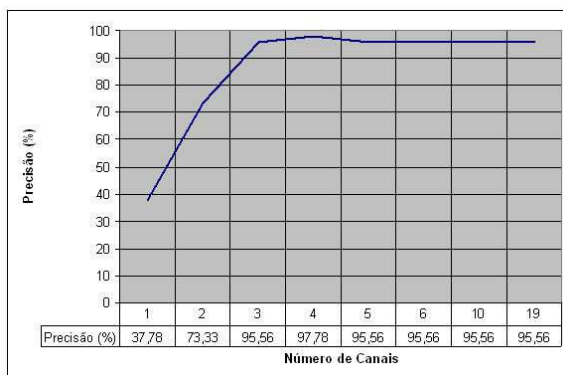


Figura 4.11: Efeito da variação do número canais no processo de localização no edifício do DEI em espaço aberto.

Neste cenário, a precisão acompanha o aumento do número de canais disponíveis de uma forma mais pronunciada, atingindo um máximo com apenas 3 canais BCCH. Com um reduzido número de canais é possível

<sup>9</sup>No estudo dos algoritmos baseados em kNN as amostras recolhidas no DEI foram as únicas que não permitiram uma precisão sem erros. Tem interesse verificar se é possível melhorar a sua classificação.

## 4. Resultados Experimentais

discriminar a localização de 97,78% das amostras, obtendo uma precisão superior do que recorrendo a todo o vector de canais disponível. Este comportamento permite verificar a existência de canais com uma maior capacidade predictor, enquanto outros contribuem negativamente para o processo de localização. A influência de alguns canais pode auxiliar a correcta classificação de algumas amostras mas, simultaneamente, introduzir erro na discriminação de outras. Este efeito é visível em divisões de maior dimensão, como o caso do edifício do DEI.

A observação do efeito dos diversos canais sobre o processo de localização permite agrupa-los em 3 conjuntos distintos.

- Um primeiro grupo é caracterizado por canais que permitem discriminar uma larga maioria da amostras. Caracterizam-se por uma variação da sua potência de sinal no espaço e uma estabilidade temporal. Sendo óptimos predictores, são essenciais para o processo.
- Um segundo grupo é composto por canais que possibilitam a discriminação de algumas amostras, mas afectam negativamente a classificação de outras. A sua inclusão implica um estudo mais cuidado, observando se o seu efeito global é positivo. Observaram-se situações onde o efeito de um canal só se manifesta na presença de outros canais.
- Por fim, surge o grupo de canais que não produz efeito no processo de localização, ou o seu efeito é negativo. Caracterizam-se por uma estabilidade da sua potência de sinal independentemente da sua localização, ou por uma variabilidade temporal. Não sendo discriminadores das amostras, devem ser excluídos do processo.

Um efeito interessante é observado: embora seja possível obter o valor de precisão mais elevado com apenas os 3 primeiros canais, existindo assim uma grande influência destes canais, se removermos os canais extremos (o primeiro e o último, ficando apenas com 17 canais), o algoritmo apresenta uma precisão muito semelhante. Embora o primeiro canal seja essencial ao processo de localização, a sua remoção pode ser compensada pela inclusão de diversos outros canais, cujas contribuições individuais sejam reduzidas, mas em grupo permitem um efeito positivo.



## 4. Resultados Experimentais

### 4.4.3 Efeito da acuidade na precisão

Os resultados das secções anteriores em espaço aberto foram obtidos recorrendo a uma acuidade de 5 metros, ou seja, o valor do espaçamento entre as diferentes posições de recolha de amostras. A acuidade afecta directamente a precisão do algoritmo de localização, sendo este comportamento visível no gráfico da figura 4.12, recorrendo às amostras recolhidas nos edifícios do DEI e da ESTGOH.

Em cada edifício, a base de treino é composta pelo conjunto de amostras da primeira fase de recolha de dados, enquanto que o conjunto de classificação é constituído pelas amostras da quarta fase. Ambos os conjuntos foram manipulados, removendo amostras em algumas posições, permitindo assim uma distanciamento de 10 e 15 metros, pelo que se reduziu o tamanho das bases de treino. Os resultados foram obtidos recorrendo ao algoritmo baseado em instâncias, embora a abordagem de Otsason e o algoritmo kNN apresentem semelhante comportamento.

