



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Andreia Filipa Guerra Albermaz

Sistema de localização através de
ondas de som no interior de edifícios

Sistema de localização através de
ondas de som no interior de edifícios

Andreia Filipa Guerra Albermaz

UMinho | 2013

Outubro de 2013



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Andreia Filipa Guerra Albernaz

Sistema de localização através de
ondas de som no interior de edifícios

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia de Comunicações

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Agostinho Gil Teixeira Lopes

Outubro de 2013

DECLARAÇÃO

Nome: Andreia Filipa Guerra Albernaz

Correio electrónico: a55602@alunos.uminho.pt

Tlm.: 913375767

Número do Bilhete de Identidade:13819597

Título da dissertação: Sistema de localização através de ondas de som no interior de edifícios

Ano de conclusão: 2013

Orientador:

Agostinho Gil Teixeira Lopes

Designação do Mestrado:

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia de Comunicações

Área de Especialização: Engenharia de Comunicações

Escola de Engenharia

Departamento de Eletrónica Industrial

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO,
MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Guimarães, ___/___/_____

Assinatura: _____

Agradecimentos

O presente documento marca a conclusão deste percurso académico, que desde início sempre envolveu o apoio de algumas pessoas para a concretização dos meus objetivos. Por conseguinte, através deste documento, pretendo deixar um agradecimento a todas elas.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Agostinho Gil Teixeira Lopes pela orientação, dedicação e colaboração prestada durante o curso desta dissertação.

Em segundo lugar, gostaria de agradecer aos meus colegas presentes comigo diariamente na Robótica da Universidade do Minho, que acompanharam o meu trabalho e que me incentivaram na sua realização.

Gostaria também de agradecer ao Departamento de Eletrónica Industrial, nomeadamente ao Grupo de Automação, Controlo e Robótica da Universidade do Minho todas as condições e facilidades oferecidas para a realização desta dissertação.

Como não poderia ser deixado de dizer, um agradecimento muito especial aos meus pais e namorado, pela paciência que mostraram nos bons e nos maus momentos, e o seu apoio incondicional.

Quero também expressar a minha gratidão a todos os meus amigos e colegas da Universidade pelo companheirismo, espírito de ajuda mútua e apoio que me deram durante a minha carreira académica.

Finalmente, eu gostaria de agradecer a todas as pessoas que deram o seu contributo para este projeto.

Resumo

Com a evolução de robôs de utilização doméstica, caminha-se a largos passos para uma era onde o suporte a certas camadas da sociedade, nomeadamente os idosos ou pessoas com incapacidade ou dificuldade de locomoção, poderão ser acompanhados e assistidos por máquinas a todo o momento para as mais variadas tarefas do quotidiano.

Um dos aspetos mais importantes com a utilização destas máquinas é a forma de as chamar aquando da necessidade de ser prestado um qualquer serviço (trazer uma bebida por exemplo). A forma atualmente utilizada passa pelo recurso a um controlo remoto, com funcionamento por infravermelhos ou por rádio frequência, que necessita da utilização de uma bateria. Infelizmente, estas baterias perdem o seu nível de energia incapacitando o funcionamento do dispositivo de chamamento.

Por forma a ultrapassar esta limitação, a utilização de um dispositivo passivo que não necessita de qualquer tipo de alimentação é de todo aconselhável, mas que pode levantar outro tipo de problemas nomeadamente na localização do mesmo e por sua vez, da localização do chamador para lhe ser prestado o serviço.

Nesta dissertação é proposta uma solução para este desafio, onde é apresentado um sistema baseado num dispositivo passivo de chamamento através da emissão de um som agudo e num conjunto de sensores acústicos que, através de processos de análise de sinal, consegue calcular a localização do dispositivo. São apresentados os diversos componentes de todo o sistema, bem como todos os algoritmos e métodos utilizados para o cálculo da localização. O sistema foi implementado numa solução de baixo custo, através da utilização de um microcontrolador central para a análise dos sinais dos recetores. A experimentação efetuada provou a consistência e desempenho do sistema desenvolvido e os valores de localização obtidos possuíram erros inferiores a 1 m de raio.

Palavras-Chave: Localização interior, localização de fonte acústica, localização de som, Diferença de Tempo Interaural

Abstract

With the development of robots for domestic use mankind is giving large steps forward to an era where support for certain layers of society, particularly the elderly, people with disabilities or people with limited mobility, may be accompanied and assisted by machines at all times for a variety of everyday tasks.

One of the most important aspects to the use of these machines is the way of calling them when they are needed to provide any service (bring a drink for example). Nowadays a remote control is used to perform the operation based on infrared or radio frequency, which requires the use of a battery. Unfortunately, these batteries lose their power level disabling the call operation.

In order to overcome this limitation, the use of a passive device that does not require any type of power supply and it is highly advisable, but may raise other problems especially at the own location of the device and in turn the location of the caller for the service to be provide.

This dissertation proposes a solution to this challenge where a system is described based on a passive calling device that produces a sharp sound, with a set of acoustic sensors that through signal processing and analysis, calculates the location of the device. The various components of the entire system are also presented as well as all the algorithms and methods used for calculating the localization. The system was implemented in a low cost solution through the use of a microcontroller core for analyzing signals from the receivers. The testings performed proved the consistency and performance of the developed system and localization values obtained contain errors less than 1 m radius.

Keywords: Indoors localization, Acoustic Source Localization, Sound Localization, Interaural Time Difference

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS DO PROJETO	1
1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 SISTEMAS MAIS CONHECIDOS	5
2.1.1 <i>GPS (Global Positioning System)</i>	5
2.1.2 <i>WiFi (Wireless Fidelity)</i>	5
2.1.3 <i>RFID (Radio-Frequency IDentification)</i>	6
2.2 OUTROS SISTEMAS DE LOCALIZAÇÃO	8
2.2.1 <i>Sistema de localização RADAR (RADio Detection And Ranging)</i>	8
2.2.2 <i>Sistema BAT</i>	9
2.2.3 <i>Sistema Active-Badges</i>	10
2.2.4 <i>Cricket</i>	11
2.2.5 <i>Pinpoint</i>	12
2.3 SISTEMAS DE LOCALIZAÇÃO BASEADOS EM SOM	13
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	15
3.1 TRIANGULAÇÃO	15
3.2 TRILATERAÇÃO	15
3.3 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DO ALCANCE	16
3.4 PROPAGAÇÃO DO SOM NOS OUVIDOS	17
3.4.1 <i>ITD (Interaural Time Difference)</i>	19
4 ARQUITETURA DO SISTEMA	21
4.1 INTRODUÇÃO	21
4.2 IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA	25
4.3 <i>HARDWARE</i> DESENVOLVIDO	26
4.3.1 <i>Recepção acústica</i>	26

4.3.2	<i>Unidade de controlo</i>	30
4.3.3	<i>Primeiro Protótipo</i>	31
4.3.4	<i>Segundo Protótipo</i>	34
4.4	SOFTWARE DESENVOLVIDO	36
4.4.1	<i>Algoritmos da plataforma MBED</i>	37
4.4.2	<i>Interface gráfico com o utilizador</i>	43
5	METODOLOGIA	49
5.1	INTRODUÇÃO	49
5.2	EXPERIMENTAÇÃO	51
6	RESULTADOS OBTIDOS	55
6.1	EXPLICAÇÃO DA ANÁLISE EFETUADA	55
6.2	RESULTADOS DOS TESTES EFETUADOS NA DIAGONAL AOS SENSORES	57
6.2.1	<i>Singularidade</i>	59
6.2.2	<i>Análise gráfica dos erros obtidos</i>	60
6.2.3	<i>Desvio padrão</i>	62
6.3	RESULTADOS DOS TESTES EFETUADOS NA ORTOGONAL AOS SENSORES	63
6.3.1	<i>Análise gráfica dos erros obtidos</i>	63
6.4	INFLUÊNCIA DA ALTURA DO CLIQUE	65
6.5	CONSIDERAÇÕES AOS RESULTADOS OBTIDOS	66
7	CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO	68
7.1	CONCLUSÃO	68
7.2	TRABALHO FUTURO	69
	REFERÊNCIAS	70
	APÊNDICES	72
	APÊNDICE A – VALORES COMPLETOS DAS DIVERSAS VARIÁVEIS DO SISTEMA	74
	APÊNDICE B – DADOS COMPLETOS DA EXPERIMENTAÇÃO	77
	APÊNDICE C – CÓDIGO FONTE EM MICROSOFT VISUAL STUDIO EM C#	80
	APÊNDICE D – CÓDIGO FONTE PARA A PLATAFORMA MBED	83

Índice de Figuras

FIGURA 1. ROBÔ <i>MARY</i> DESENVOLVIDO PELO LABORATÓRIO DE ROBÓTICA MÓVEL DA UNIVERSIDADE DO MINHO	2
FIGURA 2. DISPOSITIVO DE CLIQUE UTILIZADO TÍPICAMENTE PARA O TREINO DE ANIMAIS.....	3
FIGURA 3. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO RFID [2]	7
FIGURA 4. UNIDADE DE <i>HARDWARE CRICKET</i> (<i>BEACON</i> OU OUVINTE) [5]	12
FIGURA 5. SOLUÇÕES ACÚSTICAS DE LOCALIZAÇÃO DE AVIÕES APÓS A 1ª GUERRA MUNDIAL (PRÉ-SURGIMENTO DO RADAR) [11].....	14
FIGURA 6. TRIANGULAÇÃO.....	15
FIGURA 7. TRILATERAÇÃO.....	16
FIGURA 8. OUVIDO HUMANO [13].....	18
FIGURA 9. O ESPETRO SONORO (ADAPTADO DE [14])	18
FIGURA 10. DIFERENÇA DE TEMPO ENTRE OS OUVIDOS (ITD) E DIFERENÇA DE NÍVEL ENTRE OS MESMOS (DPI) (ADAPTADO DE [16])	20
FIGURA 11. PROPAGAÇÃO DO SOM EM DIREÇÃO AOS QUATRO SENSORES E RESPECTIVA DISPOSIÇÃO DOS SENSORES NO LABORATÓRIO	21
FIGURA 12. RETAS OBTIDAS PELO CÁLCULO DA DIFERENÇA DE TEMPO DE CHEGADA DO SOM AOS DIVERSOS SENSORES	22
FIGURA 13. ÂNGULO θ RESULTANTE DO CÁLCULO DA EQUAÇÃO (2) ENTRE DOIS SENSORES AUDITIVOS.....	23
FIGURA 14. INTERSEÇÃO ENTRE LINHAS.....	23
FIGURA 15. EXEMPLO DE ESCOLHA DO PONTO BASEADO NA INTERSEÇÃO DAS RETAS OPOSTAS.....	24
FIGURA 16. ARQUITETURA DO SISTEMA FÍSICO IMPLEMENTADO	26
FIGURA 17. SINAL DO CLIQUE ADQUIRIDO NO OSCILOSCÓPIO DIGITAL (20 MS/DIV., 1 V/DIV.)	27
FIGURA 18. SINAL DO CLIQUE EM MAIOR DETALHE (200 μ S/DIV., 1 V/DIV.).....	27
FIGURA 19. DIAGRAMA DE BLOCOS DA RECEÇÃO ACÚSTICA	28
FIGURA 20. SINAL DE SAÍDA NOS QUATRO SENSORES DE RECEÇÃO ACÚSTICA (20 MS/DIV., 1 V/DIV.)	28
FIGURA 21. ESQUEMA ELÉTRICO DO CIRCUITO DE RECEÇÃO ACÚSTICA	29
FIGURA 22. IMAGEM DE UM DOS SENSORES DESENVOLVIDOS	29
FIGURA 23. VISÃO GERAL DO MICROCONTROLADOR [19]	30
FIGURA 24. ESQUEMA ELÉTRICO DO PRIMEIRO PROTÓTIPO.....	31
FIGURA 25. PRIMEIRO PROTÓTIPO COM SOLUÇÃO MBED	32
FIGURA 26. SINAIS MEDIDOS PELO OSCILOSCÓPIO DOS 4 RECEPTORES ACÚSTICOS À ENTRADA DA UNIDADE DE CONTROLO (20 MS/DIV., 1 V/DIV.).....	33
FIGURA 27. ESQUEMA ELÉTRICO DO SEGUNDO PROTÓTIPO	34

FIGURA 28. SEGUNDO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO	35
FIGURA 29. SINAIS MEDIDOS NAS ENTRADAS DIGITAIS DA PLATAFORMA (20 MS/DIV., 1 V/DIV.)	35
FIGURA 30. FLUXOGRAMA DA LEITURA DO TIMER	38
FIGURA 31. FLUXOGRAMA DA ROTINA PRINCIPAL DO PROGRAMA	40
FIGURA 32. FLUXOGRAMA DA ROTINA DE CÁLCULO DA COORDENADA	42
FIGURA 33. INTERFACE GRÁFICO COM O UTILIZADOR DESENVOLVIDO EM C# PARA INTERAÇÃO COM O UTILIZADOR.....	43
FIGURA 34. INTERFACE GRÁFICO COM ALGUMAS COORDENADAS RECEBIDAS	44
FIGURA 35. INTERFACE GRÁFICO COM SEIS COORDENADAS RECEBIDAS GERADAS NO MESMO LOCAL.....	45
FIGURA 36. FLUXOGRAMA DA APLICAÇÃO DESENVOLVIDA COMO INTERFACE GRÁFICO COM O UTILIZADOR.....	47
FIGURA 37. UTILIZAÇÃO DO OSCILOSCÓPIO DIGITAL DE QUATRO CANAIS DURANTE A EXPERIMENTAÇÃO	50
FIGURA 38. VARÃO DE 1 M DE COMPRIMENTO UTILIZADO NA EXPERIMENTAÇÃO	50
FIGURA 39. COORDENADAS UTILIZADAS NA EXPERIMENTAÇÃO E DIAGONAIS AOS SENSORES.....	52
FIGURA 40. COORDENADAS UTILIZADAS NA EXPERIMENTAÇÃO E ORTOGONAIS OU EM LINHA COM OS SENSORES.....	52
FIGURA 41. VALORES DE (Px,Py) EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO DO SENSOR	56
FIGURA 42. EXEMPLO DE ESCOLHA DO PONTO BASEADO NA INTERSEÇÃO DAS RETAS OPOSTAS.....	59
FIGURA 43. EXEMPLO DE SINGULARIDADE NA INTERSEÇÃO DAS RETAS GERADAS ENTRE SENSORES.....	60
FIGURA 44. RESULTADOS DA LOCALIZAÇÃO NAS DIAGONAIS AOS SENSORES COM A UNIDADE DE CONTROLO DO PROTÓTIPO 1	61
FIGURA 45. RESULTADOS DA LOCALIZAÇÃO NAS DIAGONAIS AOS SENSORES COM A UNIDADE DE CONTROLO DO PROTÓTIPO 2	61
FIGURA 46. RESULTADOS DA LOCALIZAÇÃO NA ORTOGONAL AOS SENSORES COM A UNIDADE DE CONTROLO DO PROTÓTIPO 1	64
FIGURA 47. RESULTADOS DA LOCALIZAÇÃO NA ORTOGONAL AOS SENSORES COM A UNIDADE DE CONTROLO DO PROTÓTIPO 2	64
FIGURA 48. GRÁFICO DA EVOLUÇÃO DA POSIÇÃO OBTIDA EM DIVERSAS ALTURAS AO SOLO DO DISPOSITIVO DE CLIQUE	65

Índice de Tabelas

TABELA 1 - COMPARAÇÃO DOS VÁRIOS SISTEMAS MAIS CONHECIDOS (ADAPTADO DE [3])	8
TABELA 2 - COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE DIVERSOS SISTEMAS DE LOCALIZAÇÃO (ADAPTADO DE [4]).....	13
TABELA 3 - COMPARAÇÃO DE VALORES LIDOS DO OSCILOSCÓPIO COM OS VALORES OBTIDOS DO MICROCONTROLADOR	36
TABELA 4 - COORDENADAS DOS TESTES REALIZADOS COM A DEFINIÇÃO DO SENSOR MAIS PRÓXIMO AO TESTE	53
TABELA 5 - COORDENADAS DOS TESTES REALIZADOS COM A DEFINIÇÃO DO SENSOR MAIS PRÓXIMO AO TESTE	53
TABELA 6 - VALORES DE <i>TIMESTAMP</i> LIDOS EM CADA TESTE EFETUADO PRÓXIMO DO SENSOR 1 (1º QUADRANTE).....	57
TABELA 7 - VALORES DE (Px, Py) CALCULADOS PELA PLATAFORMA MBED EM CADA TESTE EFETUADO.....	57
TABELA 8 - MÓDULO DA DIFERENÇA ENTRE OS VALORES DE (Px, Py) E A POSIÇÃO REAL DO TESTE	58
TABELA 9 - SOMA DOS VALORES DE Px COM Py EM CADA PONTO	58
TABELA 10 - DESVIO PADRÃO GLOBAL POR QUADRANTE	62
TABELA 11 - VALORES DOS ERROS OBTIDOS POR PONTO E LOCALIZAÇÃO REAL DO TESTE (VALORES EM METROS)	63
TABELA 12 - VALORES OBTIDOS COM O DISPOSITIVO DE CLIQUE EM DIVERSAS ALTURAS AO SOLO	65

Lista de abreviaturas e siglas

ADC	Analog-to-Digital Converter
AP	Access Point
CAN	Controller Area Network
CR	Carriage Return
GPIO	General Purpose Input/Output
GPS	Global Positioning System
I2C	Inter-Integrated Circuit
ITD	Interaural Time Difference
LED	Light Emission Diode
MIT	Massachusets Institute of Technology
POA	Phase Of Arrival
PWM	Pulse-Width Modulation
RAM	Random Access Memory
RADAR	RAudio Detection And Ranging
RF	Radio Frequency
RFID	Radio-Frequency Identification
RGBD	Red- Green - Blue - Depth
RSP	Received Signal Phase
RSS	Received Signal Strength
RTLS	Real-Time Location Systems
SPI	Serial Peripheral Interface
TTL	Transistor-Transistor Logic

TDOA	Time Difference Of Arrival
TOA	Time Of Arrival
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus
UTP	Unshielded Twisted Pair
WiFi	Wireless Fidelity

1 Introdução

Os sistemas de localização em espaço fechado permitem determinar a posição de pessoas ou de objetos assim como na ajuda de orientação dentro de espaços fechados. A sua aplicabilidade pode-se estender a diversos meios, com grande aplicabilidade no mundo da robótica móvel. De acordo com as necessidades específicas de localização numa área fechada, a abordagem dos sistemas atuais de localização, tal como por exemplo o sistema GPS, são soluções inadequadas uma vez que é um sistema completamente inoperacional em espaços fechados devido à baixa penetração dos sinais dos satélites nas paredes dos edifícios. É necessário por isso, a utilização de sistemas que permitam o funcionamento em espaços interiores, e que consigam à sua escala possuir uma resolução de funcionamento adequada à aplicação em causa.

A robótica de interiores encontra-se visivelmente em expansão, não só pelos robôs já comercializados (*iRobot Roomba* para aspirar o pó de uma casa por exemplo), como pelo evento de robótica mundial *RoboCup* com uma das suas ligas o *RoboCup@Home*. Esta liga tem como objetivo o desenvolvimento de robôs de utilização doméstica, para um vasto leque de serviços, desde apanhar autonomamente o lixo do chão, a servir o seu dono trazendo-lhe coisas a pedido. Estes robôs possuem capacidade de orientação e de navegação e são munidos de um ou mais braços com garras manipuladoras, que lhes confere o manuseamento de objetos. A sua aplicabilidade é infindável em todos os lares, mais concretamente para suporte à terceira idade, não só pela companhia que pode conferir, como também pelos serviços que pode prestar a pedido de um idoso acamado ou com dificuldades locomotoras.

Mas estes sistemas subservientes possuem uma grande lacuna: **o conhecimento da localização do chamador**. É desta forma que nasceu o tema este trabalho, com a finalidade de colmatar esta lacuna.

1.1 Objetivos do projeto

O Laboratório de Robótica Móvel da Universidade do Minho possui um robô de nome Mary (Figura 1), que foi desenvolvido para participar no evento *RoboCup@Home* em 2010, tendo

sido a primeira equipa portuguesa a participar nesta liga desta competição. Este robô possui um braço manipulador, deslocamento omnidirecional e visão por câmara RGBD (*Red - Green - Blue - Depth*).