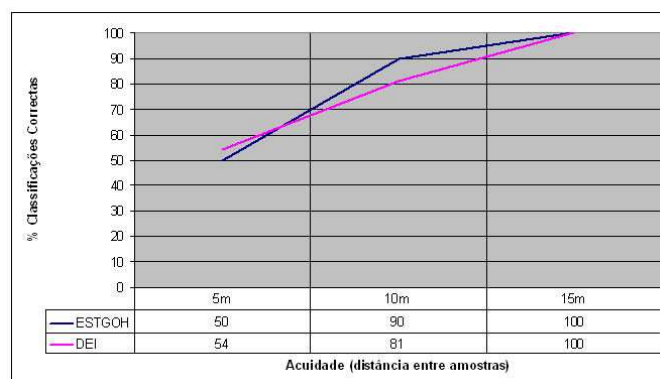


Figura 4.12: Efeito da acuidade na previsão da localização em espaço aberto, nos edifícios do DEI e da ESTGOH.

Um incremento da acuidade é acompanhado por um incremento da percentagem de classificações correctas, sendo esse efeito mais visível nas amostras recolhidas no edifício da ESTGOH do que nas amostras recolhidas no edifício do DEI. Esta experiência não é aplicável em espaços fechados onde as leituras são realizadas num único ponto em cada divisão. Existindo divisões com tamanhos distintos, as distâncias entre os pontos de recolha não é constante<sup>10</sup>.

<sup>10</sup>No do edifício da ESTGOH, as amostras foram recolhidas com um espaçamento mínimo de 2 metros, atingindo em algumas situações 6 metros de distância. No edifício do DEI esses valores (mínimo e máximo) ocorreram entre 6 e 9 metros.

## 4. Resultados Experimentais

### 4.4.4 Distribuição dos erros de classificação

A par da percentagem de erro do algoritmo de predição, tem interesse conhecer a forma como as instâncias foram incorrectamente classificadas. A distribuição dos erros pode indicar a existência de uma tendência comum ou de comportamentos aleatórios. Para o efeito, vamos estudar a distribuição em espaço aberto e fechado, recorrendo às amostras recolhidas essencialmente no edifício do DEI<sup>11</sup>.

#### Distribuição em espaço aberto

As tabelas das figuras 4.13 e 4.14 apresentam a distribuição das classificações incorrectas num cenário com uma acuidade de 5 e 10 metros. Cada linha representa uma posição do conjunto de instâncias a classificar, enquanto cada coluna representa uma posição da base de treino. A diagonal central sombreada representa o número de instâncias que foram correctamente classificadas. Os valores fora desta diagonal indicam as instâncias incorrectamente classificadas para uma determinada posição, e a localização incorrectamente atribuída. Para cada posição (cada linha da tabela) existe um conjunto de instância a classificar (usualmente 10). Idealmente, deve existir uma concordância entre as diversas linhas e colunas, intersectando-se na diagonal central.

Treino		Corredor Torre G						Corredor						Corredor Torre E					
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18
Torre G	P1	8		2															
	P2		10																
	P3			0	7														3
	P4				9														
	P5					5								5					
	P6						0			10									
Corredor	P7						10												
	P8				10			0											
	P9								10										
	P10									10									
	P11										10								
	P12											10							
Torre E	P13											0							
	P14												6	4					
	P15													10					
	P16														4	0	7		
	P17															6	4		
	P18																6	4	
Posições Vizinhas		P2	P1 P3	P2 P4	P3 P5	P4 P6	P5 P7 P8	P6 P8	P7 P9	P8 P10	P9 P11	P10 P12	P11 P13	P12 P14	P13 P15	P14 P16	P15 P17	P16 P18	P17

Figura 4.13: Distribuição da classificação de amostras recolhidas no DEI em espaço aberto, com acuidade de 5m (181 amostras).

<sup>11</sup>O edifício do DEI apresenta maior número e diversidade de posições de recolha de amostras comparativamente aos restantes edifícios, especialmente em espaço aberto.

## 4. Resultados Experimentais

Treino		Corredor Torre G			Corredor		Corredor Torre E		
Classificação		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
T.G	P1	8	2						
	P2		0						10
	P3			10					
C	P4				10				
	P5					10			
T.E	P6						7	3	
	P7							10	
	P8								10
Posições Vizinhas		P2	P1 P3	P2 P4	P3 P5	P4 P6	P5 P7	P6 P8	P7

Figura 4.14: Distribuição da classificação de amostras recolhidas no DEI em espaço aberto, com acuidade de 10m (79 amostras).

Diferentes acuidades apresentam comportamentos distintos nos erros de classificação. Com uma acuidade de 5 metros a maioria das classificações incorrectas (63,86%) são atribuídas a posições vizinhas da localização correcta, e um reduzido número de erros é atribuído a posições afastadas. Com uma acuidade de 10 metros, existe uma redução da percentagem de erro de classificação (de 45,86% para 18,99%), e o efeito é contrário, existindo 2/3 (66,6%) das classificações incorrectas atribuídas a posições muito afastadas das localizações correctas. Embora o erro em posições vizinhas tenha reduzido com uma acuidade maior, o erro em posições mais afastadas aumentou.

Com uma acuidade de 5 metros, usualmente, um erro de classificação não afecta apenas uma amostra isoladamente mas todo um conjunto de amostras recolhidas numa posição. A mesma localização incorrecta tende a ser atribuída a todas as amostras do conjunto. O comportamento é semelhante com uma acuidade de 10 metros.

Se a base de treino incluir amostras das diversas fases de recolha de dados, como sucede nos estudos sobre os diversos algoritmos de localização, a percentagem de classificações erradas é reduzida (4,45% para a configuração 72/25 e 2,22% para a configuração 50/50). Neste cenário, os erros de classificação ocorrem isoladamente, sendo atribuídos a posições vizinhas. Generalizando, nos diversos cenários, os erros de classificação são atribuídos usualmente a posições vizinhas.

A análise anterior foi realizada recorrendo algoritmo de localização baseado em instâncias descrito no capítulo 3. O algoritmo kNN e a abordagem de Otsason apresentam resultados semelhantes, tanto em termos de precisão dos resultados, como no comportamento da classificação das instâncias.

## 4. Resultados Experimentais

### Distribuição em espaço fechado

Em espaço fechado, para cada divisão existe apenas um ponto de recolha de amostras<sup>12</sup>. O estudo da distribuição das classificações contempla os edifícios do DEI e da ESTGOH<sup>13</sup>. Em ambos os casos recorreu-se ao conjunto de amostras da primeira fase de recolha de dados para a base de treino, sendo o conjunto para classificação composto pelas amostras da quarta fase de recolha de dados.

As tabelas das figuras 4.15 e 4.16 apresentam a distribuição das classificações produzidas com amostras recolhidas nos edifícios da ESTGOH e do DEI, respectivamente.

Treino		Piso 2						
Classificação	S2.01	S2.02	S2.09	G2.06	G2.05	G2.04	G2.00	G2.03
Piso 2	S2.01	10						
	S2.02		8					2
	S2.09		10	0				
	G2.06				10			
	G2.05					10		
	G2.04	2					0	8
	G2.00						10	0
G2.03								10
Posições	S2.02	S2.01	S2.02	S2.09	G2.06	G2.05	G2.04	G2.00
Vizinhas	G2.03	S2.09	G2.06	G2.05	G2.04	G2.00	G2.03	S2.01
	G2.00	G2.04	G2.05		S2.09	S2.02	S2.01	

Figura 4.15: Distribuição da classificação de amostras recolhidas na ESTGOH em espaço fechado (80 amostras).

A classificação das amostras recolhidas no edifício da ESTGOH apresenta um erro de 40%. Como sucede em espaço aberto, 2/3 (62,5%) das classificações incorrectas são atribuídas a divisões vizinhas das posições correctas. Apenas um pequeno número de classificações incorrectas (6,25%) é atribuída a uma distância máxima de 3 divisões. Não existem classificações incorrectas em amostras isoladas. Usualmente um erro de classificação afecta um conjunto de amostras associadas a uma posição e a mesma localização é atribuída a todo o conjunto.

A recolha de amostras em espaço fechado no edifício do DEI englobou divisões distribuídas em diferentes pisos e torres distintas. Este cenário implica que a vizinhança de uma divisão ocorre no mesmo piso, mas também em pisos distintos. Esta situação ocorre entre as divisões da

<sup>12</sup>Na localização no interior de edifícios o objectivo consiste na diferenciação entre divisões distintas.

<sup>13</sup>Em espaço fechado o edifício da ESTGOH já disponibiliza um razoável número de posições e qualidade de amostras.

#### 4. Resultados Experimentais

torre G, pisos 4 e 5. A tabela da figura 4.16 representa a distribuição das classificações efectuadas com amostras obtidas no DEI.