Figura 1. Robô *Mary* desenvolvido pelo Laboratório de Robótica Móvel da Universidade do Minho

A ideia base deste trabalho foi a necessidade de chamar o robô e que este se dirija à pessoa chamadora num determinado espaço, onde existem mesas, cadeiras, armários e pessoas, tal como num ambiente doméstico. O problema inicial reside na obtenção da coordenada espacial da posição da pessoa chamadora. O chamamento não deverá ser oral, pois não só um idoso tem tipicamente dificuldades de articulação vocal, bem como qualquer som de um rádio ou televisão poderá ser interpretado como o sinal de chamamento. Por outro lado, a utilização de um dispositivo eletrónico para o envio de um sinal, apesar de já existirem comercialmente soluções para esta aplicação, tem necessidades energéticas que também não se coadunam com a utilização por parte de idosos que, apesar de terem vivido noutros tempos onde a tecnologia era pouco desenvolvida, não estão muito predispostos à troca de pilhas de um qualquer controlo remoto.

Dessa forma, pensou-se na utilização de algo não eletrónico e que emitisse um sinal que pudesse ser utilizado para o cálculo de uma possível localização. Esse dispositivo intitulado de “clique” (Figura 2) é utilizado no treino de animais e produz um som agudo (clique) quando pressionado. Ficou então definido como objetivo deste trabalho, o desenvolvimento de uma solução de localização do sinal sonoro emitido pelo clique, que permitisse o chamamento do

robô Mary com um erro que fosse inferior a 1 m de raio, com a premissa de ser um projeto de baixo custo.



Figura 2. Dispositivo de clique utilizado tipicamente para o treino de animais

1.2 Organização da dissertação

Este documento que descreve todo o trabalho que foi realizado e que o levou à sua especificação e desenvolvimento é dividido em sete capítulos.

Após a presente introdução, o capítulo 2 aborda um estudo sobre alguns dos sistemas de localização de pessoas e/ou objetos através de tecnologias já existentes. Inicialmente serão apresentados os sistemas de localização mais conhecidos, particularmente GPS (*Global Positioning System*), WiFi (*Wireless Fidelity*) e RFID (*Radio-Frequency IDentification*) prosseguindo-se para outros sistemas tais como sistemas RADAR (*RADio Detection And Ranging*), sistemas BAT, *Active-Badges*, *Cricket* e *Pinpoint*. Nesse mesmo capítulo é também referido sistemas de localização baseados em som.

No capítulo 3 serão apresentados alguns dos conceitos considerados mais revelantes que os sistemas de localização em geral são baseados. Neste capítulo faz-se referência aos processos de Triangulação e de Trilateração, às diversas técnicas de medição do alcance atingido pelo som e ainda ao processo de Propagação do som nos ouvidos em conjunto com a diferença de tempo entre estes (ITD (*Interaural Time Difference*)).

No capítulo 4 é apresentada a arquitetura do sistema desenvolvida para a implementação de uma solução de *hardware/software* de forma a atingir os objetivos propostos. Será explicado detalhadamente todo o processo de implementação do *Hardware* desenvolvido e do *Software* desenvolvidos. Posteriormente será descrito no capítulo 5 toda a metodologia do projeto utilizada para testar as capacidades da solução desenvolvida.

O capítulo 6 descreve os resultados obtidos e uma análise aos vários testes realizados com o acréscimo de uma explicação da análise gráfica de erros obtidos.

Finalmente, o capítulo 7 apresenta as conclusões desta dissertação, indica possíveis modificações e fornece algumas propostas e "caminhos" a seguir em trabalhos futuros.

No apêndice foram ainda colocados os dados completos de toda a experimentação e o código desenvolvido na plataforma Microsoft® *Visual Studio* e para a plataforma MBED.

2 Revisão bibliográfica

Neste capítulo pretende-se descrever o estado da arte na localização de pessoas e/ou objetos através de tecnologias já existentes. Estas serão descritas caso a caso referindo os pontos fortes e os pontos fracos de cada um dos sistemas apresentados.

2.1 Sistemas mais conhecidos

Nesta secção, serão descritos os sistemas mais conhecidos, tanto de funcionamento em exteriores como em interiores de edifícios.

2.1.1 GPS (*Global Positioning System*)

O GPS é o sistema de localização mais conhecido e é baseado numa rede de satélites que enviam sinais de rádio, onde o objeto interessado recebe-os e efetua o cálculo da sua própria localização. O sistema fornece posições precisas em qualquer instante e em qualquer lugar do mundo. Este sistema permite o cálculo da coordenada do equipamento que recebe os sinais de GPS com uma precisão de até 20 m na solução livre deste método. Por outro lado, a sua precisão fica comprometida em ambientes urbanos, principalmente próximo a grandes edifícios ou florestas. As vantagens deste sistema passam por um acesso ilimitado, um funcionamento a qualquer hora do dia e em qualquer parte do mundo, a obtenção de uma informação quase instantânea e com baixos custos de implementação. No entanto, não funciona dentro de edifícios.

2.1.2 WiFi (*Wireless Fidelity*)

WiFi é uma tecnologia sem fios de curto alcance (tipicamente 100 m) que permite o acesso em Banda Larga via rádio. É uma tecnologia existente nos computadores, *tablets* ou outros dispositivos móveis para acesso à internet, cópias de ficheiros, entre outros serviços. Ocaña et al [1] desenvolveram um sistema de localização de equipamento móvel dentro de edifícios baseada nesta tecnologia. O autor desenvolveu um mapa de intensidade de sinal da tecnologia WiFi emitida por diferentes APs (*Access Points*) referenciados num edifício pela sua localização

física. Dessa forma, permite saber em qualquer localização qual a intensidade de sinal das diferentes redes WiFi. Quando o sistema móvel está em utilização num qualquer ponto do edifício, consulta este mapa e consegue obter, por interpolação da intensidade dos vários sinais que recebe, a sua localização física dentro do edifício. A precisão do sistema desenvolvido pelo autor é de 2,57 m. Como este sistema é aplicado em robôs móveis, que possuem dados odométricos da sua locomoção, permitiu obter através da fusão sensorial com o sistema WiFi uma precisão de 0,40 m.

Este sistema torna-se vantajoso no custo de implementação, a banda de RF (radiofrequência) é livre e pode funcionar na localização de um edifício e não apenas num sítio específico. Em contrapartida, o seu alcance é limitado à zona de cobertura WiFi do AP. A presença de pessoas ou obstáculos perto da antena pode variar a intensidade do sinal e a precisão geralmente não é menor do que 1 m.

2.1.3 RFID (*Radio-Frequency IDentification*)

A RFID é um método de identificação automática através de sinais de rádio, que recupera e armazena dados remotamente através de *tags* (etiquetas) RFID. Essas *tags* podem ser colocadas em pessoas, objetos ou produtos. Contêm um pequeno circuito integrado que permite responder aos sinais de rádio enviados por uma base transmissora. As *tags* RFID podem ser classificadas em *tags* ativas e *tags* passivas.

As primeiras são alimentadas por uma bateria interna para transmitir o seu sinal sobre uma distância razoável e tipicamente permitem processos de leitura e escrita.

Por outro lado, as *tags* passivas operam sem bateria, sendo que a sua alimentação é fornecida pelo próprio leitor através das ondas eletromagnéticas. O custo das *tags* ativas é superior a estas, além de possuírem um tempo de vida útil limitada a um máximo de 10 anos (as passivas têm, teoricamente, uma vida útil ilimitada). Este tipo de *tags* é apenas do tipo de leitura (*read-only*) e são utilizadas para curtas distâncias.

Kirti Chawla [2] propôs uma estrutura de localização baseada em sistemas RFID que permitiu estimar a posição exata de um objeto com uma precisão de 15 cm dentro de alguns segundos. O método de localização baseia-se na variação contínua dos níveis de energia dos leitores RFID para inferir a distância e a informação de posição sobre as *tags* alvo (*target tag*).

A Figura 3 representa a região de interseção coberta por lóbulos de ondas de rádio emitidos pelos diferentes leitores. Baseado no nível de potência relativa que é necessário para um leitor detectar uma *target tag*, pode-se inferir a distância entre a *tag* e o leitor.

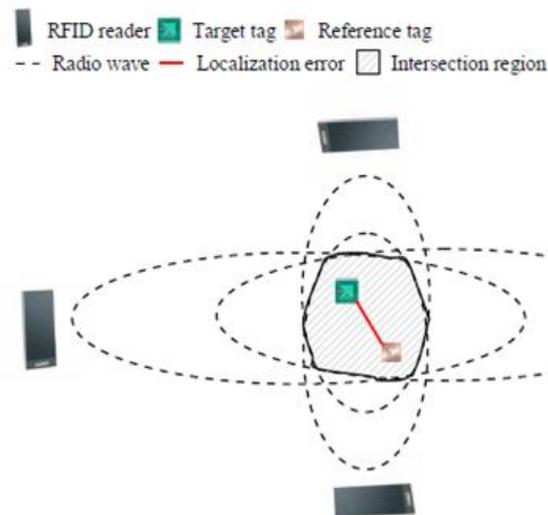


Figura 3. Princípio de funcionamento do método de localização RFID [2]

As *tags* de referência (*reference tags*) são utilizadas em posições conhecidas para ajudar a calibrar a potência em relação à distância, aplicando vários leitores, de forma a reduzir a incerteza de localização quando deduz a posição das *target tags*.

As *tags* de referência servem como um mecanismo de *feedback* que permite ao sistema adaptar-se dinamicamente às variáveis desconhecidas (por exemplo, o ruído, oclusões, interferências, etc.) que podem afetar negativamente a legibilidade e localização da *tag*.

Embora a utilização de uma *tag* de referência permita verificar a relação real entre a potência e a distância, podem-se na mesma introduzir erros nas estimativas de posicionamento destas *tags*.

Estes autores aplicam também três algoritmos de localização que incorporam os princípios básicos da estrutura de localização proposta, discutindo as possíveis fontes de localização de erros e as heurísticas presentes para minimizar o erro. O método de localização proposto utiliza uma variação dos níveis de potência do leitor para inferir a posição de *target tags*.

Este sistema é eficaz, preciso e exato apresentando um baixo preço de *tags*, em contrapartida aos elevados preços dos leitores que são sensivelmente cerca de 1160€ (valores obtidos por consulta comercial) por cada unidade. Seguidamente é demonstrado na Tabela 1 a comparação das diversas tecnologias apresentadas anteriormente.

Tabela 1 - Comparação dos vários sistemas mais conhecidos (adaptado de [3])

	GPS	WiFi	RFID ativa	RFID passiva
Energia utilizada	Média	Elevada	Baixa a média	Nenhuma
Débito de dados	Não aplicável	Elevado	Baixo a médio	Baixo
Cobertura	Muito alta (<i>outdoor</i>)	Elevada	Média	Baixa
Custo	Alto	Alto	Médio	<i>Tags</i> – Baixo <i>Readers</i> - Médio a alto
Segurança	Não aplicável	Alto	Média	Limitada
Maiores vantagens	Cobertura de longo alcance	Tecnologia convencional de grande utilização	Baixo preço dos <i>readers</i>	Baixo preço de <i>tags</i> , sem bateria exigida na <i>tag</i>
Maiores desvantagens	Não trabalha dentro de edifícios	Baixa precisão, consumo muito alto de energia (autonomia da bateria de 1 ou 2 dias)	<i>Tags</i> exigem bateria (vida deve ser de 1-4 anos)	Curta distância (precisa de múltiplos <i>readers</i> ou <i>tags</i> de referência para RTLS)

2.2 Outros sistemas de localização

Nesta segunda secção irão ser apresentados outros sistemas menos conhecidos, sendo alguns deles já comercializados.

2.2.1 Sistema de localização RADAR (*R*Adio *D*etection *A*nd *R*anging)

Este sistema implementa um serviço de localização interior, aproveitando uma rede de dados RF já existente. Aqui a intensidade do sinal de RF é utilizada como uma medida de distância entre um transmissor e um recetor RF. Esta informação é então utilizada para localizar o utilizador através de um processo de triangulação. O sistema utiliza uma de duas abordagens para determinar a informação da posição.

- 1) Na primeira abordagem, numa fase fora de serviço (*offline*), um mapa de intensidade do sinal RF de todo o espaço é gerado pela colocação de transmissores em vários locais e medindo a intensidade do sinal em recetores fixos de coordenada conhecida. De seguida, durante o funcionamento normal, a intensidade do sinal transmitido pelo emissor móvel é medido nas estações recetoras fixas e a sua posição é inferida do mapa previamente criado.
- 2) Na segunda abordagem o sistema utiliza um modelo de propagação de RF que leva em conta fatores como o número de paredes entre um recetor e um transmissor para calcular a intensidade do sinal de RF, através da colocação de transmissores em várias posições. Esta informação é utilizada para obter o melhor ajuste para uma determinada posição do transmissor. O cálculo da posição pode ser feito através de um controlador central ou no próprio recetor.

O sistema RADAR depende da intensidade do sinal de RF para determinar a distância para as estações base RF, mas a natureza altamente imprevisível da propagação de RF dentro de edifícios, juntamente com a natureza dinâmica do próprio ambiente, reduz a precisão das medições de distância para apenas 3 metros. Além disso, para a primeira abordagem acima descrita, a geração do mapa de intensidade do sinal de RF *offline* torna-se um procedimento mais complexo [4].

2.2.2 Sistema BAT

O sistema BAT foi desenvolvido pela *AT&T Research Labs* e fornece informação de localização em interior de edifícios, por acompanhamento do paradeiro do utilizador. Objetos e/ou utilizadores móveis dentro de um determinado espaço carregam consigo transmissores sem fio ou *tags* com identificadores únicos. A base de dados de localização central que armazena a posição desses transmissores é construída através do rastreamento periódico de cada objeto.

A infraestrutura consiste numa matriz cuidadosamente definida de recetores. Cada elemento recetor consiste num recetor de ultrassom e de RF dispostos para formar uma rede quadrada de 1,2 x 1,2 m. Eles são normalmente montados no teto de uma sala e estão interligados através de uma rede de comunicações série à base de dados de localização central.

As *tags* sem fio consistem num transmissor RF e num transmissor ultrassom com identificadores globais exclusivos. Cada *tag* é consultada periodicamente, uma de cada vez, através de mensagens de transmissão que lhes são dirigidas a partir do controlador central. Ao

ouvir uma mensagem que lhe é endereçada, a *tag* responde com um pulso ultrassônico. Cada elemento recetor que também recebe a mensagem de RF original a partir de uma estação base, mede a diferença de tempo entre a chegada da mensagem RF e a resposta ultrassom da *tag*. Esta diferença de tempo é utilizada para obter a distância entre a *tag* e o elemento recetor considerado. Esta informação é então enviada para uma estação central, onde o processamento é feito para remover imprecisões causadas por fatores com sinais ultrassônicos refletidos. Para obter pelo menos três medições precisas de distância, é possível estimar a posição exata da *tag*, (erro mínimo) e portanto, a posição do objeto que está a ser rastreado.

O sistema BAT possui uma precisão de 3-4 cm devido à sua arquitetura rigidamente controlada centralmente e pela posição exata da posição da grelha de sensores (recetores). No entanto, a sua arquitetura é fundamentalmente baseada no rastreamento dos utilizadores e dos dispositivos, enquanto que a sua infraestrutura com fio, causa um custo elevado na implantação e na manutenção [4].

2.2.3 Sistema Active-Badges

O sistema *Active-Badge* foi desenvolvido pela Olivetti Labs™ e foi um dos primeiros sistemas de localização e rastreamento dentro de edifícios, com uma arquitetura que produziu uma forte influência em sistemas desenvolvidos posteriormente. Os objetos são rastreados pela utilização de um crachá, que periodicamente emite um identificador único através de sinais de infravermelhos. Os recetores fixos de infravermelhos colocados em cada compartimento recebem esta informação e passam-na a uma rede para a base de dados central. As paredes do compartimento agem como fronteiras naturais para as transmissões de sinais infravermelhos, permitindo dessa forma que o recetor possa assumir com segurança que qualquer crachá visto está mesmo nesse compartimento. Assim, o crachá é associado ao compartimento onde o recetor fixo está instalado.

A natureza de rastreamento desta arquitetura levanta algumas questões pertinentes de privacidade. A infraestrutura de cabo aos recetores de sinal infravermelho aumenta o custo de instalação e de manutenção, com a agravante de que os sinais de infravermelhos possuem zonas mortas nos compartimentos [4].

2.2.4 Cricket

O sistema *Cricket* foi projetado e desenvolvido pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) e é baseado num sistema de nós. Cada nó é uma plataforma de *hardware* que consiste num pequeno transmissor RF, num microcontrolador e num outro *hardware* associado para gerar e receber sinais ultrassom com um interface anfitrião. Existem dois tipos de nós *Cricket*: faróis (*beacons*) e ouvintes. Os *beacons Cricket* agem como pontos do sistema de localização de referência fixa e são normalmente ligados ao teto e às paredes de um edifício, enquanto que, os ouvintes *Cricket* estão ligados a objetos que precisam para obter a sua localização. Cada *beacon* transmite periodicamente uma mensagem de radiofrequência contendo informações específicas desse *beacon*, tal como o identificador único do próprio, as suas coordenadas, o espaço físico associado a este, etc. No início da mensagem RF, um *beacon* transmite um pulso ultrassónico estreito que permite aos ouvintes medir as distâncias para os *beacons*, utilizando a diferença do tempo de chegada dos sinais de radiofrequência e de ultrassom. Para reduzir o consumo de energia dos *beacons* e a complexidade do *hardware*, estes pulsos ultrassónicos não contêm dados. Os ouvintes *Cricket* passivamente ouvem as transmissões do *beacon* e processam uma distância para os *beacons* mais próximos. Cada ouvinte utiliza essa distância e as informações contidas nas mensagens de RF dos *beacons* para calcular a sua posição espacial e orientação (ou um subconjunto dessa informação de localização).

Quando os *beacons* são implantados, eles não sabem as suas coordenadas de posição. Para as calcular, um ouvinte *Cricket* ligado a uma plataforma móvel percorre o espaço e recolhe as distâncias entre os *beacons* para si mesmo. Utilizando essas distâncias, um anfitrião ligado ao ouvinte calcula as distâncias entre *beacons*. A plataforma móvel recolhe distâncias suficientes para que as distâncias entre *beacons* se traduzam em valores únicos, que permitam conhecer as localizações respetivas entre cada *beacon*. A Figura 4 ilustra uma unidade de *hardware Cricket* tanto para *beacon* como para ouvinte [5].

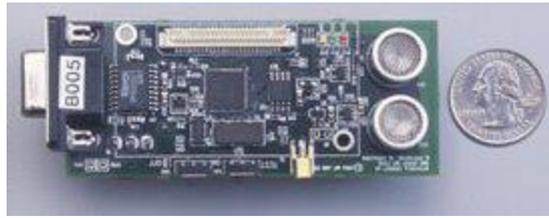


Figura 4. Unidade de *hardware Cricket* (*beacon* ou ouvinte) [5]

A estimativa da distância utiliza sinais acoplados RF e sinais ultrassônicos permitindo uma boa medição de distâncias entre *beacon*-ouvinte. Atendendo a que os ouvintes não transmitem ativamente mensagens, o desempenho do sistema é independente do número de ouvintes no ambiente. Como resultado, o sistema *Cricket* é versátil no que diz respeito ao número de utilizadores e objetos que necessitam de informação de localização.

Uma vez que os ouvintes só passivamente ouvem transmissões dos *beacons* para determinar a sua localização, um utilizador transportando um ouvinte não é rastreado pelo sistema de *Cricket*. Isto permite a localização do próprio utilizador sem conhecimento do sistema, não comprometendo dessa forma a privacidade do utilizador. Ao mesmo tempo, é possível desenvolver soluções de rastreamento de objetos que se movem rapidamente invertendo os papéis dos *beacons* e dos ouvintes [5].

2.2.5 Pinpoint

O *Pinpoint* é um sistema de rastreamento que permite a localização tanto de objetos móveis como de fixos, dentro de um determinado ambiente de trabalho. Uma região é dividida por um número de células em que cada célula possui um controlador no qual várias antenas RF estão ligadas. São utilizadas neste sistema *tags* RFID que estão associadas a vários dispositivos que são rastreados. O controlador de célula emite um sinal de rádio de dispersão que é transmitido através das antenas. Cada *tag*, depois de receber o sinal, responde com uma mensagem que contém o seu identificador único. Os sinais recebidos pelas diferentes antenas são enviados para o controlador. O controlador utiliza o tempo de voo (diferença entre o tempo de transmissão e de receção, com compensação de eventuais atrasos internos da *tag*) dos sinais RF a partir da *tag*, recebido de diferentes antenas, para calcular a distância da *tag* às antenas. Essa distância é utilizada para identificar a localização da *tag* com uma precisão de 3 m [4].