Treino		Torre E						Torre G						
		Piso 4						Piso 5						
		E41	E42	E43	E44	E45	E46	G46	G41	G51	G52	G53	G56	G57
Torre E	Piso 4	E41	6						4					
		E42		0	10									
		E43			10									
		E44		1		7								
		E45	6				3							
		E46	10					0						
Torre G	Piso 5	G46						10						
		G41							8					
		G51							3	3	3			
		G52									6			
		G53		6								0		
		G56				2							8	
												8	10	
Posições Vizinhas		E42 E45 E46	E41 E43 E44 E45	E42 E44 E45	E43 E43 E45	E41 E42 E43 E44 E45	E41 E42 E43 E44 E45	G41 G57 G51 G57 G56 G52	G46 G51 G57 G56 G52	G52 G56 G57 G41 G46	G51 G53 G56 G57 G41 G46	G52 G53 G55 G57 G41 G46	G51 G52 G56 G41 G46	

Figura 4.16: Distribuição da classificação de amostras recolhidas no DEI em espaço fechado (117 amostras).

O processo de localização recorrendo às amostras obtidas no edifício do DEI apresentou um erro de 47,41%. Os resultados são semelhante aos cenários anteriores. Sensivelmente  $2/3$  (63,08%) das amostras incorrectamente classificadas foram atribuídas a localizações vizinhas da posição correcta <sup>14</sup>. A percentagem de classificações incorrectas atribuídas a posições mais afastadas é substancialmente inferior (20%), embora seja um valor não desprezável. Os erros de classificação afectam conjuntos de amostras associados a uma mesma posição, aos quais é atribuída a mesma localização incorrecta. Um único caso isolado apresenta apenas uma amostra individual incorrectamente classificada.

Realizando o mesmo procedimento, mas recorrendo aos 4 conjuntos de amostras obtidos no edifício do DEI<sup>15</sup>, após uma ordenação aleatória e segundo uma configuração 50/50, obtém-se um erro de classificação muito reduzido (2,31%). Neste caso, as 3 amostras (de um total de 130) incorrectamente classificadas foram atribuídas a posições muito afastadas da localização correcta. Os erros de classificação ocorreram em amostras

<sup>14</sup>62,5% no caso de amostras recolhidas no edifício da ESTGOH em espaço fechado e 63,38% recorrendo às amostras obtidas no edifício do DEI em espaço fechado.

<sup>15</sup>A ausência de erros de classificação por parte do algoritmo de localização não possibilita aplicação do mesmo cenário recorrendo ao conjunto de amostras recolhido no edifício da ESTGOH.

## 4. Resultados Experimentais

isoladas, associadas a divisões distintas.

Generalizando, quando o processo de localização apresenta uma elevada percentagem de erro<sup>16</sup>, as classificações incorrecta são atribuídas a posições vizinhas da localização correcta. Quando existe uma reduzida percentagem de classificações incorrectas<sup>17</sup> estas são atribuídas a localizações afastadas das posições correctas. Os erros de classificação costumam afectar um conjunto de amostras associadas a uma mesma posição. Apenas em situações de reduzida percentagem de erro existem amostras isoladas com classificações incorrectas. Este comportamento é comum ao algoritmo de procura por instâncias, à abordagem de Otsason e ao algoritmo kNN.

---

<sup>16</sup>Usualmente quando se recorre a apenas parte do conjunto de amostras disponíveis.

<sup>17</sup>Uso de todo o conjunto de amostras disponível, formado pelas 4 fases de recolha de dados, com uma ordenação aleatória e uma configuração 75/25 ou 50/50 na separação entre casos de treino e instâncias para classificação.



## Capítulo 5

# Conclusões

O objectivo inicial da dissertação centrou-se no estudo da localização no interior de edifícios recorrendo a assinaturas GSM. A análise do comportamento dos sinais de RF GSM permitiu concluir que as assinaturas GSM apresentam variabilidade espacial e uma relativa estabilidade temporal, gerando cenários distintos em diferentes localizações físicas. Estas características possibilitaram o desenvolvimento de um algoritmo de localização que parte da comparação de assinaturas GSM com os exemplos da base de casos, procurando possíveis semelhanças.

O estudo realizado mostrou que é possível proceder à localização no interior de edifícios recorrendo a assinaturas GSM. Tanto os algoritmos *lazy learning* como os algoritmos *eager learning* são adequados para esse fim, obtendo-se taxas de erro reduzidas para distâncias da ordem de 5 metros. A abordagem baseado em instâncias permitiu precisões semelhantes, e em determinados casos superiores, aos restantes algoritmos, adaptando-se ao comportamento dos sinais de RF GSM. Embora os resultados produzidos pelo processo de localização proposto nunca tenham sido superados pelas restantes abordagens, não existiu uma melhoria significativa relativamente às restantes alternativas.

Sendo possível a localização no interior de edifícios, podem ser desenvolvidos sistemas que necessitem deste tipo de informação, como por exemplo algumas plataformas de percepção de contexto. Uma vantagem do processo proposto é a sua independência de uma infra-estrutura dedicada, recorrendo a um sistema implantado e amplamente difundido: a rede GSM. O algoritmo desenvolvido diferencia-se das restantes abordagens ao incluir conhecimento específico das assinaturas GSM, através das suas funções de interesse e dissemelhança.



## 5. Conclusões

Os melhores resultados foram obtidos na classificação de amostras de edifícios de pequena dimensão (caso dos apartamentos). Verificou-se a existência de uma influência do número de canais que compõem uma assinatura no processo de localização. O estudo demonstrou que apenas um pequeno número de canais é responsável pela classificação das assinaturas. Deve-se procurar utilizar os canais preditores, caracterizados por uma potência de sinal estável ao longo do tempo, porém, variando consoante as diferentes localizações. Em alguns cenários, o uso de todo o vector de canais pode provocar a incorrecta classificação de amostras. Na generalidade dos cenários onde existem erros de classificação observou-se que usualmente estes ocorrem em amostras isoladas, sendo atribuída incorrectamente uma posição vizinha da localização correcta. Apenas quando ocorre uma elevada percentagem de classificações incorrectas os erros afectam várias amostras para uma mesma localização.

Uma limitação do processo de localização abordado é a necessidade da criação e manutenção de uma base de treino inicial, ou seja, de uma fase de aprendizagem. O mapeamento de edifícios pode tornar-se um processo moroso, bem como a actualização da base de casos. O cenário da rede GSM pode sofrer mudanças graduais ou abruptas. Alterações na organização das estações base e dos canais de RF GSM ou mudanças no ambiente físico envolvente, implicam uma actualização da base de treino. Deve-se procurar soluções que diminuam o peso e a influência desta fase, podendo explorar-se processos de mapeamento colaborativo.

A dimensão da base de casos afecta a eficiência do algoritmo de localização. Um elevado número de casos torna o processo de comparação lento. Um reduzido número de casos pode não ser suficiente para aproximar os exemplos mais semelhantes. A dimensão das bases de casos deve receber enfoque em trabalhos futuros.

O objectivo proposto ficou claramente definido no início do trabalho para a presente dissertação. Ao estender-se o estudo por um longo período temporal, a temática na área da localização no interior de edifícios recorrendo a assinaturas GSM foi abordada por outros autores. Existiu assim uma evolução do estado da arte. Desta forma, com a não conclusão da dissertação numa janela temporal razoável, perdeu-se o princípio inovador inicial associado à localização no interior de edifícios recorrendo a assinaturas GSM. Pela mesma razão, algumas questões originais não foram abordadas na presente dissertação ao serem estudadas por outros autores.

# Bibliografia

- [Aalto 2004] L Aalto, N Gothlin, J Korhonen, T Ojala, *Bluetooth and WAP push based location-aware mobile advertising system*, in MobiSYS '04: Proceedings of the 2nd international conference on Mobile systems, applications, and services, pp. 49-58. ACM Press, 2004.
- [Abowd 2000] G Abowd, E Mynatt, *Charting past, present, and future research in ubiquitous computing*, ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI), v.7 n.1, pp. 29-58, Março 2000.
- [Abraham 2001] C Abraham, F van Diggelen, *Indoor GPS Technology*, CTIA Wireless-Agenda, Dallas, 2001.
- [Bahl 2000] P Bahl, V Padmanabhan, *RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System*, IEEE INFOCOM 2000, Tel-Aviv, Israel, 2000.
- [Baptista 2006] B Baptista, M Veloso, C Bento *GSMile v0.5.08: Support Platform for GSM Indoor Location Algorithms*, Coimbra, 2006.
- [Battiti 2002] R Battiti, M Brunato, A Villani, *Statistical Learning Theory for Location Fingerprinting in Wireless LANs*, University of Trento, Informatica e Telecomunicazioni, Technical Report DIT-02-086, Outubro 2002.
- [Bento 2005] C Bento, J Peixoto, M Veloso *A Case-Based Approach for Indoor Location*, In Proc. of the Sixth International Conference on Case-Based Reasoning, Lecture Notes in Artificial Intelligence series, Chicago, Illinois (USA), Agosto 2005.
- [Bento 2007] C Bento, B Baptista *Estudo sobre Assinaturas GSM para Localização em Interiores*, Coimbra, Janeiro 2007.
- [Cermak 2003] G Cermak, E Horvitz, J Krumm, *RightSPOT: A Novel Sense of Location for a Smart Personal Object*, Proceedings of UbiComp 2003, Lecture Notes in Computer Science volume 2864, USA, 2003.