A Tabela 2 resume os diversos sistemas de localização dentro de edifícios pelas suas características.

Tabela 2 - Comparação das características de diversos sistemas de localização (adaptado de [4])

Sistema	RADAR	BAT	<i>Active Badge</i>	<i>Cricket</i>	<i>PinPoint</i>
Privacidade do utilizador	Possível, com utilizador computacional	Não	Não	Sim	Não
Descentralizado	Base de dados do sinal RF centralizada	Não	Não	Sim	Não
Heterogeneidade da rede	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Custo	Não tem componentes extras	Alto	Alto	Baixo	Alto
Facilidade de implantação	Mapeamento RF	Difícil: requer matriz de sensores	Difícil: requer matriz de sensores	Fácil	Difícil: requer matriz de sensores

2.3 Sistemas de localização baseados em som

Alguns autores têm investigado por soluções de localização baseadas na propagação do som no espaço, procurando saber onde se encontra a origem desse som. Utilizando dois microfones, à semelhança dos ouvidos humanos, a receção desse som convertido em sinal elétrico permite obter três tipos de condições utilizáveis para se poder calcular uma possível posição do emissor (diferença de tempo e de amplitude do sinal entre os microfones).

O Professor William Morris Hartmann [6] é autor de inúmeras publicações nesta área, tendo investigado a larga maioria dos fenómenos que sucedem na propagação do som tais como reflexões, ecos, efeito de *Franssen* entre outros. O processamento de sinal que é efetuado ao som recebido permite uma orientação espacial da sua origem, com a extrapolação da distância a que o mesmo foi originado [7] [8]. Alguns autores utilizaram esta mesma técnica tal como Lee et al [9] onde através de três microfones desfasados 120º colocados num robô móvel, permite a perceção do ângulo da origem do som por forma a que o robô se possa deslocar até este.

Utilizando múltiplos microfones e processamento de sinal, Jie Huang et al desenvolveu uma solução de localização de uma fonte de som através da análise de sinal a cada par de microfones. O processamento é local e exige um bom poder computacional para o funcionamento em tempo real de uma solução [10].

A localização de fontes de som precede a criação do próprio RADAR, onde a detecção de aviões era efetuada após a 1ª Guerra Mundial através de soluções acústicas, tal como ilustrado na Figura 5.

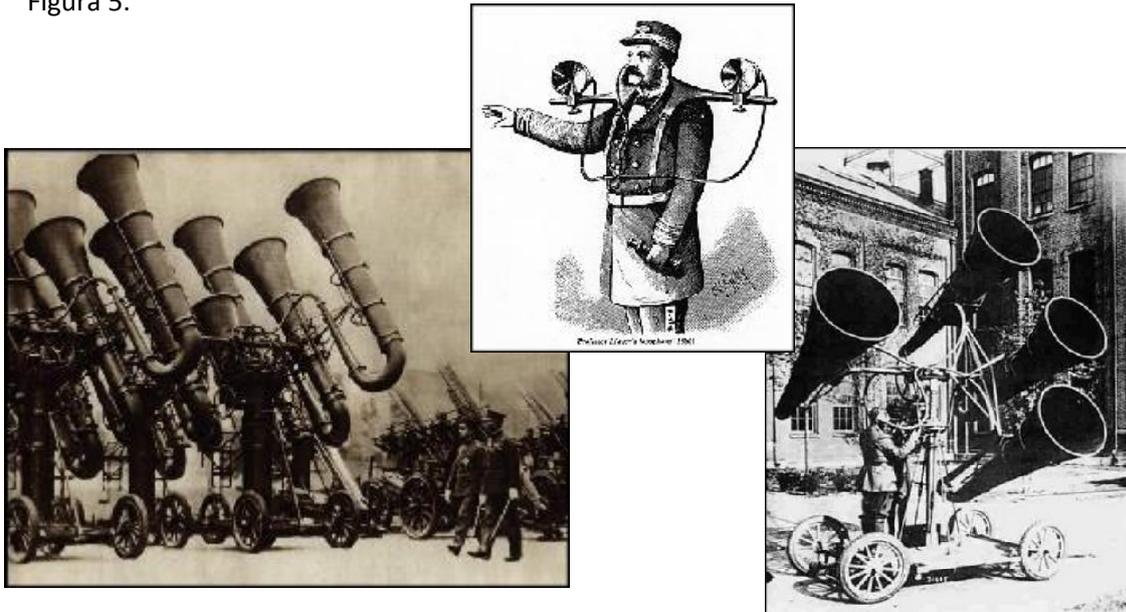


Figura 5. Soluções acústicas de localização de aviões após a 1ª Guerra Mundial (pré-surgimento do RADAR) [11]

O som como forma de localização de um objeto tem sido investigado pela comunidade científica, mas a necessidade de uma boa capacidade de processamento coloca este tipo de soluções num patamar mais elevado de custos.

3 Fundamentos teóricos

Neste capítulo serão apresentados alguns fundamentos teóricos em que os sistemas de localização em geral são baseados, servindo também de introdução a algumas bases teóricas utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

3.1 Triangulação

A triangulação é um dos processos mais antigos para a localização de um ponto e é baseado na medida de ângulos conhecidos em ambas as extremidades de uma linha de base estável, em vez de medir as distâncias diretamente ao ponto (trilateração). A Figura 6 ilustra o processo. O ponto pode ser fixado como o terceiro ponto de um triângulo com um lado conhecido (linha de base) e dois ângulos conhecidos.

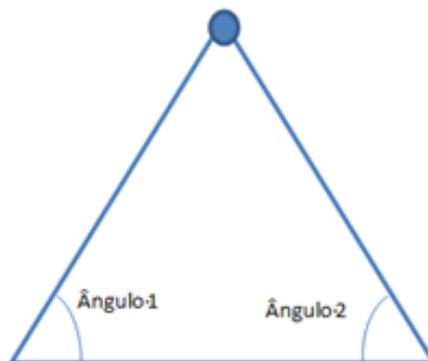


Figura 6. Triangulação

3.2 Trilateração

Por outro lado, a trilateração é um processo que determina localizações absolutas ou relativas de pontos por medição de distâncias, utilizando a geometria de círculos, esferas ou triângulos. Além do seu interesse como um problema geométrico, a trilateração tem aplicações práticas no levantamento e navegação, incluindo os sistemas de posicionamento global (GPS). Em contraste com a triangulação não envolve ângulos de medição. A Figura 7 ilustra o processo.

A abordagem da triangulação (Figura 6) consiste em medir o ângulo de incidência AOA (*Angle of Arrival* - ângulo de chegada) de pelo menos dois pontos de referência. A posição estimada corresponde ao ponto de intersecção das linhas definidas pelos ângulos.

Por outro lado, a trilateração (Figura 7) calcula a posição do alvo avaliando as suas distâncias a partir de pelo menos três pontos de referência.

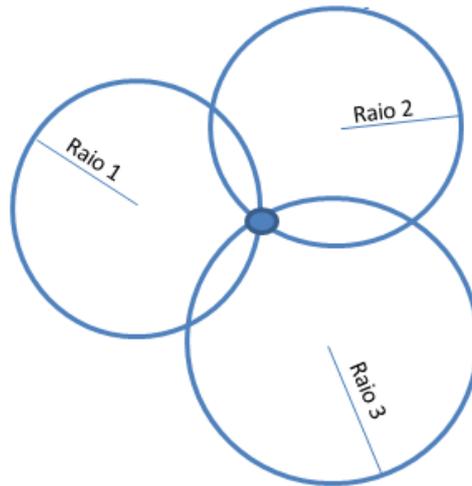


Figura 7. Trilateração

3.3 Técnicas de medição do alcance

As técnicas de medição do alcance atingido pelo sinal utilizam diferentes processos para se obter uma distância ou um ângulo, através do processamento de um sinal que se propaga no espaço e das suas características fundamentais. A lista seguinte apresenta algumas dessas técnicas utilizadas nos sistemas atuais:

RSS (*Received Signal Strength* – Força do Sinal Recebido): A atenuação da intensidade do sinal emitido é a função da distância entre o emissor e o recetor. O alvo pode assim ser localizado com, pelo menos, três pontos de referência das perdas de sinal correspondentes, devido à atenuação do sinal propagado no caminho [12].

TOA (*Time Of Arrival* – Tempo de Chegada): O tempo de propagação do sinal é proporcional à distância entre um ponto de referência e o alvo [12].

TDOA (*Time Difference Of Arrival*- Diferença de Tempo à Chegada): O princípio de TDOA está subjacente na ideia de determinar a posição relativa de um transmissor alvo pela diferença de tempo no qual o sinal é emitido e a sua chegada a múltiplos recetores. Três ou mais recetores permitem dois ou mais cálculos de TDOA fornecendo um ponto de interseção que é a posição estimada do alvo. Este método requer um tempo preciso entre os recetores [12].

RSP (*Received Signal Phase*- Fase do Sinal Recebido): O método de RSP (também designado por fase de Chegada- POA - *Phase Of Arrival*) utiliza o atraso expresso como uma fração do comprimento de onda do sinal, para estimar a distância. Requer transmissores colocados em localizações específicas e assume que emitem sinais sinusoidais puros [12].

Estas técnicas podem ser aplicadas a diferentes tipos de sinais, em qualquer frequência do espetro. De seguida, será efetuada uma introdução à propagação de sinais sonoros explicando o princípio de como as ondas de som são recebidas e interpretadas pelo ouvido humano. Este processo servirá como introdução ao processo utilizado no desenvolvimento do trabalho desta dissertação.

3.4 Propagação do som nos ouvidos

O som pode ser entendido como a propagação de uma frente de compressão mecânica ou onda longitudinal que se propaga apenas em meios materiais (sólidos, líquidos ou gases) cuja frequência no ouvido humano está compreendida entre os 20 Hz e os 20 000 Hz. O som não se propaga no vácuo, ou seja, não é possível perceber o som se não existir um meio material entre o corpo que vibra e o nosso ouvido.

Uma das principais ferramentas para quem trabalha com áudio é o ouvido humano (Figura 8) que é composto em três divisões:

- Ouvido externo
- Ouvido médio
- Ouvido interno

Cada parte do ouvido possui uma função específica para interpretar os sons. Quando chega um som aos ouvidos, o ouvido externo recebe-o e transporta-o pelo canal auditivo até ao ouvido médio. No ouvido médio ocorre a transformação da energia de uma onda sonora em vibrações internas da estrutura óssea do ouvido médio. Estas vibrações formam depois uma

onda de compressão no ouvido interno. O ouvido interno transforma depois a energia da onda de compressão dentro de um fluido em impulsos nervosos que podem ser transmitidos ao cérebro.



Figura 8. Ouvido humano [13]

O espectro sonoro (Figura 9) é o conjunto de frequências de vibração que podem ser produzidas por diferentes fontes sonoras. Este encontra-se dividido em três zonas distintas:

- Infrassons
- Sons audíveis
- Ultrassons

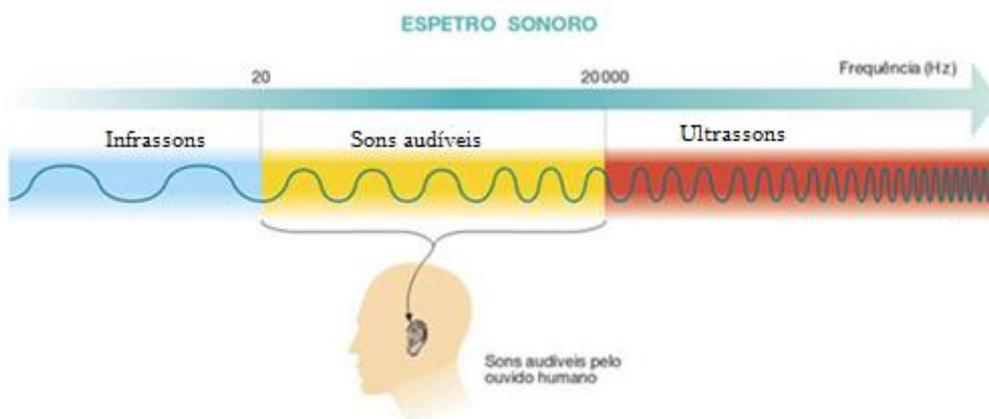


Figura 9. O espectro sonoro (adaptado de [14])

Os sons de frequência inferior a 20 Hz designam-se por infrassons. Estes sons embora não sejam captados pelo ouvido humano podem ser captados por outros animais. Estes infrassons são de grande utilidade na previsão de um sismo ou de uma erupção vulcânica, pois os movimentos da crosta terrestre produzem sons de frequência muito baixa que são registados por sismógrafos que podem alertar uma possível ocorrência de um sismo ou de uma erupção vulcânica.

Por outro lado, os sons audíveis são aqueles que o ser humano é capaz de ouvir. O ser humano apenas consegue captar vibrações com frequências incluídas entre os 20 Hz e os 20 000 Hz. Os sons de 20 Hz são os sons mais graves que os nossos ouvidos captam, opondo-se aos sons de 20 000 Hz que são os sons mais agudos que os nossos ouvidos captam.

Outro tipo de sons que também não é captado pelo ouvido humano são os sons de frequência superior a 20 000 Hz designado por ultrassons. Este tipo de sons é de grande utilidade por exemplo na medicina, na realização de ecografias, e na pesca para identificar cardumes de peixes [14]. É também utilizado, como demonstrado na revisão bibliográfica (capítulo 2), em alguns sistemas de localização.

3.4.1 ITD (*Interaural Time Difference*)

A diferença de tempo entre os ouvidos (*Interaural Time Difference*) é a diferença do tempo de chegada de um som entre os dois ouvidos. Este conceito é importante no contexto desta dissertação, pois permite localizar o som a partir da fonte do sinal fornecido para a direção ou ângulo da fonte do som a partir da cabeça.

Se um sinal chega a um lado da cabeça, o sinal tem maior tempo de viagem para alcançar o ouvido mais distante do que o ouvido mais próximo. A diferença entre o comprimento do caminho percorrido resulta numa diferença de tempo entre o som que chega aos ouvidos que é detetado, e auxilia no processo de identificação da direção da fonte sonora [15].

A Figura 10 exemplifica este processo. Como se pode observar, se um som for enviado perfeitamente alinhado com o centro da cabeça, chegará a ambos ouvidos sem qualquer desfasamento de tempo (sinais com linha cinzenta no centro da figura). Se o início da sua propagação for do lado esquerdo da cabeça, o sinal chegará primeiro ao ouvido esquerdo e só depois ao direito (sinais com linha azul no lado esquerdo da figura). No inverso, o sinal chegará primeiro ao ouvido direito (sinais com linha vermelha no lado direito da figura). Este

desfasamento é tanto maior quanto mais à esquerda ou mais à direita o sinal tiver a sua origem. O ângulo resultante da fonte de sinal terá a sua origem no centro da cabeça e rodará para a origem do sinal.

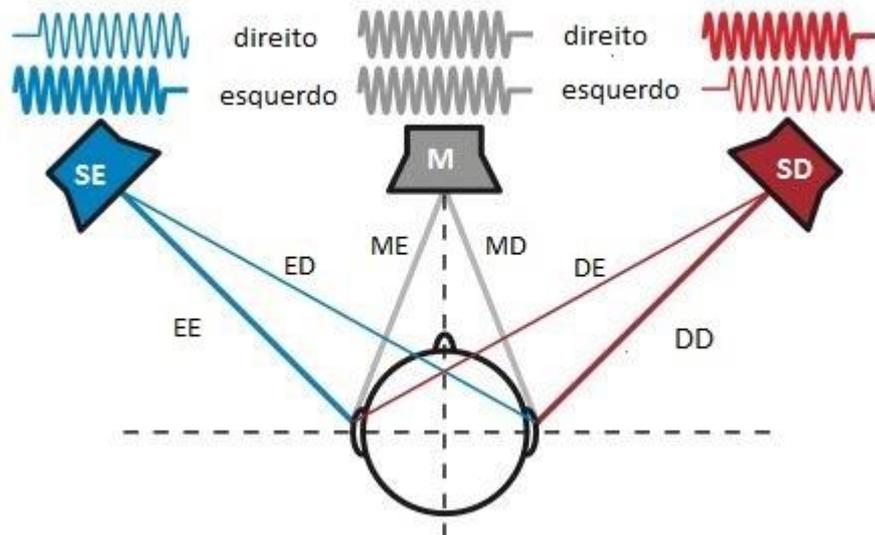


Figura 10. Diferença de tempo entre os ouvidos (ITD) e diferença de nível entre os mesmos (DPI) (adaptado de [16])

Existem vários métodos para a obtenção da origem de um som, mas o utilizado neste trabalho de dissertação foi baseado na diferença de tempo à chegada (TDOA). Um exemplo bem conhecido deste método é a diferença de tempo entre ouvidos descrito anteriormente. Esta diferença de tempo é dada pela seguinte expressão [15]:

$$\Delta t = \frac{x \cdot \text{seno } \theta}{c} \quad (1)$$

em que:

Δt corresponde à diferença de tempo em segundos

x é a distância entre os dois sensores (ouvidos) em metros

θ define o ângulo entre a linha de base dos sensores (ouvidos) e o som incidente, em graus

c é a velocidade do som no meio circundante dos sensores e da fonte, neste caso de 340 m/s

Tal como irá ser apresentado de seguida, foi baseado neste princípio que todo o sistema foi desenhado, concebido e desenvolvido. De seguida será apresentada a arquitetura do sistema, bem como a descrição do *hardware* e *software* desenvolvidos.

4 Arquitetura do sistema

Neste capítulo será apresentada a arquitetura desenvolvida para a implementação de uma solução de *hardware/software* que permita atingir os objetivos propostos.

4.1 Introdução

A arquitetura escolhida baseia-se na solução auditiva humana, tal como referida no capítulo dos fundamentos teóricos. Cada sensor ou sistema auditivo simboliza um ouvido humano. Dois ouvidos serão então dois sistemas auditivos adjacentes. Para tal, num espaço amplo e fechado (Laboratório de Robótica Móvel e Autónoma da Universidade do Minho), foi escolhida a implementação de quatro destes sistemas auditivos, sendo que a cada par de sensores adjacentes, um deles repete-se e é utilizado no sistema seguinte. Dessa forma, ao invés de serem utilizados oito sensores, apenas quatro foram necessários, tal como indicado na Figura 11. Na mesma figura, também se pode observar a disposição dos sensores utilizados. O objetivo do sistema desenvolvido foi o de obter a localização em coordenadas cartesianas do som do dispositivo passivo de clique (valores de X e de Y na Figura 11).

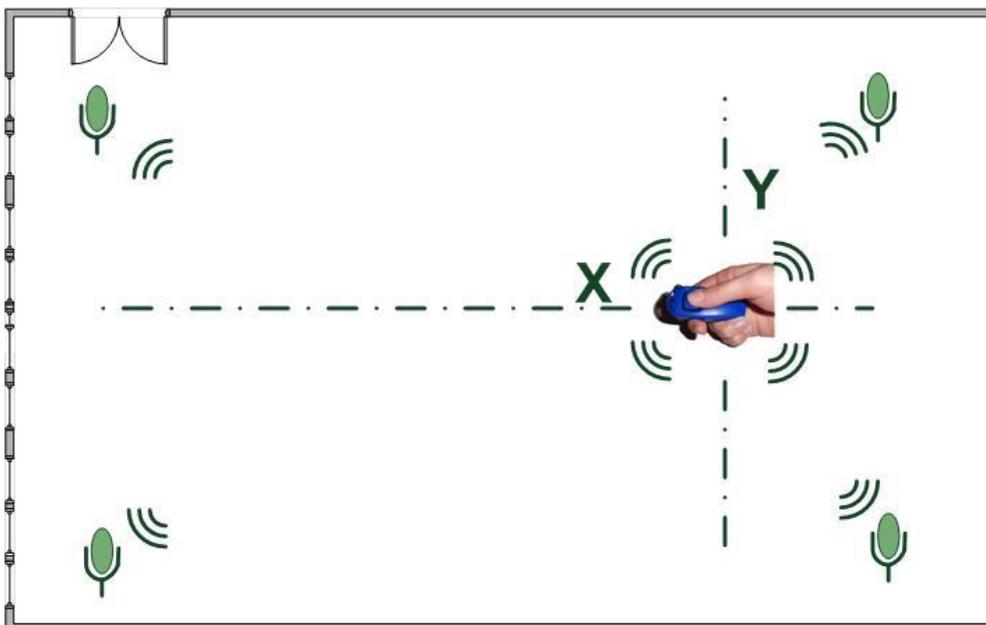


Figura 11. Propagação do som em direção aos quatro sensores e respetiva disposição dos sensores no laboratório

Baseado na equação (1), pode-se dizer que existe uma reta que passa no ponto intermédio entre cada dois sensores adjacentes (quadrados preenchidos no início dos segmentos da Figura 12) e no meio da fonte de som (Clique), tal como representado pelos segmentos tracejados da Figura 12. Estas retas são obtidas pelo cálculo da diferença de tempo de chegada do som aos diversos sensores (Δt na equação (1)). A interseção entre as retas obtidas define o ponto procurado.