- [Dana 2001] P Dana, *Global Positioning System Overview*. (Disponível em <http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps.f.html>) Maio 2001.
- [Dey 2000] A Dey, G Abowd, *Towards a Better Understanding of Context and Context-Awareness*, Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2000) "Workshop on The What, Who, Where, When, Why and How of Context-Awareness", The Hague, The Netherlands, Abril 2000.
- [Djuknic 2001] G Djuknic, R Richton, *Geolocation and Assisted GPS*, Computer, vol. 34, no. 2, pp. 123-125, Fevereiro 2001.
- [Elnahrawy 2004] E Elnahrawy, X Li, R Martin, *The limits of localization using signal strength: a comparative study*, In Proceedings of the First IEEE International Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, SECON 2004, pp. 406-414, Outubro 2004.
- [Global Locate Inc 2006] Global Locate Inc, *Assisted-GPS (A-GPS)*. (Disponível em [http://www.globallocate.com/A-GPS/A-GPS\\_Frameset.htm](http://www.globallocate.com/A-GPS/A-GPS_Frameset.htm)) 2006.
- [GSM World 2006] GSM World, *GSM Facts and Figures*. (Disponível em <http://www.gsmworld.com/news/statistics/index.shtml>) 2006.
- [Hightower 2000] J Hightower, R Want, G Borriello, *SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength*, Technical Report, University of Washington, Fevereiro 2000.
- [Hightower 2001] J Hightower, G Borriello, *A Survey and Taxonomy of Location Systems for Ubiquitous Computing*, Technical Report UW-CSE 01-08-03, Seattle, Agosto 2001.
- [Hopper 1993] A Hopper, A Harter, T Blackie, *The Active Badge System*, in Proceedings of InterCHI-93, pp.533-534, Amesterdam, The Netherlands, 1993.
- [Hopper 1997] A Hopper, A Jones, A Ward, *A new location technique for the active office*, IEEE Personal Communications, 4(5):4247, pp. 42-47, 1997.
- [Kaemarungsi 2004] K Kaemarungsi, P Krishnamurthy, *Modeling of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting*, IEEE InfoCOM 2004.
- [Kaplan 1996] E Kaplan, *Understanding GPS: Principles and Applications*, Boston: Artech House Publishers, 1996.

- [Kindberg 2002] T Kindberg, A Fox, *System Software for Ubiquitous Computing*, IEEE Pervasive Computing, vol. 1, no. 1, pp. 70-81, Janeiro-Março 2002.
- [Laasonen 2004] K Laasonen, M Raento, H Toivonen, *Adaptive On-Device Location Recognition*, In Proceedings of the 2nd International Conference on Pervasive Computing (Pervasive 2004), Vienna, Austria, Abril 2004.
- [Laitinen 2001] H Laitinen, J Lähteenmäki, T Nordström, *Database correlation method for GSM location*, IEEE VTC 2001 Spring Conference, Rhodes, Greece, Maio 2001.
- [LaMarca 2005] A LaMarca, *Accurate Indoor Location using GSM Fingerprinting*, UbiComp 2005, Tokyo, Japan, Agosto 2005
- [LaMarca 2005] A LaMarca, Y Chawathe, S Consolvo, J Hightower, I Smith, J Scott, T Sohn, J Howard, J Hughes, F Potter, J Tabert, P Powledge, G Borriello, B Schilit, *Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild*, Pervasive 2005, Munich, Germany, 2005.
- [Ladd 2002] A Ladd , K Bekris , A Rudys , L Kavradi , D Wallach, G Marceau, *Robotics- based location sensing using wireless Ethernet*, Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking (MOBICOM), Atlanta, Georgia, USA, Setembro. 23-28, 2002.
- [Ni 2004] [Ni 2004] L Ni, Y Liu, Y Lau, A Patil, *LANDMARC: indoor location sensing using active RFID*, Wireless Networks, Volume 10, Issue 6, Novembro 2004.
- [Otsason 2005] V Otsason, *Accurate Indoor Location using Wide GSM FingerPrinting*, Master of Science Dissertation, University of Tartu, Faculty of Mathematics and Computer Science, Tartu 2005.
- [Patil 2002] A Patil, *Performance of Bluetooth Technologies and Their Applications to Location Sensing*, Master of Science Dissertation, Department of Electrical and Computer Engineering, 2002.
- [Priyantha 2000] N Priyantha, A Chakraborty, H Balakrishnan, *The Cricket Location- Support system*, in ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), pp 32-43, Boston, MA, Agosto. 2000.
- [Rahnema 1993] M Rahnema, *Overview of the GSM System and Protocol Architecture*, IEEE Communications Magazine, pp. 92-100, Abril 1993.

- [Silva 2005] H Silva, *Sistemas de Comunicações Móveis Digitais*, Comunicações Móveis, Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica e Computadores, Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Coimbra 2005.
- [Tekinay 1998] S Tekinay, E Chao, R Richton, *Performance Benchmarking for Wireless Location Systems*, IEEE Communications Magazine, vol. 36, pp. 72-76, Abr. 1998.
- [Want 1992] R Want, A Hopper, V Falcao, J Gibbons, *The Active Badge Location System*, ACM Transactions on Information Systems, vol. 10, no. 1, pp. 91-102, Janeiro 1992.
- [Want 1995] R Want, B Schilit, D A Norman, R Gold, D Goldberg, K Petersen, J Ellis, M Weiser, *An overview of the ParcTab ubiquitous computing experiment*, IEEE Personal Communications Magazine, Vol. 2, Issue 6, pp. 28-43, Dezembro 1995.
- [Ward 1997] A Ward, A Jones, A Hopper, *New Location Technique for the Active Office*, IEEE Personal Communications Magazine, Vol. 4, No. 5, pp. 42-47, Outubro 1997.
- [Willassen 1998] S Willassen, *A Method for Implementing Mobile Station Location in GSM*, Master of Science Dissertation, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Dezembro 1998.
- [Zeimpekis 2003] V Zeimpekis, G Giaglis, G Lekakos, *A Taxonomy of Indoor and Outdoor Positioning Techniques for Mobile Location Services*, ACM, pp. 19-27, 2003.

# Anexos

## Anexo A - Plataforma de predição da localização

Para auxiliar o processo de aquisição de sinais de RF GSM, construção e manutenção da base de casos, análise do comportamento dos sinais de RF GSM e predição da localização foi desenvolvida uma plataforma integrando vários módulos, designada GSMile<sup>1</sup> [Baptista 2006], que na sua globalidade permite estudar o processo de localização recorrendo a assinaturas GSM. A figura 5.1 apresenta algumas interfaces da plataforma.

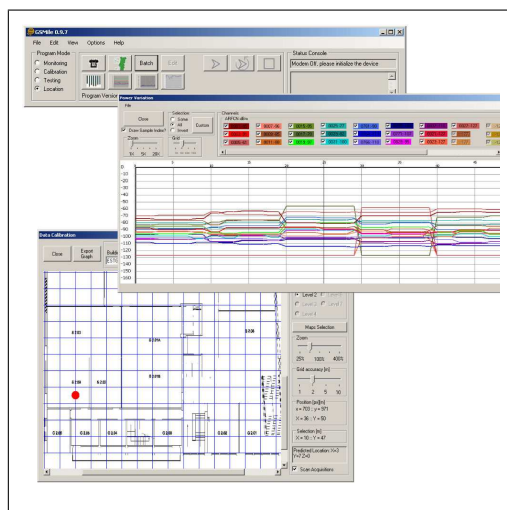


Figura 5.1: Aplicação GSMile disponibilizando alguns módulos de funcionamento (interface principal, análise da variação dos sinais e mapa de predição).

<sup>1</sup>Numa primeira fase, as funcionalidades básicas da plataforma, como a comunicação com o terminal GSM, aquisição de assinaturas GSM e a predição da localização foram desenvolvidas pelo autor da presente dissertação. Posteriormente, numa segunda fase, no âmbito de um projecto em parceria com a PT Inovação, a plataforma evoluiu, sendo reestruturada e mantida por um novo colaborador, Bruno Baptista.

A plataforma apresenta uma estrutura modular, permitindo assim a integração de diversos módulos (como a aplicação de diversos algoritmos de predição). Entre outras funcionalidades, a plataforma permite aceder aos sinais transmitidos pelas estações base da rede GSM, captados através de um terminal GSM. O processo de aquisição de dados é configurável e parametrizável pelo utilizador. A cada leitura de assinaturas GSM é adicionada informação complementar para auxiliar a análise e compreensão do comportamento dos sinais de RF GSM, nomeadamente, as condições ambientais, o posicionamento num mapa e respectiva grelha. O processo de aquisição de leituras para o presente trabalho é descrito no capítulo capítulo 4 deste documento

É importante definir um método consistente de aquisição de dados em diferentes localizações, para garantir a eliminação de erros ou o enviesamento dos leituras em cenários distintos. Este procedimento deverá definir o equipamento e respectiva configuração, o seu posicionamento (altura e orientação), quais os parâmetros dos algoritmos de localização e da plataforma de aquisição de assinaturas GSM, bem como as condições do ambientais. A aquisição de dados para o presente trabalho foi realizada com o apoio de um equipamento móvel, composto por um suporte, um modem GSM Sony-Ericsson GT47, um portátil e uma UPS. O equipamento foi usado com a mesma configuração em todos os locais de recolha de dados, mantendo a antena do modem GSM a uma altura constante de 1.7m, sendo visível na figura 5.2.