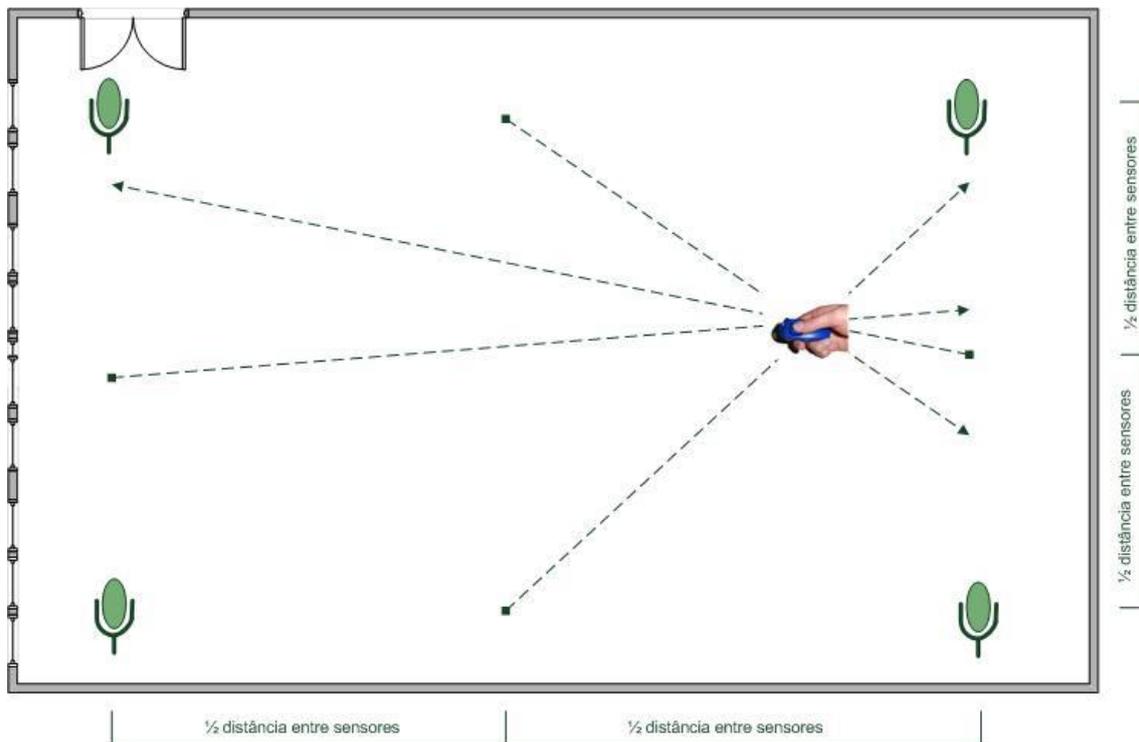


Figura 12. Retas obtidas pelo cálculo da diferença de tempo de chegada do som aos diversos sensores

A expressão que retorna o ângulo baseada na equação (1) é dada pela equação (2). O ângulo resultante encontra-se ilustrado na Figura 13.

$$\theta = \text{arco seno} \left(\frac{\Delta t c}{x} \right) \quad (2)$$

Em que:

θ define o ângulo entre a linha de base dos sensores (ouvidos) e o som incidente, em graus

Δt é a diferença da leitura do relógio (*timestamp*) de um par de sensores adjacentes

c é a velocidade do som

x é a distância entre os sensores

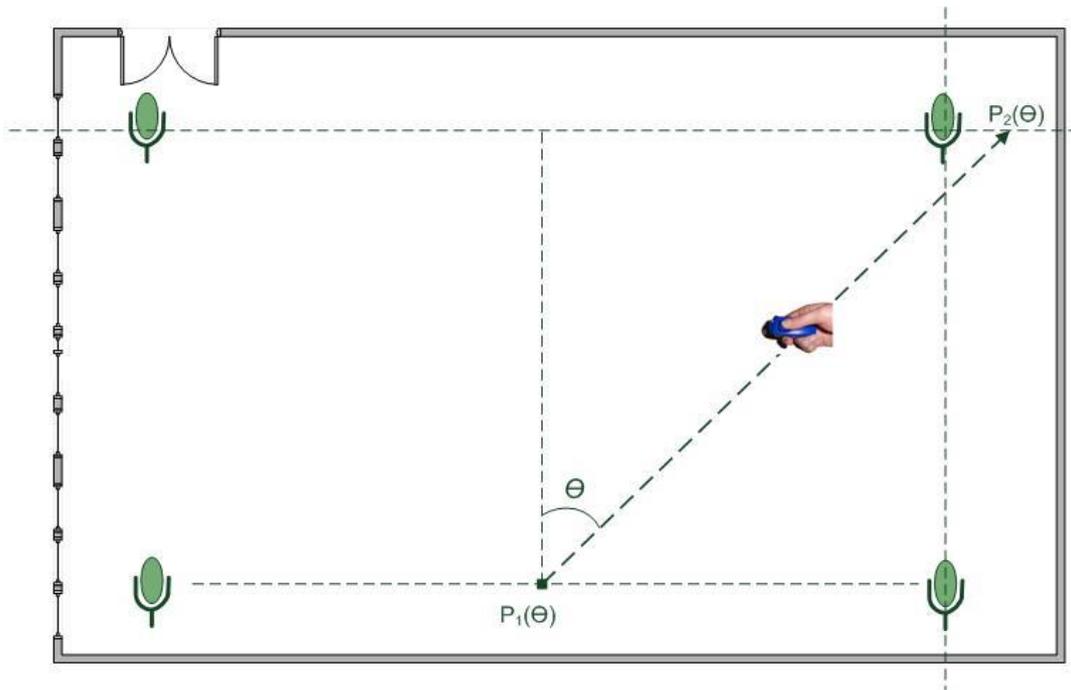


Figura 13. Ângulo θ resultante do cálculo da equação (2) entre dois sensores auditivos

Após a determinação do ângulo, calcula-se um segundo ponto que intersesta o eixo paralelo que passa nos sensores opostos. Na Figura 13 estão representados ambos os pontos. Este cálculo do segundo ponto é efetuado através da tangente do ângulo multiplicado pela distância entre eixos paralelos. Esta operação é efetuada em todos os quatro ângulos calculados nos diversos pares de sensores. Após obter o segundo ponto, procedeu-se ao cálculo da interseção de cada duas retas pelo método do cálculo do determinante tal como indicado pela Figura 14 e pela Equação (3).

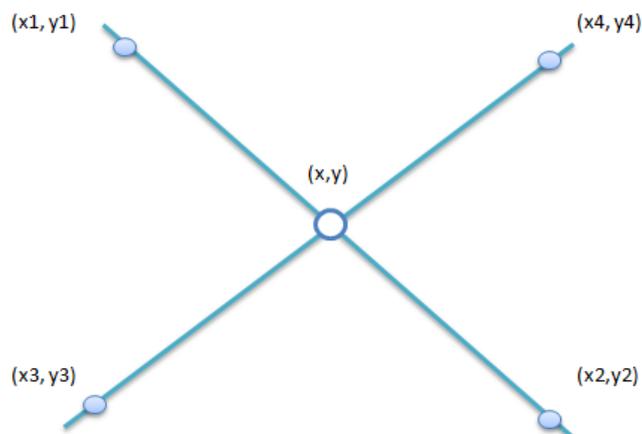


Figura 14. Interseção entre linhas

Considerando a interseção entre a reta que passa entre os pontos (x_1, y_1) e (x_2, y_2) , com a reta que passa pelos pontos (x_3, y_3) e (x_4, y_4) a interseção entre ambas (P_x, P_y) é dada pela equação (3) [17]:

$$(P_x, P_y) = \left(\frac{(x_1y_2 - y_1x_2)(x_3 - x_4) - (x_1 - x_2)(x_3y_4 - y_3x_4)}{(x_1 - x_2)(y_3 - y_4) - (y_1 - y_2)(x_3 - x_4)}, \frac{(x_1y_2 - y_1x_2)(y_3 - y_4) - (y_1 - y_2)(x_3y_4 - y_3x_4)}{(x_1 - x_2)(y_3 - y_4) - (y_1 - y_2)(x_3 - x_4)} \right) \quad (3)$$

Após o cálculo do determinante dos diversos pontos, obtém-se quatro pontos possíveis de interseção formados por cada par de sensores. Só um destes pontos será o eleito como o ponto final da localização do dispositivo de clique. Para tal, esse ponto foi escolhido com base experimental onde se verificou que o ponto obtido pela interseção das retas opostas (formadas pelo sensor adjacente e opostos) era o ponto com menor erro (ver exemplo na Figura 15). Esse assunto será abordado no capítulo 6 (Resultados obtidos).

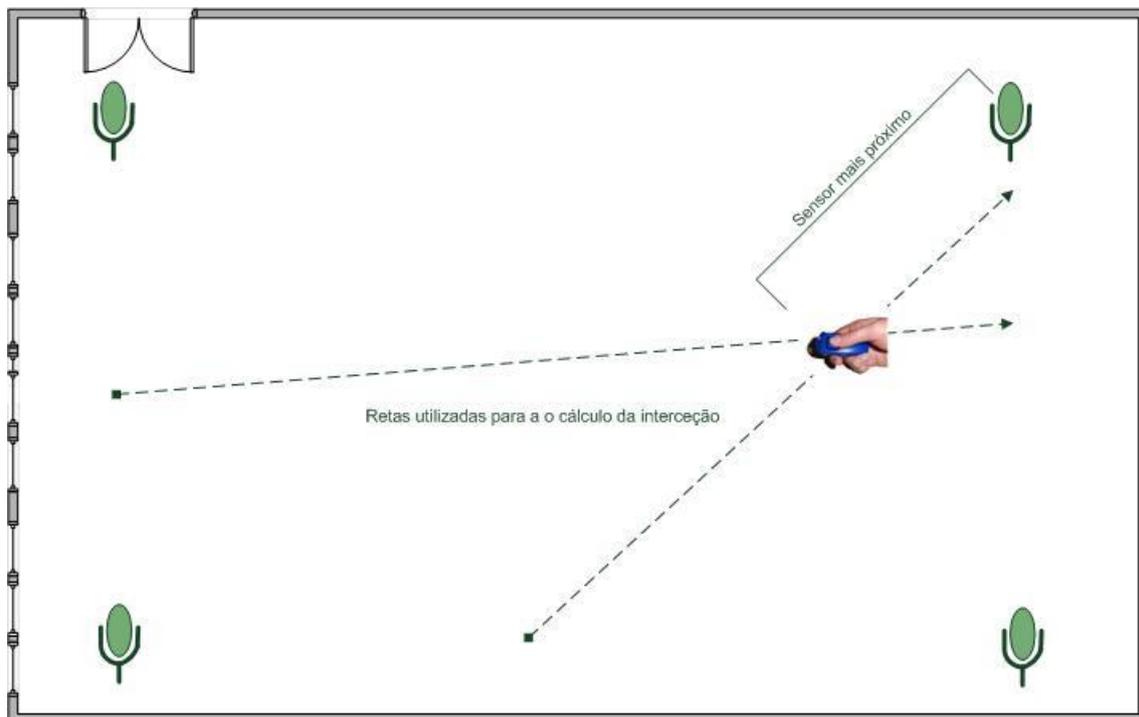


Figura 15. Exemplo de escolha do ponto baseado na interseção das retas opostas

Nesta introdução, pretendeu-se dar a conhecer a arquitetura do sistema desenvolvido e os fundamentos teóricos que foram utilizados para o princípio de funcionamento do sistema. De seguida irão ser apresentados os diversos sistemas desenvolvidos, tanto na componente de *hardware* como na componente de *software*.

4.2 Implementação prática

Por forma a implementar a arquitetura definida, foi necessário escolher os diversos sistemas a implementar/desenvolver e identificar as melhores soluções e plataformas que pudessem satisfazer os requisitos. A Figura 16 demonstra a arquitetura do sistema físico desenvolvido onde se encontram o conjunto de quatro sensores dispostos ao longo da sala e a unidade de controlo que está interligada a esses sensores. A ligação entre os sensores e a unidade de controlo foi estabelecida recorrendo ao cabo normalmente utilizado nas redes *Ethernet* (UTP cat.5 com fichas RJ45), pois sendo uma ligação padronizada, é um cabo de utilização flexível e versátil, não necessitando de se criar um cabo com especificações próprias. Por isso, satisfaz as necessidades do sistema. O cabo leva a alimentação para cada um dos recetores (TTL) trazendo de volta o sinal no seu endereço respetivo. Como este cabo possui 8 condutores, 2 são utilizados para alimentação podendo dessa forma serem instalados até 6 recetores. A distância entre os sensores utilizada no sistema desenvolvido foi de 7,1 m em comprimento e 5,2 m em largura, colocados a 2,4 m de altura do chão. A unidade de controlo está ligada a um computador portátil através de um cabo USB (*Universal Serial Bus*).

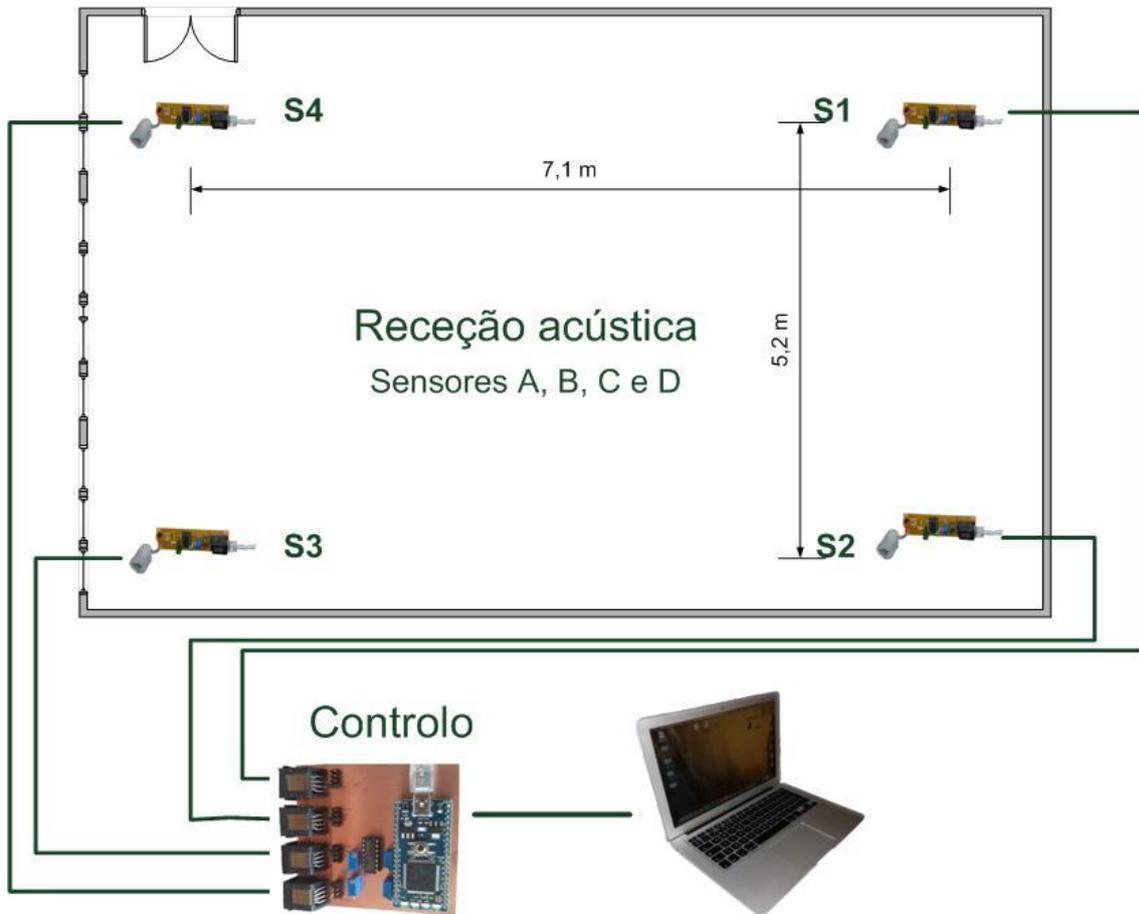


Figura 16. Arquitetura do sistema físico implementado

4.3 Hardware desenvolvido

O *hardware* desenvolvido está dividido em dois sistemas sendo o primeiro de **recepção acústica** onde o sinal recebido por um microfone de eletreto é tratado, gerando impulsos à sua saída que são enviados para a unidade de controlo. O segundo sistema é a **unidade de controlo** baseada na plataforma aberta MBED em linguagem C++. De seguida serão explicados os dois sistemas desenvolvidos.

4.3.1 Recepção acústica

A recepção acústica é responsável pela recepção e tratamento do sinal acústico (clique) utilizando apenas eletrónica analógica. O sinal acústico é recebido no dispositivo através de um microfone de eletreto, que o converte em sinais elétricos na ordem dos milivolts de amplitude. É por isso necessário uma pré-amplificação desse sinal para aumentar a sua amplitude para as etapas seguinte. A Figura 17 mostra o sinal recebido após a pré-

amplificação. Na figura são visíveis dois cliques seguidos, em que o primeiro é o clique quando se pressiona o botão do dispositivo de clique e o segundo é quando se liberta o botão. Neste segundo caso gera um clique ligeiramente diferente do primeiro. Neste documento, este segundo clique irá ser chamado de “claque” por motivos de diferenciação com o primeiro.

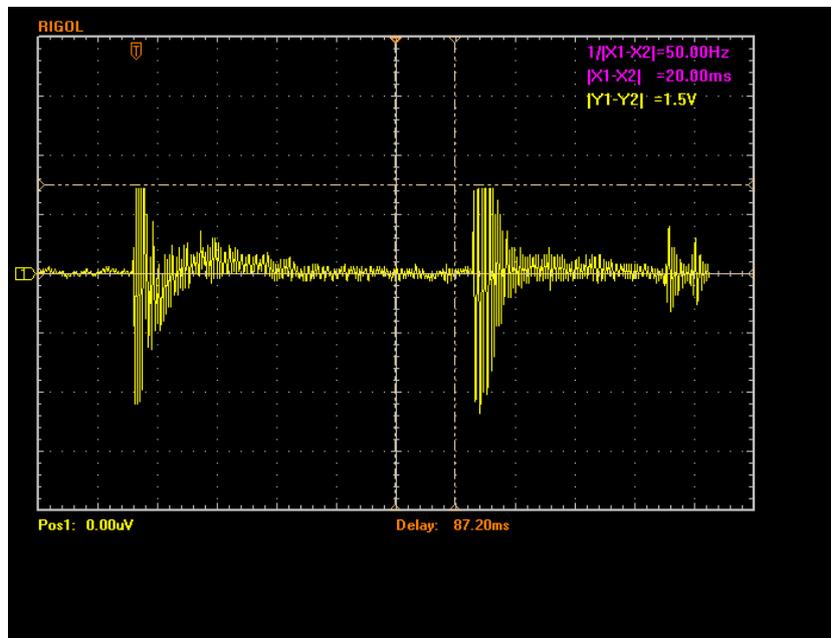


Figura 17. Sinal do clique adquirido no osciloscópio digital (20 ms/div., 1 V/div.)

De acordo com as medições efetuadas, o sinal do clique tem uma frequência dominante centrada nos 5 kHz (+/- 500 Hz), tal como se pode observar na Figura 18 onde este sinal foi obtido à saída da primeira etapa de amplificação. Este sinal revelou-se muito consistente nos inúmeros testes efetuados.

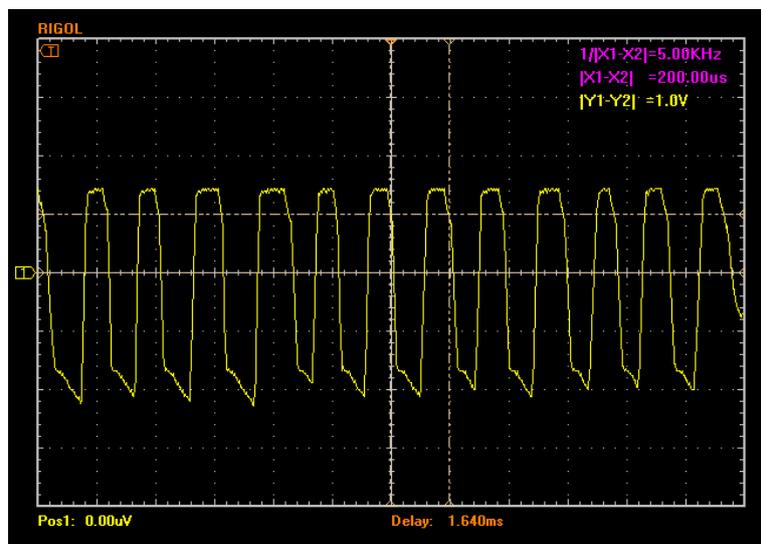


Figura 18. Sinal do clique em maior detalhe (200 μ s/div., 1 V/div.)

Na Figura 19 encontram-se esquematizados os blocos constituintes desta unidade de recepção acústica. Após a pré-amplificação referida, onde o sinal já se encontra com níveis de amplitude desejáveis, é efetuada uma filtragem do sinal através de um filtro passa-alto de 2ª ordem, sintonizado para os 5 kHz. Dessa forma, pretende-se filtrar os sinais de frequências mais baixas, onde se situam a maioria dos sons no espaço (vozes, ruído de fundo, etc.).

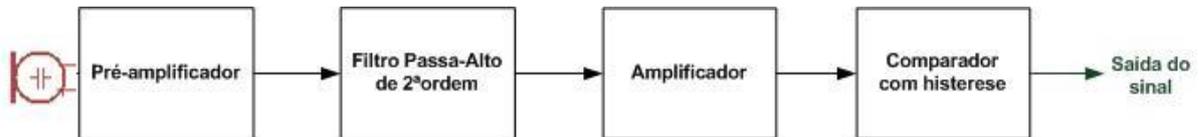


Figura 19. Diagrama de blocos da recepção acústica

Após a aplicação do filtro, o sinal reduz a sua amplitude sendo necessário a sua amplificação para níveis de saída TTL. O comparador com histerese é o último bloco e é responsável por colocar na saída apenas os sinais provenientes do amplificador cuja amplitude esteja acima de uma tensão mínima pré-definida. O seu valor de comparação ou de histerese é ajustável e é calibrado após a construção do dispositivo. Uma vez calibrado, o sinal de saída que é transmitido à unidade de controlo é constituído apenas por impulsos resultantes de um sinal acústico capturado de frequência superior a 5 kHz.

Na Figura 20 estão representados os sinais de saída dos quatro sensores de recepção acústica desenvolvidos e instalados no laboratório utilizado para experimentação. Na mesma figura pode-se verificar o desfaseamento do sinal recebido após um clique. Este assunto será abordado em mais pormenor na discussão dos resultados obtidos (Capítulo 6).

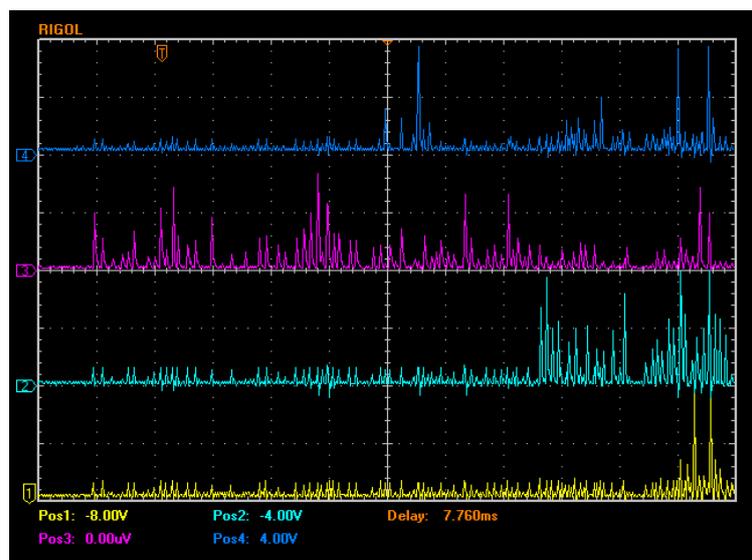


Figura 20. Sinal de saída nos quatro sensores de recepção acústica (20 ms/div., 1 V/div.)

O esquema elétrico do circuito de recepção acústica encontra-se apresentado na Figura 21. Para otimização do circuito, utilizou-se um circuito integrado da *Texas Instruments*® (LM324) [18], que possui 4 amplificadores operacionais, e desta forma cada amplificador perfaz um bloco do diagrama definido. Apenas foi necessária a adição de alguns componentes passivos (resistências, condensadores e bobina) para o desenvolvimento do circuito completo. No lado direito do circuito encontra-se o seletor de identificação do módulo sensor por *jumper* e o respetivo conector RJ45. A alimentação do circuito é de +5V em corrente contínua.

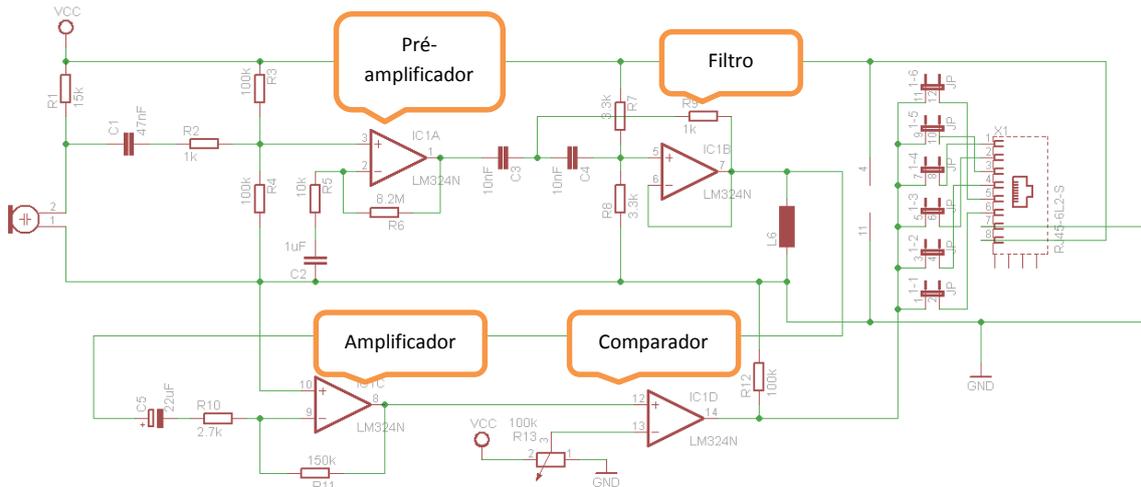


Figura 21. Esquema elétrico do circuito de recepção acústica

A Figura 22 ilustra a placa de circuito impresso desenvolvida para o sensor de recepção acústica. Quatro circuitos idênticos foram criados, configurados e instalados no teto do laboratório na disposição enunciada anteriormente.



Figura 22. Imagem de um dos sensores desenvolvidos

4.3.2 Unidade de controlo

A unidade de controlo recebe os sinais dos sensores e calcula a posição do emissor de clique, baseado no desfasamento de tempo entre a receção dos vários sinais. A unidade desenvolvida foi baseada na plataforma aberta MBED com um microcontrolador (mbed NXP LPC1768) (Figura 23).

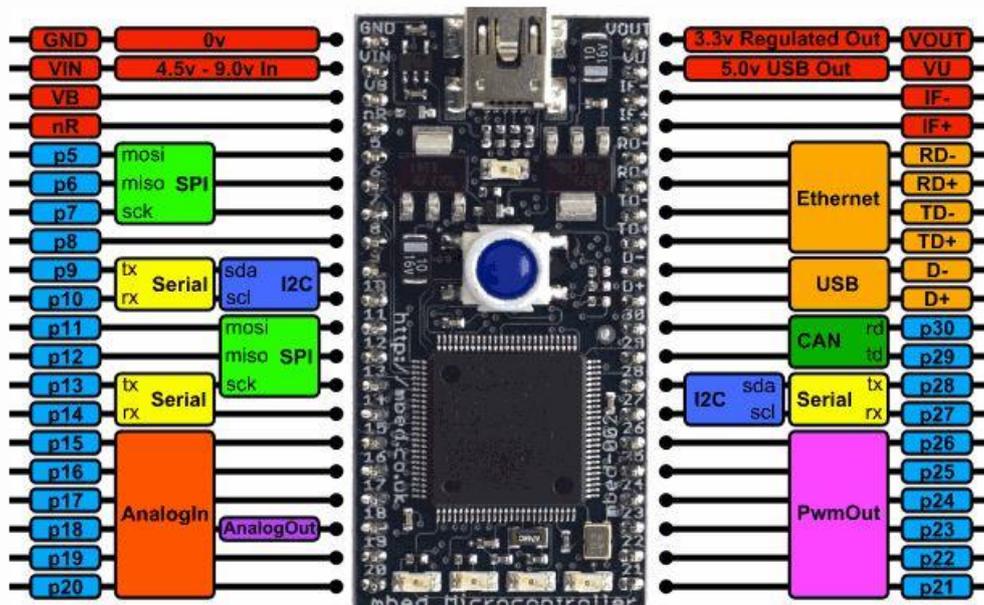


Figura 23. Visão geral do microcontrolador [19]

O microcontrolador utilizado pela plataforma MBED apresenta as seguintes características:

- Alta performance ARM® Cortex™-M3 Core
- 96MHz, 32KB RAM, 512KB FLASH
- *Ethernet*, USB Host/Device, 2xSPI, 2xI2C, 3xUART, CAN, 6xPWM, 6xADC, GPIO [19]

Dentro das inúmeras soluções existentes no mercado na área dos microcontroladores com plataforma de desenvolvimento, incluindo a família Arduino® [20], pensou-se que esta solução oferecia uma capacidade de processamento necessária e suficiente para os objetivos do projeto, bem como uma vasta lista de barramentos de comunicação de dados que permitirá uma fácil expansão deste projeto no futuro.

Para receber os sinais dos recetores acústicos, foi necessário desenvolver uma placa de circuito impresso que fizesse o interface dos sensores (conectores RJ45) e a plataforma MBED. Um primeiro protótipo foi desenvolvido e testado, mas com a evolução dos testes efetuados, percebeu-se que havia a necessidade de incorporar um circuito comparador com histerese à

chegada do sinal dos sensores e dessa forma, desenvolveu-se um segundo protótipo. Nos subcapítulos seguintes serão apresentados ambos os protótipos desenvolvidos.

4.3.3 Primeiro Protótipo

Neste primeiro protótipo, o interface entre os sinais dos sensores de recepção acústica e a plataforma MBED era direta, i.e., cada linha do sinal de chegada correspondia uma porta digital de entrada do microcontrolador. Por forma a poder ser um módulo expansível para desenvolvimentos futuros na área do processamento de sinal, a cada linha do sinal de chegada também se fez corresponder a uma entrada analógica do microcontrolador. O esquema elétrico do primeiro protótipo encontra-se apresentado na Figura 24.

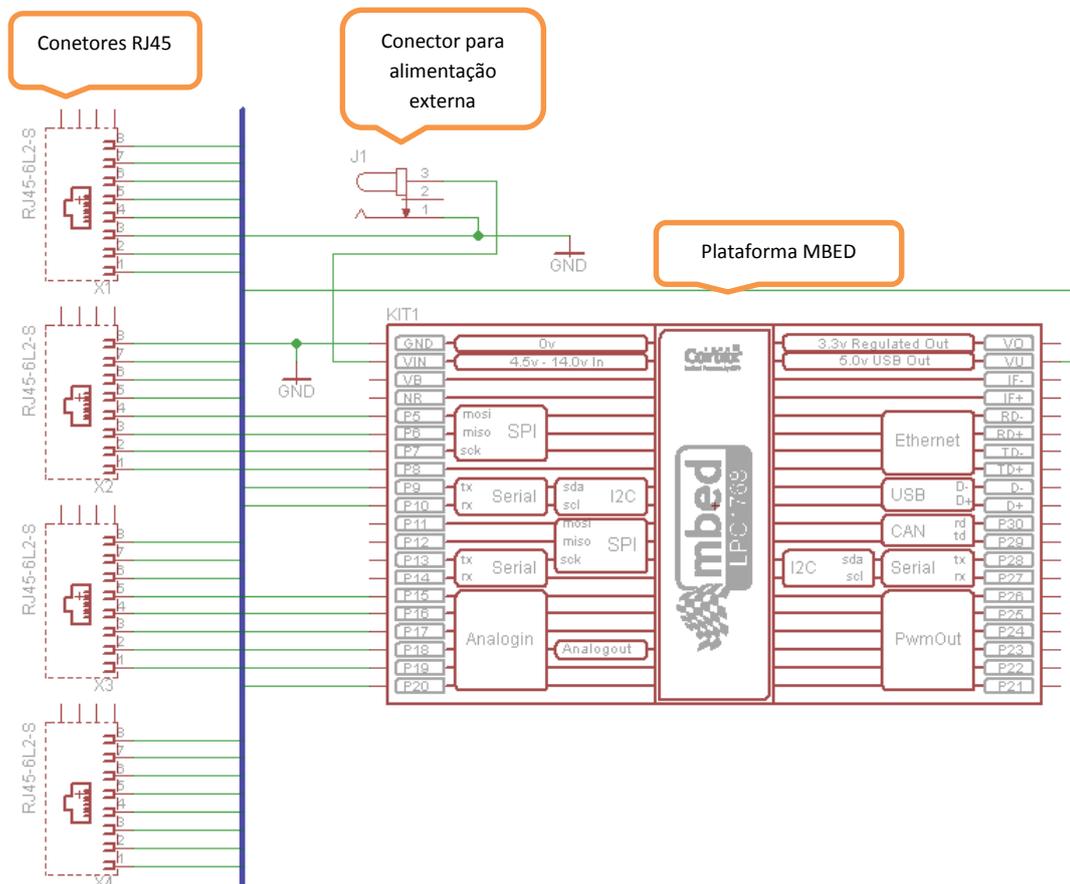


Figura 24. Esquema elétrico do primeiro protótipo

Na Figura 25 é apresentada a placa de circuito impresso de dupla face desenvolvida para este protótipo, onde se pode observar os conetores RJ45 no lado esquerdo da placa para o

interface com os sensores e o módulo azul da plataforma de desenvolvimento MBED. No entanto, apenas se visualiza os furos para o conector de alimentação externa. Este nunca foi instalado por não ter sido necessário a alimentação externa, sendo apenas utilizada a alimentação providenciada pela porta USB do computador portátil ligada à plataforma MBED.



Figura 25. Primeiro protótipo com solução MBED

Inúmeros testes foram realizados com este protótipo, onde foi detetado alguns fenómenos de inconsistência nos resultados obtidos. Uma análise ao sinal de chegada dos sensores identificou algumas limitações na solução desenvolvida tal como descritas seguidamente.

4.3.3.1 Limitações encontradas

De acordo com a Figura 26, os quatro sinais de entrada foram medidos através de um osciloscópio digital, e tal como se pode observar, os impulsos gerados pelos sensores chegam ao microcontrolador com amplitudes diferentes. Na figura, a numeração dos sensores é vista de baixo para cima (Sensor 1 é o 1º sinal de baixo com a linha de cor amarela e o Sensor 4 é o sinal de cima com a linha de cor azul).

Nas entradas digitais do microcontrolador, este considera uma entrada alta (valor lógico 1) a uma tensão de entrada de valor igual ou superior a 2 V, de acordo com o fabricante. Como em certos casos os impulsos são menores do que essa tensão, perde-se o pulso correto que identifica a distância percorrida. Na Figura 26 é demonstrada essa situação. O 1º impulso está ligeiramente abaixo dos 2 V (seta vermelha da esquerda) enquanto o impulso seguinte (seta vermelha da direita) está ligeiramente acima dos 2 V. Dessa forma, o microcontrolador só identificou uma entrada alta de valor lógico 1 no 2º impulso. Esta diferença na deteção do

impulso correto produz no sistema um erro de distância que no caso evidenciado foi de 77 cm (2,28 ms). Noutros casos detetados, a diferença conseguiu chegar a valores superiores a este.

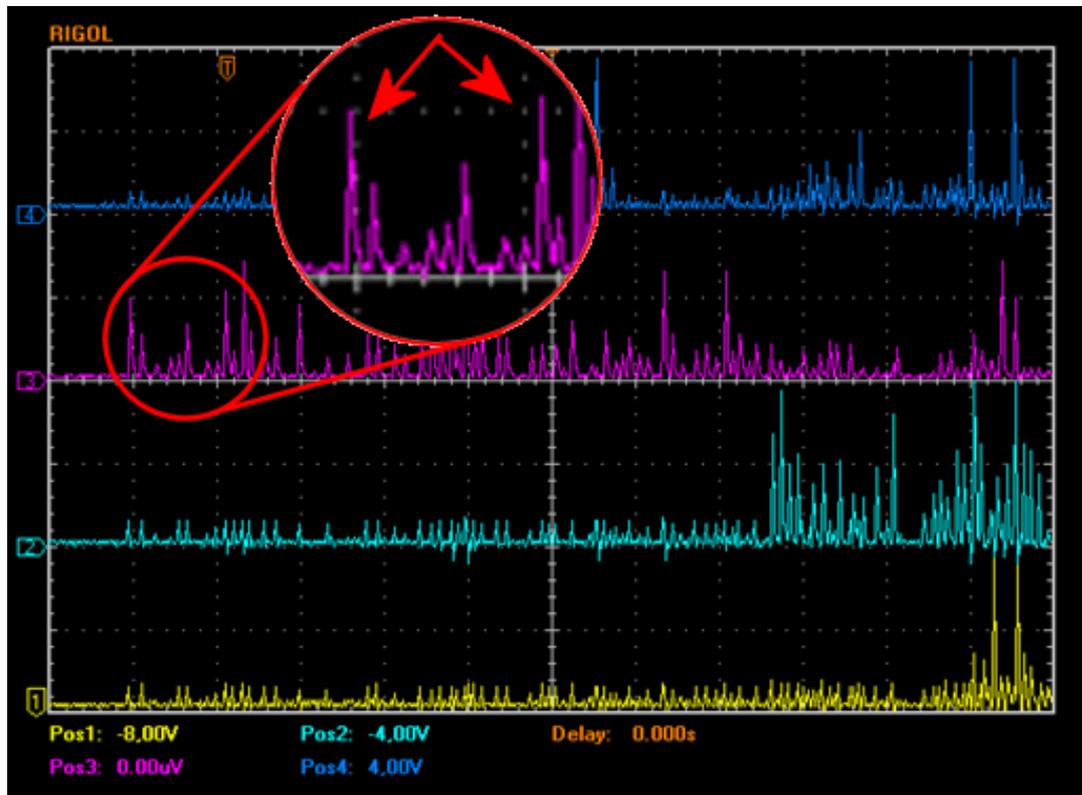


Figura 26. Sinais medidos pelo osciloscópio dos 4 recetores acústicos à entrada da unidade de controlo (20 ms/div., 1 V/div.)

Outra limitação detetada neste 1º protótipo, e também patente na Figura 26, é a influência de um sinal nos sinais adjacentes. Por outras palavras, é visível na figura no sensor 1, sensor 2 e sensor 4 pequenos impulsos ao longo dos sinais, onde estes não na realidade não existem. Uma análise mais cuidada permitiu verificar que estes impulsos são coincidentes com os impulsos de outros sensores. No caso da Figura 26, esses pequenos impulsos nos outros sensores coincidem com impulsos do sensor 3. Pensou-se que este fator seja baseado num erro de desenho pois os sinais dos sensores vizinhos são enviados pelo cabo aos diversos dispositivos de receção acústica. Por outras palavras, as ligações físicas são comuns o que faz com que os sinais se misturem nos diversos cabos provocando este fenómeno de indução e respetiva interferência eletromagnética. O 2º protótipo desenvolvido entrou em consideração com este problema e foi resolvido tal como será apresentado seguidamente.

4.3.4 Segundo Protótipo

Tal como fora explicado anteriormente, com este segundo protótipo pretendeu-se resolver as duas limitações encontradas no protótipo anterior:

- Amplitude do sinal de chegada ser insuficiente para a deteção do impulso como nível lógico 1
- A influência dos impulsos de um sensor nos outros sensores

A Figura 27 ilustra o esquema elétrico desenvolvido neste segundo protótipo. No esquema é visível o acréscimo de *jumpers* de identificação à entrada, evitando que o sinal de um sensor se propague para os outros sensores, bem como o acréscimo dos comparadores com histerese, que permitem uma normalização do sinal de entrada.