Figura 5.2: Equipamento móvel para leitura de sinais GSM.

## Anexo B - Estrutura de uma assinatura GSM

O *engineering mode* de um terminal GSM, obtido através do comando AT AT\*E2EMM=5, permite aceder à informação disponibilizada pela rede GSM. O resultado deste comando é uma *string*, em *plain text* contendo a seguinte estrutura:

```
AT*E2EMM=5 *E2EMM: <servcell mcc>,<servcell mnc>,<servcell lac>,  
<servcell ci>,<servcell bsic>,<servcell ch>[,<servcell rxl>,  
<servcell C1>,<servcell C2>][,<servcell rxlFull>,<servcellrxlSub>,  
<servcell rxqfull>,<servcell rxqsub>,<servcell tn>,<servcell ta>],  
<neighborcell1 mcc>,<neighborcell1 mnc>,<neighborcell1 lac>,  
<neighborcell1 ci>,<neighborcell1 bsic>,<neighborcell1 ch>,  
<neighborcell1 rxl>[,<neighborcell1 C1>,<neighborcell1 C2>],  
<neighborcell2 mcc>,<neighborcell2 mnc>,<neighborcell2 lac>,  
<neighborcell2 ci>,<neighborcell2 bsic>,<neighborcell2 ch>,  
<neighborcell2 rxl>[,<neighborcell2 C1>,<neighborcell2 C2>], ...,  
<neighborcelln mcc>,<neighborcellnmnc>,<neighborcelln lac>,  
<neighborcelln ci>,<neighborcelln bsic>,<neighborcelln ch>,  
<neighborcelln rxl>[,<neighborcelln C1>,<neighborcelln C2>]  
<CR><LF> OK
```

A definição dos diferentes parâmetros é a seguinte:

- **mcc** - *Mobile Country Code*, representando o código do país, identificando o *Public Land Mobile Network* (PLMN) da célula servidora, de acordo com o *International Telecommunication Union* (ITU). Três dígitos no formato decimal.
- **mnc** - *Mobile Network Code*, representando o código do operadora da segundo o PLMN. Dois dígitos no formato decimal.
- **lac** - *Location Area Code*. Dois bytes no formato hexadecimal.
- **ci** - *Cell ID*. Identificação da célula. Dois bytes no formato hexadecimal.
- **Bsic** - *Base Stations Identification Code*, código identificador da estação base. Um byte no formato hexadecimal.



- **ch** - *Channel*. Representa o *Absolute Radio Frequency Channel Number* (ARFCN) que disponibiliza o valor absoluto do canal de RF, identificando o portador *Broadcast Control Channel* (BCCH). Valor de 0-1023.
- **rxl** - *Received Signal Strength Level*, em dBm, medido em modo *idle*.
- **rxlfull** - *Received Signal Strength Level*, em dBm. A potência do sinal (Rx) é obtida durante o *downlink* e estatisticamente aplicada a 100 *frames* TDMA do canal de tráfego (*Traffic Channel* - TCH) ou durante um *multiframe Slow Associated Control Channel* (SACCH).
- **C1** - Parâmetro aplicado às células vizinhas, relativo ao critério para o *Path Loss*. Este valor é calculado pelo dispositivo móvel, quando se encontra no estado *idle*, para determinar se deve usar a presente célula. Após o cálculo o seu valor deverá ser superior a 0.
- **C2** - Parâmetro para a selecção de células vizinhas.

Embora diferentes terminais GSM possam apresentar sensibilidades distintas na captação de sinais de RF GSM, observou-se que existe uma relação linear entre as leituras realizadas pelos diferentes equipamentos. Se num dado equipamento para um determinado canal, apresentava a potência do sinal com um acréscimo de  $n$  dbm, então todos os canais apresentavam essa variação. Assim, é possível desenvolver uma função que permita ter em conta a sensibilidade do equipamento em uso, convertendo e adequando os valores das bases de instâncias classificadas ao dispositivo.