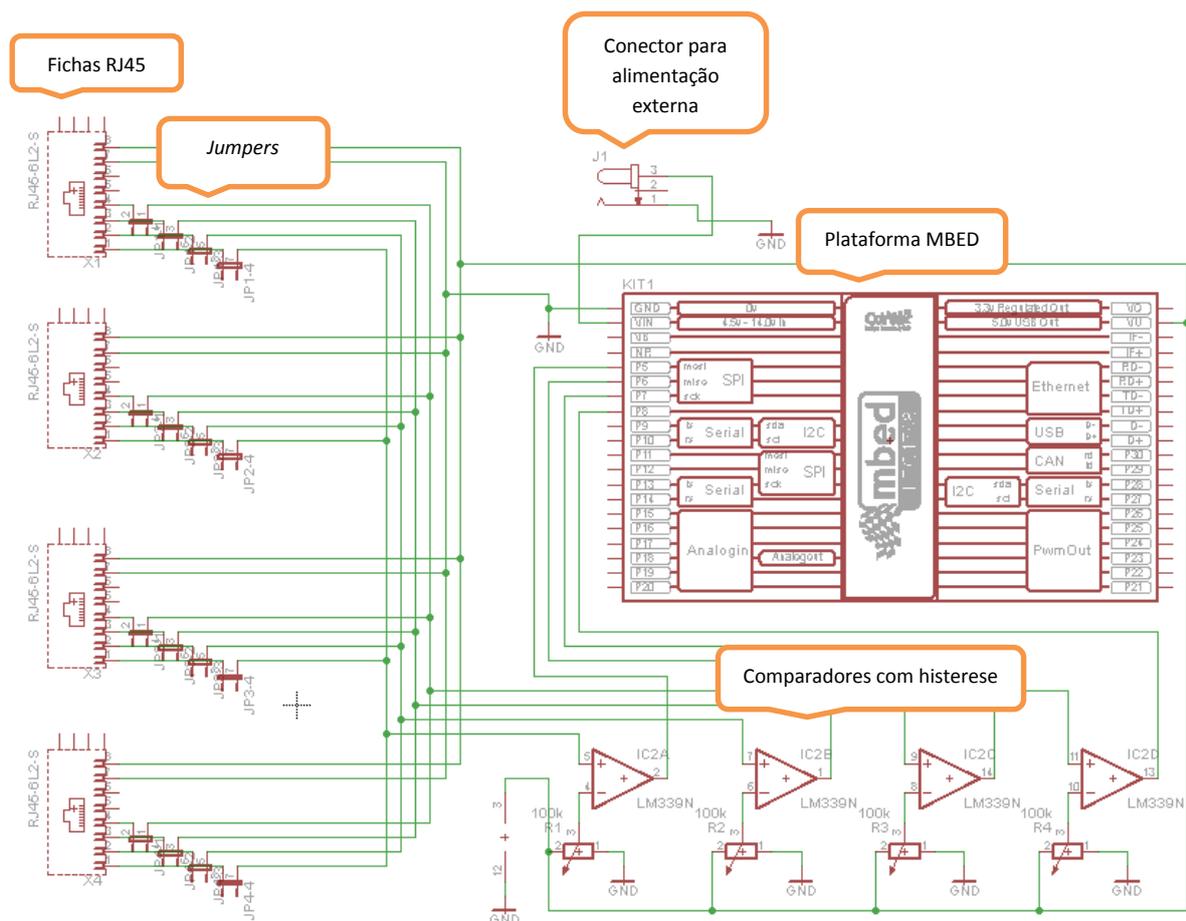


Figura 27. Esquema elétrico do segundo protótipo

A Figura 28 ilustra a placa de circuito impresso desenvolvida para o segundo protótipo.

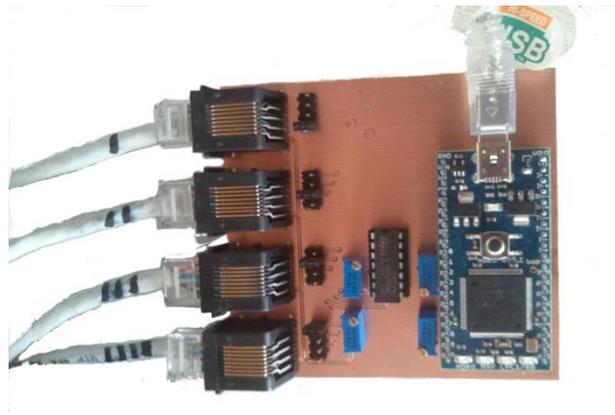


Figura 28. Segundo protótipo desenvolvido

Após serem efetuados os primeiros testes, verificou-se que esta nova abordagem tinha de facto melhorado consideravelmente as duas limitações encontradas. A Figura 29 ilustra os sinais adquiridos pelos sensores, após os comparadores com histerese colocados antes das entradas digitais do microcontrolador. Como é possível observar, foi largamente reduzido ou praticamente anulado os efeitos de pulsos de valor inferior ao nível lógico 1 do microcontrolador, bem como anulado o efeito parasita provocado pela indução dos impulsos vizinhos.

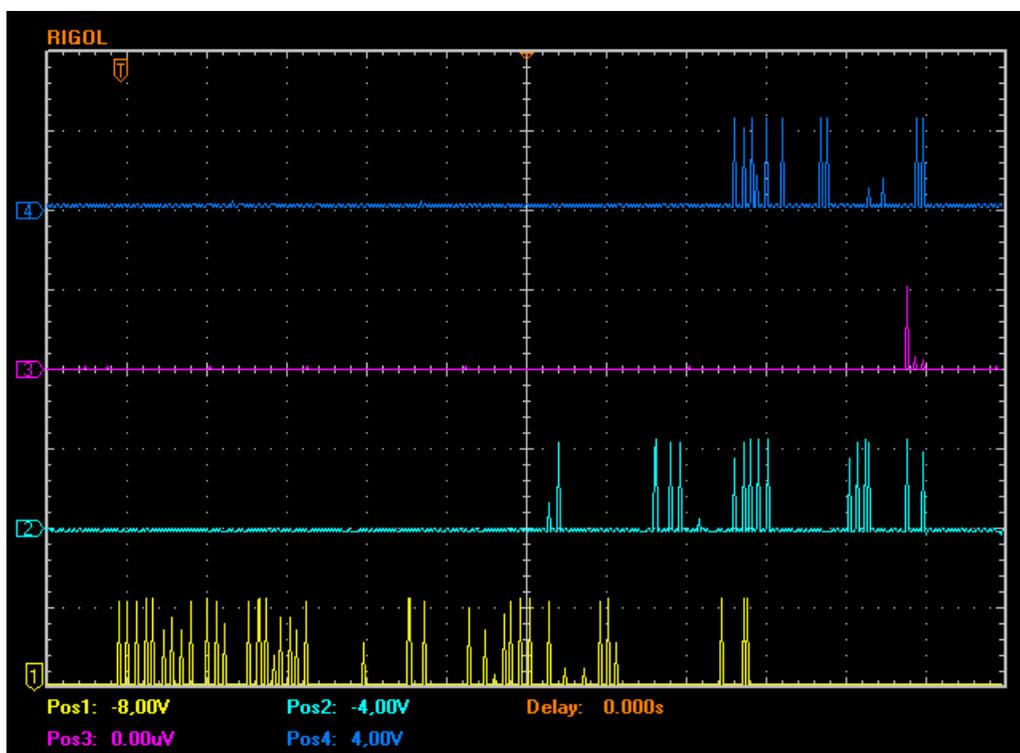


Figura 29. Sinais medidos nas entradas digitais da plataforma (20 ms/div., 1 V/div.)

Os sinais capturados e mostrados na Figura 29 foram processados pelo microcontrolador e encontram-se descritos na Tabela 3 como comparação com os valores lidos do osciloscópio.

Tabela 3 - Comparação de valores lidos do osciloscópio com os valores obtidos do microcontrolador

Valores lidos do osciloscópio			
$ T_1-T_2 $ (ms)	$ T_2-T_3 $ (ms)	$ T_3-T_4 $ (ms)	$ T_4-T_1 $ (ms)
11,00	8,68	4,28	15,40
Valores obtidos pelo microcontrolador (<i>timestamp</i>)			
T_1 (μ s)	T_2 (μ s)	T_3 (μ s)	T_4 (μ s)
10183099	10194086	10202780	10198483
Subtrações dos valores obtidos pelo microcontrolador (<i>timestamp</i>)			
$ T_1-T_2 $	$ T_2-T_3 $	$ T_3-T_4 $	$ T_4-T_1 $
10987 μ s	8694 μ s	4297 μ s	15384 μ s
10,99 ms	8,69 ms	4,30 ms	15,38 ms

Como se pode observar na Tabela 3, a diferença entre os valores obtidos pela leitura, a diferença dos impulsos visíveis no osciloscópio e os sinais recebidos e processados pelo microcontrolador resultou em valores com alguns microssegundos de diferença, valores esses que podem ser atribuídos a um erro de posicionamento do cursor do osciloscópio devido à menor resolução da imagem. A conclusão que se pode tirar é que neste segundo protótipo, a aproximação aos valores reais demonstrou-se significativa o que valida e justifica esta nova abordagem no *hardware*.

De seguida, será feita uma introdução ao *software* desenvolvido para a plataforma MBED, e de como os sinais são adquiridos e processados para a obtenção da coordenada de origem do som do dispositivo de clique.

4.4 *Software* desenvolvido

Neste subcapítulo, pretende-se descrever os algoritmos desenvolvidos tanto para a plataforma MBED como para o interface com o computador portátil. Para a plataforma MBED, utilizou-se o ambiente de desenvolvimento em linha sugerido pelo fabricante e que se encontra disponível no sítio web do mesmo (www.mbed.org). Após registo de uma nova conta neste

endereço, o utilizador pode desenvolver qualquer aplicação em linguagem C++ e *Assembly* para o processador da plataforma MBED, com suporte para o conjunto de bibliotecas disponibilizado pelo fabricante. A compilação do programa é efetuada em linha que gera o ficheiro binário a ser colocado no dispositivo.

Ao efetuar-se a ligação USB entre a plataforma MBED e um computador pessoal, este instala dois dispositivos vistos pelo computador como um disco externo e uma porta série para a comunicação bidirecional com o dispositivo. Esse disco externo de 2 MB de espaço, é a área de armazenamento do ficheiro binário gerado pela compilação de um programa em linha no sítio do fabricante. Após a gravação do ficheiro binário, é necessário premir o botão de *reset* do dispositivo para que este reinicie com o novo programa carregado.

Como parte integrante da plataforma MBED, a comunicação série providenciada permite ao utilizador enviar ou receber informação de e para o dispositivo. É desta forma que se procede ao envio dos valores para o computador pessoal da coordenada calculada pelo microcontrolador, permitindo também uma depuração do programa desenvolvido, para a verificação do estado das variáveis utilizadas no programa.

Para além da comunicação série, a plataforma MBED possui quatro LEDs (*Light Emission Diode*) cujo estado é selecionável pelo programa em execução, e que neste caso foram diversas vezes utilizados para depuração de estados do programa. Na última versão do código desenvolvido, o LED1 pisca a cada 2 segundos para evidenciar o funcionamento contínuo do programa.

4.4.1 Algoritmos da plataforma MBED

Sendo este dispositivo responsável pela receção dos sinais e respetivo processamento dos mesmos, os algoritmos principais encontram-se residentes neste microcontrolador. Neste subcapítulo serão explicados os passos dados para a obtenção final de uma coordenada da posição do dispositivo de clique, através dos sinais recebidos. Os algoritmos desenvolvidos encontram-se divididos em três grupos:

- a) Rotina principal para inicialização e gestão dos valores/estados das variáveis
- b) Processamento da interrupção e leitura do temporizador
- c) Cálculo da coordenada

O funcionamento de todo o sistema é baseado num temporizador principal que atualiza constantemente os valores do relógio do sistema em microssegundos (*timestamp*). Este valor

é crescente e a sua variável é levada a zero automaticamente quando esta atinge o valor máximo.

Os impulsos recebidos dos sensores chegam às entradas digitais do microcontrolador que gera uma interrupção por cada um dos quatro sensores, guardando apenas o valor do *timestamp* desse evento no processamento dessa interrupção. Esse *timestamp* só é guardado se a variável destino tiver um valor de zero. Se for diferente de zero, a interrupção é ignorada. Como num evento de clique são gerados múltiplos impulsos, este mecanismo previne a alteração do *timestamp* registado no primeiro impulso. No algoritmo principal será explicado como é colocado a zero o valor dessa variável. A Figura 30 mostra o fluxograma desse processo.



Figura 30. Fluxograma da leitura do timer

Numa rotina principal do microcontrolador que está encarregue de inicializar as variáveis e definições da utilização das portas do dispositivo, a monitorização constante das variáveis globais do temporizador atualizadas aquando das interrupções é feita continuamente. Dessa forma, se o valor dessas variáveis for diferente de zero, indica que existiu uma ocorrência e esta deverá ser processada. Esse processamento leva a um conjunto de verificações e de validações, para que se confirme que o sinal dos quatro sensores foram efetivamente recebidos.

Como o tempo total do sinal do clique (retirando o sinal do claque) é menor do que 50 ms, este é um valor utilizado numa das validações. Dessa forma, todos os quatro *timestamps* gerados por interrupções terão que estar dentro deste tempo para o sinal ser validado. Fora

desse intervalo, significa que o sinal obtido de um ou mais sensores seria o sinal do clique, criando uma mistura de *timestamps* gerados por cliques e por claque, o que daria um resultado errado na coordenada gerada.

Só após estas validações, a rotina de cálculo da coordenada é executada. No final do cálculo o valor é enviado pela porta série para o computador pessoal. Em cada uma destas iterações, quer seja efetuado o cálculo ou quer tenha falhado qualquer das validações efetuadas, as variáveis globais do *timestamp* são limpas e inicializadas a zero para ficarem preparadas para novas interrupções. A Figura 31 mostra o fluxograma desse processo. As variáveis *wd* (*watchdog*) e *flag* foram utilizadas para a gestão do *timeout* do ciclo e respectiva limpeza de variáveis.

O código fonte de todos os algoritmos desenvolvidos para a plataforma MBED pode ser encontrado no apêndice D.

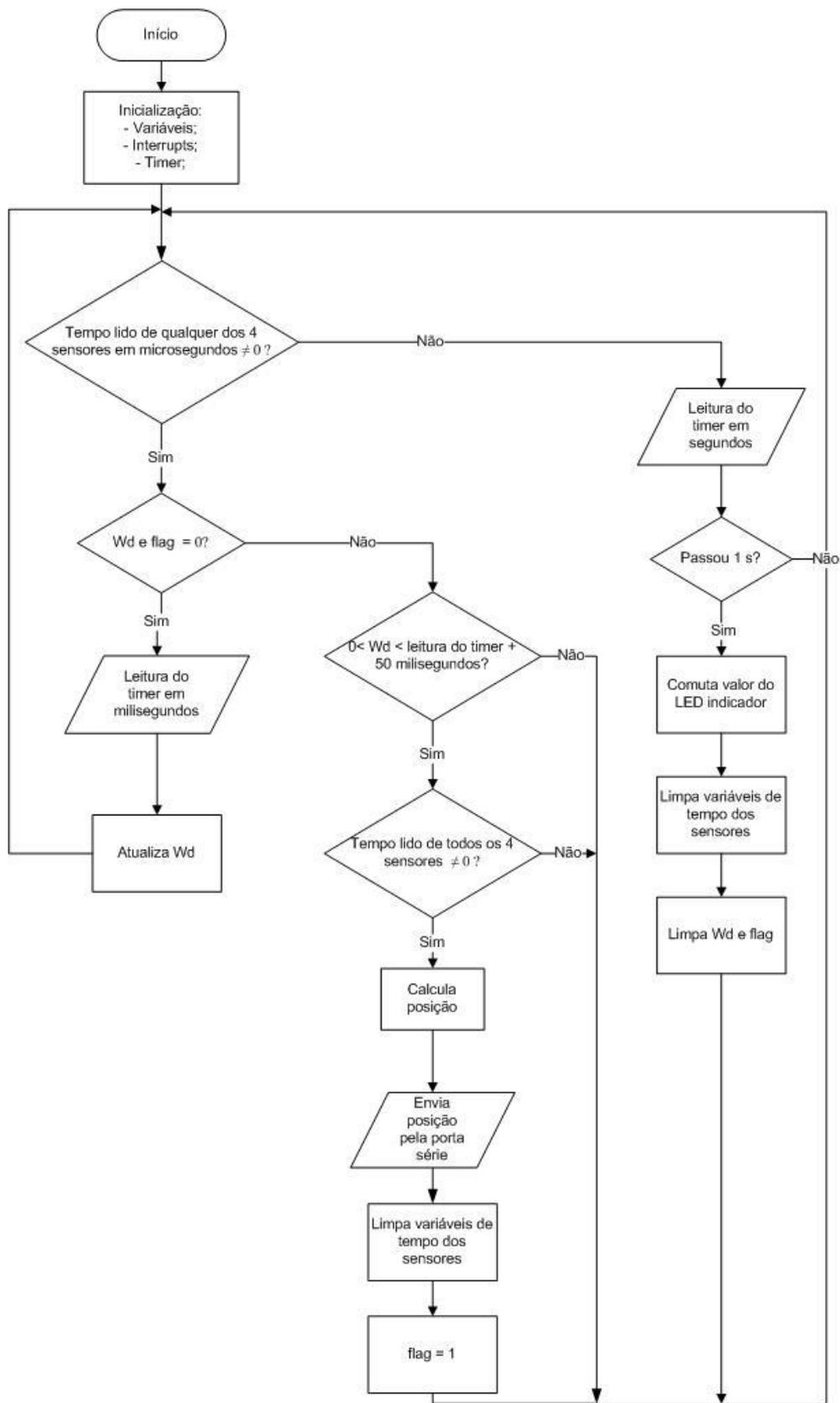


Figura 31. Fluxograma da rotina principal do programa

Quando a rotina de cálculo é executada, significa que todos os requisitos para a mesma foram contemplados, nomeadamente na existência de quatro *timestamps* válidos. Após uma inicialização de um conjunto de variáveis que irá utilizar, esta rotina tem como primeiro passo a validação final dos *timestamps* existentes, para perceber se estes são coerentes. Por outras palavras, verifica se a diferença entre os *timestamps* traduz tempos de propagação do som dentro das distâncias máximas entre sensores no laboratório. Se essa diferença for superior em qualquer um dos quatro sensores, o cálculo da coordenada não é efetuado.

O algoritmo de cálculo é processado por etapas, iniciando-se pelo cálculo da diferença do *timestamp* entre cada dois sensores. O sinal da diferença é propagado nas etapas seguintes e será utilizado para definir se o ângulo é maior ou menor do que zero.

Na etapa seguinte, é calculado o seno do ângulo pretendido de acordo com a equação (4) tal como fora visto anteriormente.

$$\mathit{seno}(\theta) = \frac{\Delta t c}{x} \quad (4)$$

Em que:

Δt é a diferença da leitura do relógio (*timestamp*) de um par de sensores adjacentes

c é a velocidade do som

x é a distância entre os sensores

Se o valor obtido do seno estiver compreendido entre -1 e 1, então a etapa seguinte é calcular o arco seno deste valor para obter o ângulo pretendido. Caso não esteja compreendido entre estes valores, os mesmos são ignorados e o programa prossegue sem efetuar o cálculo. Estes passos são efetuados a cada dois sensores adjacentes. No final desta etapa estão calculados os quatro ângulos necessários. Estes ângulos irão permitir calcular os pontos onde assentam as quatro retas que os formam, e que por sua vez levarão ao cálculo da interseção dessas mesmas retas, tal como explicado anteriormente na descrição da arquitetura do sistema.

Por fim, a rotina seleciona as coordenadas de acordo com o que foi descrito anteriormente, baseado no menor *timestamp* obtido, i.e., pela primeira interrupção recebida que significa o sensor mais próximo da origem do sinal. A Figura 32 mostra o fluxograma desse processo.

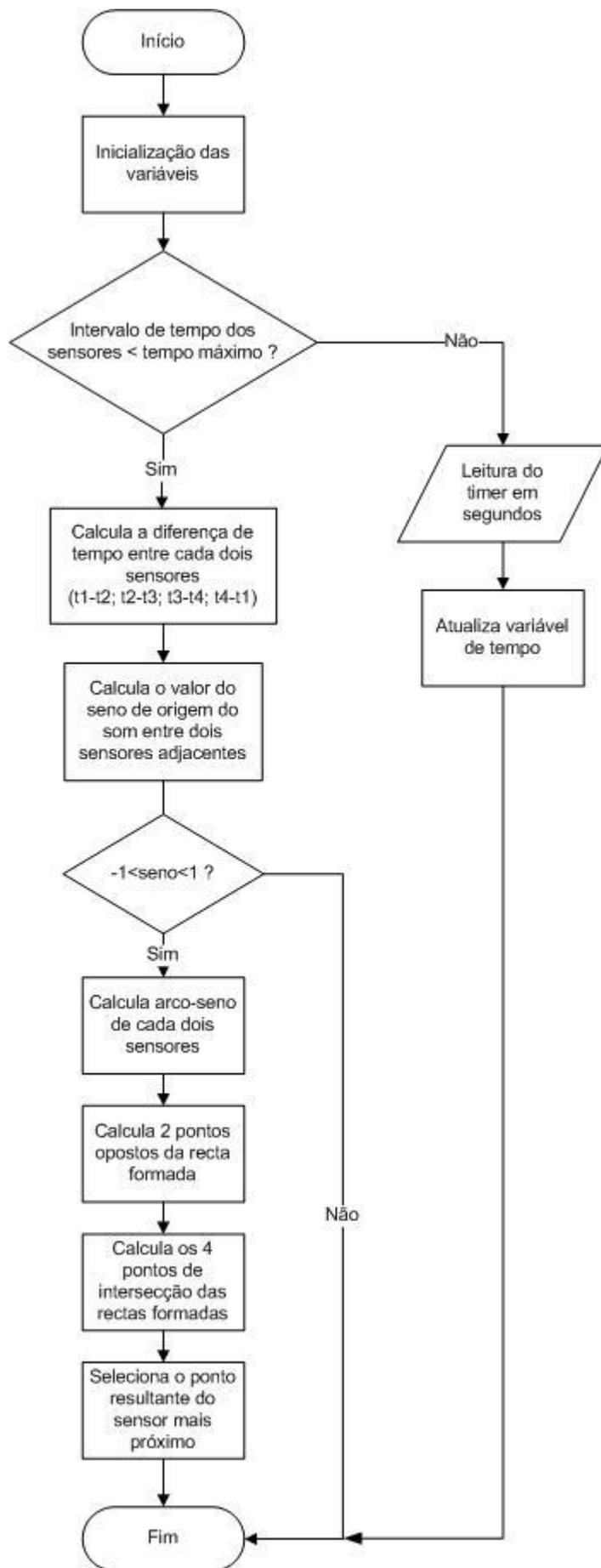


Figura 32. Fluxograma da rotina de cálculo da coordenada

4.4.2 Interface gráfico com o utilizador

A unidade de controlo baseada na plataforma MBED encontra-se ligada por barramento USB a um computador pessoal, enviando em modo série as coordenadas calculadas. Estes valores são importantes para serem enviados ao sistema robótico onde este trabalho ficará incorporado. No entanto, foi necessário desenvolver um ambiente gráfico para que o utilizador pudesse observar a coordenada retornada pela unidade de controlo de uma forma mais intuitiva e amigável.

Dessa forma, foi desenvolvido em C# na plataforma Microsoft® *Visual Studio* [21] um interface gráfico que permitisse uma visualização intuitiva e espacial das coordenadas obtidas. A Figura 33 ilustra o interface gráfico desenvolvido onde é possível observar os quatro sensores, bem como a sua distribuição no laboratório em relação à porta do mesmo. Na mesma janela encontra-se uma lista onde as coordenadas obtidas são visualizadas em modo de texto, um botão para limpar todas as coordenada obtidas e um botão de saída do programa.

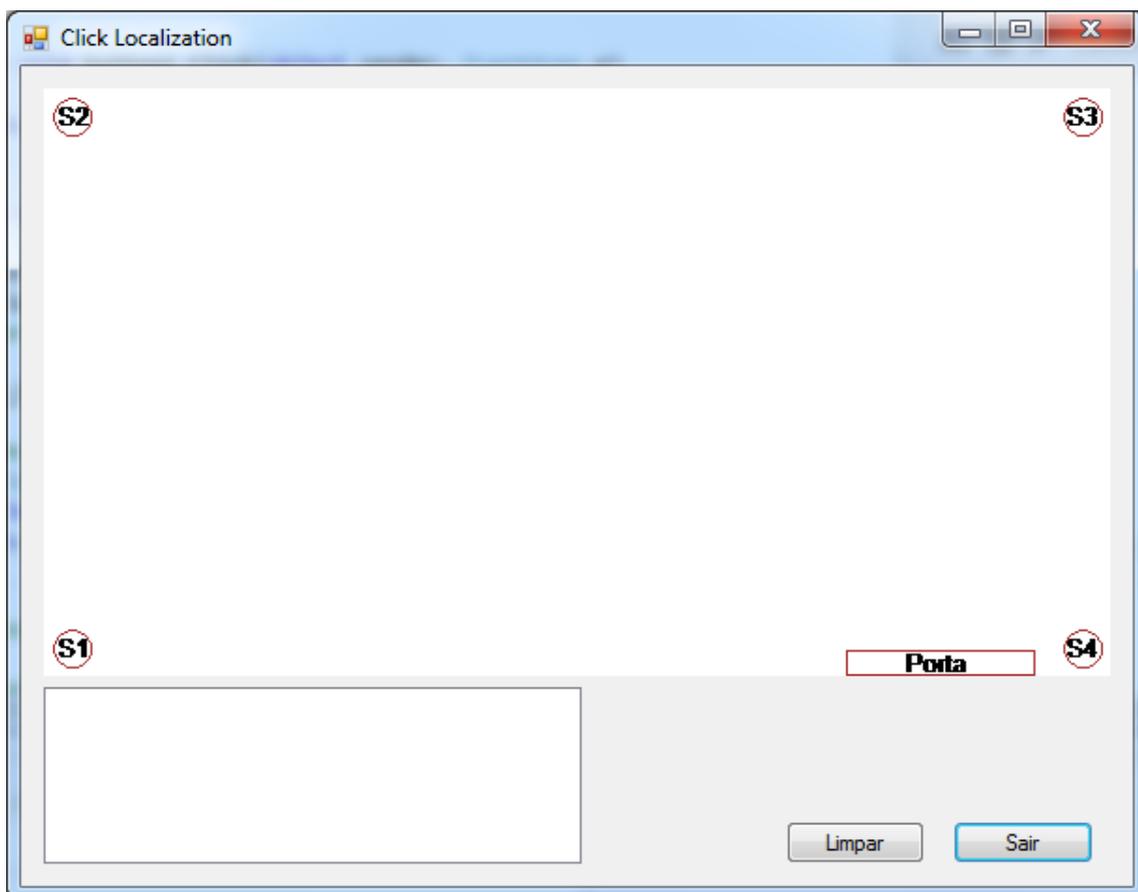


Figura 33. Interface gráfico com o utilizador desenvolvido em C# para interação com o utilizador

O funcionamento desta aplicação baseia-se num ambiente gráfico orientado ao evento, onde a ligação à porta série com a plataforma MBED permite a receção automática das coordenadas enviadas, gerando um evento na aplicação de cada vez que um novo ponto é recebido. Esse evento executa internamente uma função no programa desenvolvido que irá processar a coordenada recebida, enviando-a para a lista de coordenadas da janela (canto inferior esquerdo da janela), e colocando um pequeno quadrado de cor aleatória (com o texto da respetiva coordenada ao lado do mesmo) na posição relativa ao laboratório e equivalente no ambiente gráfico.

A Figura 34 ilustra um conjunto de experiências onde o dispositivo de clique foi acionado três vezes em locais diferentes do laboratório, mostrando os pontos recebidos através das suas coordenadas e do seu posicionamento no interface gráfico.

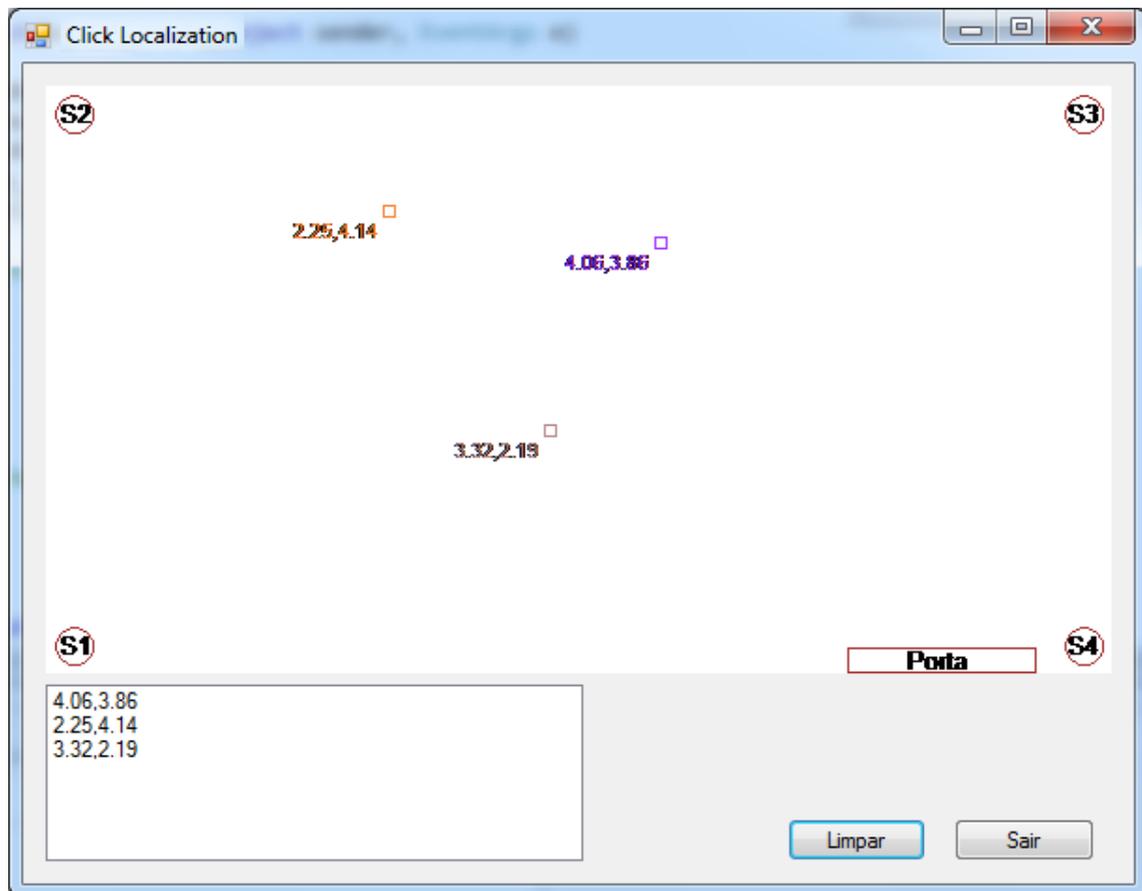


Figura 34. Interface gráfico com algumas coordenadas recebidas

De seguida, a mesma experimentação foi executada mas através de seis cliques gerados no mesmo local, sendo o resultado obtido visível na Figura 35. Como se pode observar na figura, esta sequência de seis cliques consegue ter uma grande proximidade entre eles. No capítulo 6

(Resultados obtidos) serão discutidos mais profundamente estes resultados assinalando o respetivo desvio padrão da solução desenvolvida.

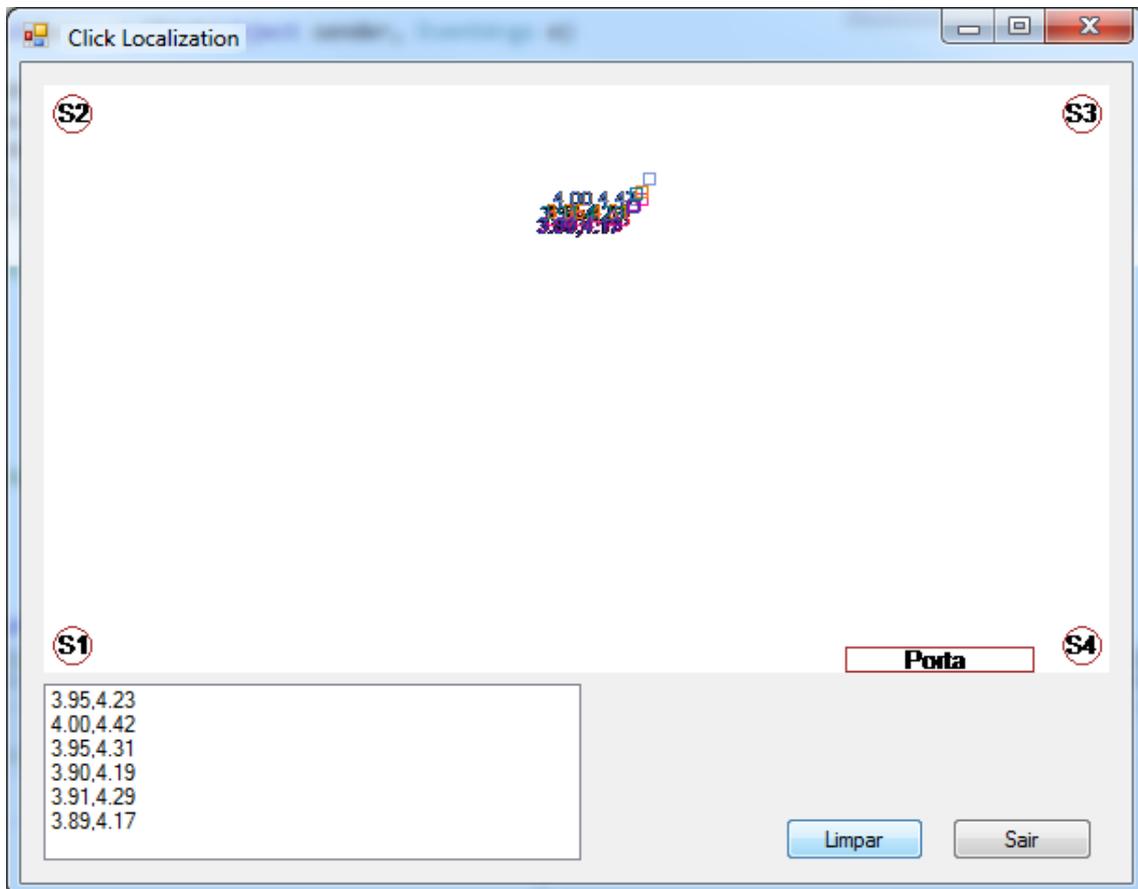


Figura 35. Interface gráfico com seis coordenadas recebidas geradas no mesmo local

A Figura 36 ilustra o fluxograma que representa de forma simplificada o algoritmo do interface gráfico demonstrado anteriormente. A aplicação inicia com a definição do interface gráfico e a sua inicialização, onde é efetuada a abertura da ligação série entre o computador pessoal e a plataforma MBED. Esta ligação é estabelecida com uma velocidade de transmissão de 9600 bps. Nesta ligação, é definida uma função de chamada de retorno, vulgarmente conhecida por *callback*. Esta função fica encarregue de processar automaticamente os dados que chegam na porta série.

Quando existem dados disponíveis na porta série do computador, a aplicação sinaliza-os e efetua a sua leitura. Um conjunto de validações é executado com a finalidade de verificar se os dados recebidos estão em conformidade com a trama esperada. Esta trama está definida por um comprimento de 10 caracteres, e é constituída por dois valores numéricos de vírgula

flutuante com duas casas decimais e separados por uma vírgula, com terminação de trama pelo carater 13 (CR ou *Carriage Return*).

Após a validação dos dados recebidos, estes são convertidos para coordenadas equivalentes à área gráfica reservada na janela da aplicação. Após esta adaptação, o ponto é desenhado com os valores da coordenada recebida e acrescentado à lista de pontos recebidos na parte inferior esquerda da janela da aplicação.

O código fonte desenvolvido na linguagem C# da Microsoft *Visual Studio* poderá ser consultado no apêndice C.

De seguida será explicada a metodologia de experimentação seguida, para uma melhor compreensão das capacidades do sistema desenvolvido.

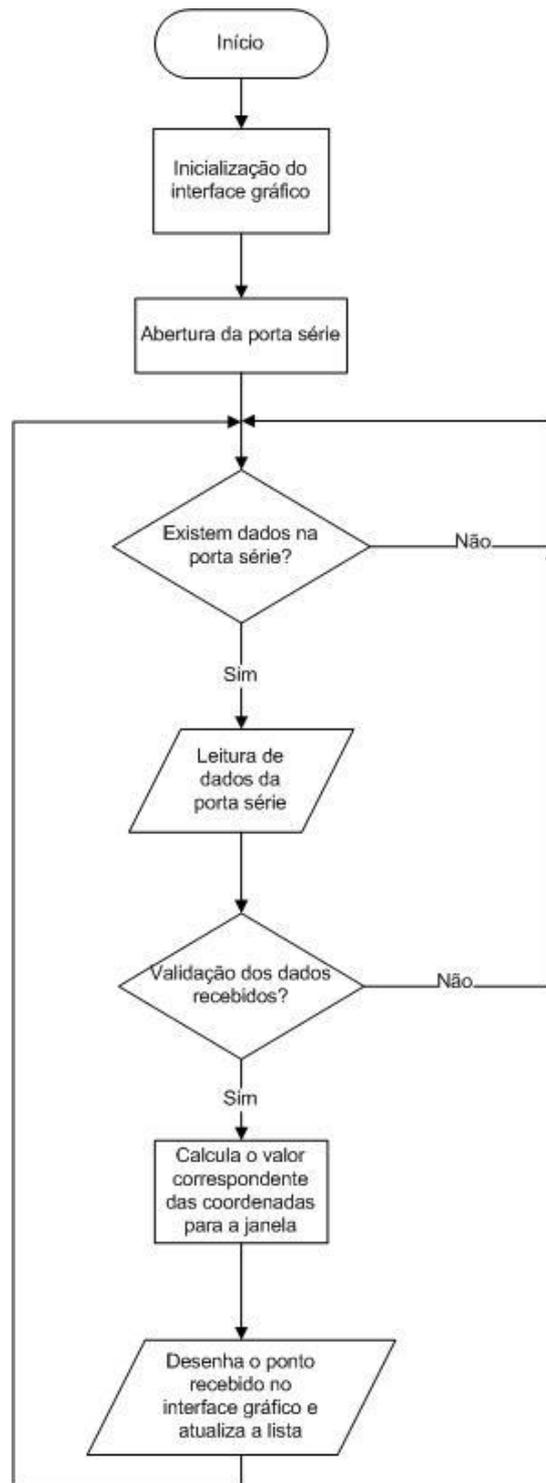


Figura 36. Fluxograma da aplicação desenvolvida como interface gráfico com o utilizador

5 Metodologia

Neste capítulo irá ser apresentado a metodologia utilizada para testar as capacidades da solução desenvolvida. Diversas experiências foram desenhadas para se conseguir obter o desempenho do sistema, verificando se o mesmo se encontra dentro do esperado.

5.1 Introdução

Para se efetuar um conjunto de experiências necessárias ao estudo do desempenho de um qualquer sistema, é importante a elaboração de um plano ou desenho de experimentação para evitar a obtenção de excesso de informação ou informação redundante. Dessa forma, para o sistema em causa, a experimentação consistiu na utilização do dispositivo de clique, em coordenadas conhecidas, obtendo três amostras em cada posição.

Os testes desenvolvidos foram efetuados no Laboratório de Automação e Robótica devido ao facto de ter sido o local de desenvolvimento de toda a solução, bem como, perfazer uma área adequada e similar a uma divisão de uma habitação.

Numa primeira fase, os valores obtidos e calculados pelo sistema desenvolvido foram também adquiridos por um osciloscópio digital de quatro canais, marca RIGOL de 200 MHz (frequência de amostragem). Isto permitiu uma análise comparativa entre a fidelidade do sinal processado pela plataforma MBED e o sinal medido pelo osciloscópio. A Figura 37 ilustra a utilização do osciloscópio, pela sua vantagem de possuir quatro canais e permitir a leitura de todos os sinais ao mesmo tempo. Os sinais foram adquiridos nos pinos de entrada digital da plataforma MBED salvaguardando a consistência da medição entre os dois sistemas.

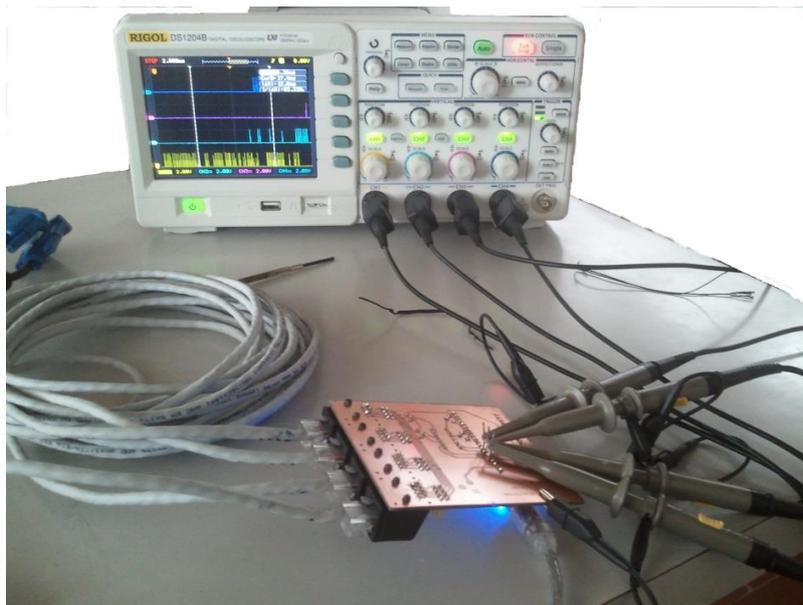


Figura 37. Utilização do osciloscópio digital de quatro canais durante a experimentação

Para que o sinal acústico do dispositivo de clique fosse ativado consistentemente, no local exato e sempre à mesma altura, foi utilizado um varão de 1 m de comprimento, pousando-se a base do dispositivo de clique numa das extremidades, com a outra extremidade colocada no chão. A Figura 38 ilustra esse método.



Figura 38. Varão de 1 m de comprimento utilizado na experimentação

No chão onde era colocado a extremidade do varão, estavam marcados os pontos de coordenada exata definida para as diversas experiências. Em cada uma das posições, o utilizador efetuou três cliques, com interregno de 2 segundos entre cada clique. Os dados gerados eram copiados de imediato para uma folha de cálculo. De seguida serão descritos os dados que foram recolhidos, a sua razão e quais as experiências executadas.

5.2 Experimentação

Para cada experiência executada, pretendeu-se que os dados obtidos e enviados pela plataforma MBED ao computador pessoal, pudessem contribuir para uma correta análise da coordenada calculada, o erro desse cálculo e seu desvio padrão. Por outras palavras, permitisse uma correta avaliação da performance do sistema. Assim, registou-se em cada posição testada o *timestamp* lido de cada sensor na plataforma MBED, bem como o cálculo dos quatro pontos intermédios obtidos após a interseção das retas, tal como demonstrado na equação (3) (P_x, P_y).

Em relação às coordenadas escolhidas para se efetuar os diferentes testes, dividiu-se a experimentação em duas partes:

- a) Diagonal aos sensores agrupando os valores por proximidade a cada um dos sensores (losangos azuis na Figura 39)
- b) Paralelo aos sensores com disposição ortogonal ou em linha com os sensores (losangos azuis na Figura 40)

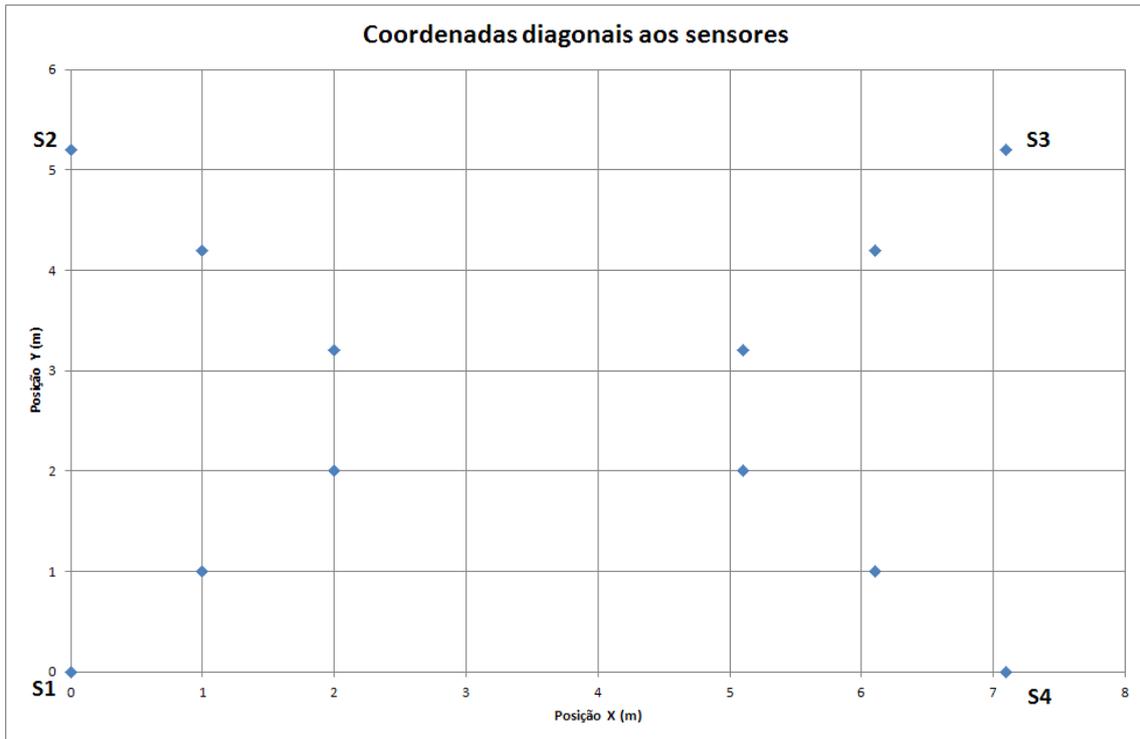


Figura 39. Coordenadas utilizadas na experimentação e diagonais aos sensores

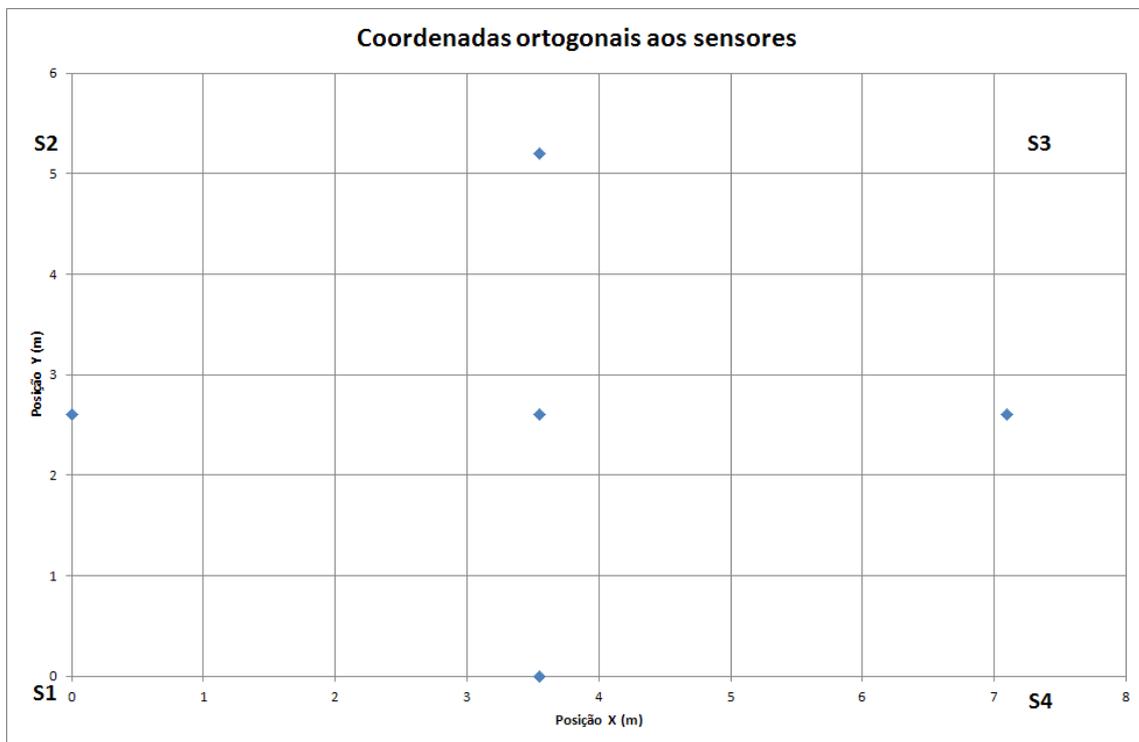


Figura 40. Coordenadas utilizadas na experimentação e ortogonais ou em linha com os sensores

Na Tabela 4 estão descritas as coordenadas dos diversos testes realizados (diagonal), bem como a indicação do sensor mais próximo de cada teste. Na Tabela 5, estão descritas as coordenadas dos restantes testes realizados (ortogonal), com a respetiva descrição do local onde estes foram executados. Em cada uma das coordenadas, e tal como foi explicado anteriormente, três testes foram realizados.

Tabela 4 - Coordenadas dos testes realizados com a definição do sensor mais próximo ao teste

Sensor mais próximo	Posição X (m)	Posição Y (m)
S1	0	0
S1	1	1
S1	2	2
S2	0	5,2
S2	1	4,2
S2	2	3,2
S3	7,1	5,2
S3	6,1	4,2
S3	5,1	3,2
S4	7,1	0
S4	6,1	1
S4	5,1	2

Tabela 5 - Coordenadas dos testes realizados com a definição do sensor mais próximo ao teste

Localização no espaço	Posição X (m)	Posição Y (m)
Centro	3,55	2,6
Meio sensor 1 e 2	0	2,6
Meio sensor 2 e 3	3,55	5,2
Meio sensor 3 e 4	7,1	2,6
Meio sensor 4 e 1	3,55	0

6 Resultados obtidos

Neste capítulo serão demonstrados os resultados obtidos nos testes realizados, após a análise efetuada aos mesmos. Será também efetuado neste capítulo a discussão dos mesmos. Estes irão ser demonstrados detalhadamente apenas num grupo de testes, por forma a explicar a análise que foi conduzida, sendo que nos restantes serão apenas apresentados os valores finais. Para uma melhor depuração dos algoritmos desenvolvidos e das variáveis intermédias calculadas, o apêndice A contém os valores completos das diversas variáveis do sistema. Os dados completos de toda a experimentação estão disponíveis no apêndice B.

6.1 Explicação da análise efetuada

Por forma a permitir uma melhor compreensão da análise efetuada aos dados recebidos, é necessário esclarecer a nomenclatura utilizada nas várias iterações da análise. Assim, a Figura 41 ilustra os valores de (P_x, P_y) em função da posição dos sensores respetivos.

Assim, o ponto (P_{x_1}, P_{y_1}) corresponde à interseção das retas que passam entre os sensores S1/S2 e S2/S3, o ponto (P_{x_2}, P_{y_2}) corresponde à interseção das retas que passam entre os sensores S2/S3 e S3/S4, o ponto (P_{x_3}, P_{y_3}) corresponde à interseção das retas que passam entre os sensores S3/S4 e S4/S1 e o ponto (P_{x_4}, P_{y_4}) corresponde à interseção das retas que passam entre os sensores S4/S1 e S1/S2. A Figura 41 ilustra graficamente estas interseções onde é possível verificar quais os pontos resultantes de um evento de clique. Na teoria os pontos (P_{x_1}, P_{y_1}) , (P_{x_2}, P_{y_2}) , (P_{x_3}, P_{y_3}) e (P_{x_4}, P_{y_4}) deveriam ser o mesmo ponto, mas na prática, como irá ser demonstrado, não o são pelas diversas imprecisões causadas pela resolução máxima dos *timestamps* obtidos pelo microcontrolador (microssegundos).

Após a receção destes quatro pontos enviados pela plataforma MBED, a análise dos resultados passa pelo cálculo do módulo da subtração dos valores recebidos com o valor real da posição onde foi efetuado o clique, em ambos os eixos. Desta forma, obtém-se o erro em cada eixo dos valores calculados pela plataforma MBED. Esses valores serão apresentados como $(P_{x_1^-}, P_{y_1^-})$, $(P_{x_2^-}, P_{y_2^-})$, $(P_{x_3^-}, P_{y_3^-})$ e $(P_{x_4^-}, P_{y_4^-})$.

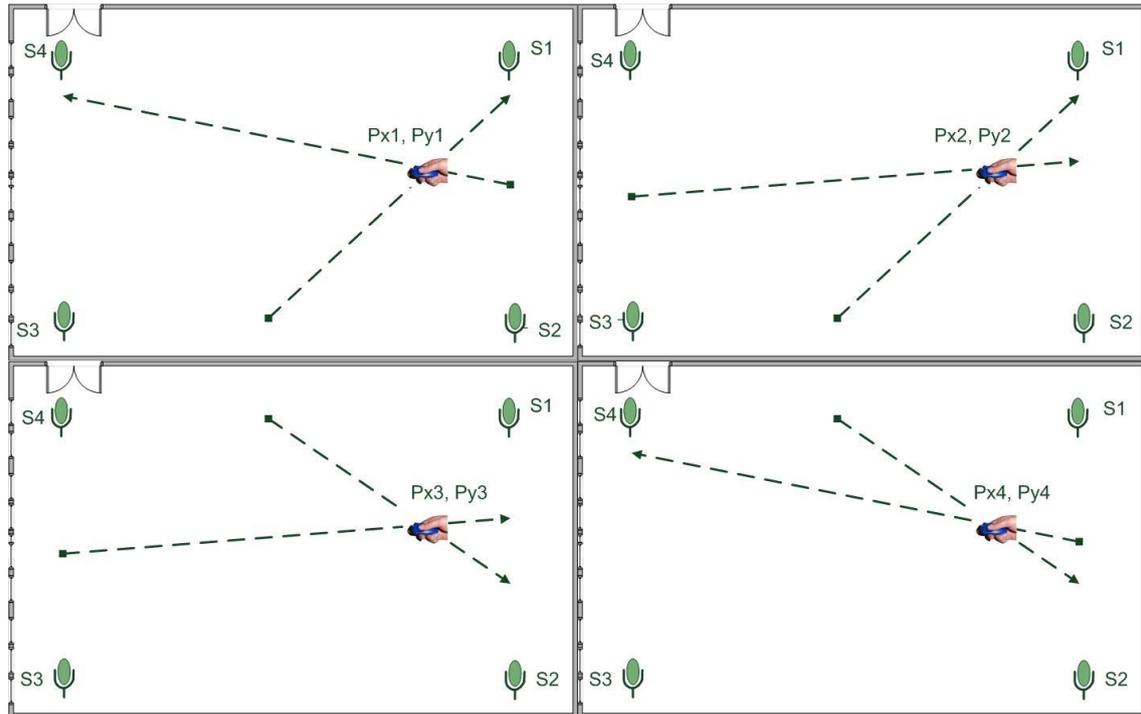


Figura 41. Valores de (Px,Py) em função da posição do sensor

Os valores resultantes desta subtração em cada eixo são depois somados entre eles dando um valor total máximo desse erro. Apesar de alguns pontos apresentarem os valores mais baixos de erro num dos eixos, a soma do erro nos dois eixos para o mesmo ponto mostra que o erro total é menor noutros pontos. Por outras palavras, se por exemplo o ponto 1 (Px_1, Py_1) apresentar o valor mais baixo em x quando comparado com os outros pontos, a soma de Px_1 com Py_1 poderá não ser o valor mais baixo dos quatro pontos, podendo revelar que o ponto 3 (Px_3, Py_3) possui na sua soma o erro mais baixo. Esses valores resultantes da soma serão apresentados como P1, P2, P3 e P4.

Para o cálculo do desvio padrão, foram efetuados dois cálculos. O primeiro foi chamado de desvio padrão local onde este é calculado baseado no valor respeitante aos três testes efetuados no mesmo local, e o segundo de desvio padrão global, que é calculado baseado nos valores obtidos de todos os testes por quadrante ou proximidade a cada sensor. Após o cálculo do desvio padrão global, é efetuado o valor médio entre os valores obtidos por quadrante dando um valor de desvio padrão médio.

De seguida serão apresentados os resultados da análise efetuada aos testes executados.

6.2 Resultados dos testes efetuados na diagonal aos sensores

Os resultados seguintes ilustram os dados obtidos nos testes efetuados na diagonal aos sensores, tal como referido anteriormente. As primeiras três colunas das tabelas seguintes são as mesmas por uma questão de enquadramento das várias iterações da análise. De uma forma detalhada, t_1 a t_4 na Tabela 6 significam os *timestamp* lidos pela plataforma MBED respetivamente do sensor 1. De salientar que os testes efetuados foram apenas com o dispositivo de clique apresentado anteriormente, não tendo sido utilizado outro tipo de dispositivo de clique.

Tabela 6 - Valores de *timestamp* lidos em cada teste efetuado próximo do sensor 1 (1º quadrante)

Sensor	Posição X	Posição Y	t_1 (ms)	t_2 (ms)	t_3 (ms)	t_4 (ms)
S1	0	0	305161949	305174123	305184430	305179345
S1	0	0	307028855	307041041	307051350	307046218
S1	0	0	311097243	311109436	311119541	311114848
S1	1	1	39148378	39155008	39164889	39161214
S1	1	1	45866755	45874326	45883294	45879554
S1	1	1	49212197	49219995	49228734	49225369
S1	2	2	77341443	77344306	77350729	77348404
S1	2	2	79148376	79151055	79157690	79155349
S1	2	2	80790708	80793665	80800301	80797961

Na Tabela 7 encontram-se os valores de (Px,Py) calculados pela plataforma MBED pelo método já descrito.

Tabela 7 - Valores de (Px, Py) calculados pela plataforma MBED em cada teste efetuado

Sensor	Posição X	Posição Y	Px ₁	Py ₁	Px ₂	Py ₂	Px ₃	Py ₃	Px ₄	Py ₄
S1	0	0	1,19	1,04	0,82	0,39	2,22	0,88	0,37	2,11
S1	0	0	1,19	1,04	0,80	0,36	2,25	0,87	0,35	2,14
S1	0	0	1,22	0,99	1,03	0,64	2,03	0,97	0,49	1,95
S1	1	1	1,71	1,78	1,40	1,19	2,43	1,44	2,44	1,43
S1	1	1	1,82	1,56	1,66	1,23	2,44	1,43	2,75	1,03
S1	1	1	1,85	1,51	1,80	1,40	2,31	1,52	2,77	0,96
S1	2	2	2,55	2,11	2,48	1,89	2,86	1,95	2,82	2,06
S1	2	2	2,53	2,15	2,44	1,88	2,86	1,94	2,81	2,10
S1	2	2	2,51	2,10	2,44	1,88	2,83	1,94	2,79	2,05

Resultados obtidos

Na Tabela 8 encontram-se os valores do módulo da diferença de (Px, Py) (erro de posição) com os valores da posição real onde foi efetuado cada teste. As células com fundo verde indicam os pontos onde um dos eixos possui o valor mais baixo de erro em cada teste.

Na Tabela 9 encontram-se os valores de erro somados de Px com Py de cada ponto, resultando num valor único de erro (P1, P2, P3 e P4). À soma dos erros individuais por eixo obtém-se o erro total por ponto. As células com fundo verde indicam os pontos com o valor mais baixo em cada teste.

Tabela 8 - Módulo da diferença entre os valores de (Px, Py) e a posição real do teste

Sensor	Posição X	Posição Y	Px1-	Py1-	Px2-	Py2-	Px3-	Py3-	Px4-	Py4-
S1	0	0	1,19	1,04	0,82	0,39	2,22	0,88	0,37	2,11
S1	0	0	1,19	1,04	0,80	0,36	2,25	0,87	0,35	2,14
S1	0	0	1,22	0,99	1,03	0,64	2,03	0,97	0,49	1,95
S1	1	1	0,71	0,78	0,40	0,19	1,43	0,44	1,44	0,43
S1	1	1	0,82	0,56	0,66	0,23	1,44	0,43	1,75	0,03
S1	1	1	0,85	0,51	0,80	0,40	1,31	0,52	1,77	0,04
S1	2	2	0,55	0,11	0,48	0,11	0,86	0,05	0,82	0,06
S1	2	2	0,53	0,15	0,44	0,12	0,86	0,06	0,81	0,10
S1	2	2	0,51	0,10	0,44	0,12	0,83	0,06	0,79	0,05

Tabela 9 - Soma dos valores de Px com Py em cada ponto

Sensor	Posição X	Posição Y	P1	P2	P3	P4
S1	0	0	2,23	1,20	3,10	2,48
S1	0	0	2,22	1,16	3,12	2,49
S1	0	0	2,21	1,67	3,00	2,44
S1	1	1	1,49	0,58	1,87	1,87
S1	1	1	1,38	0,89	1,87	1,78
S1	1	1	1,35	1,21	1,83	1,82
S1	2	2	0,67	0,59	0,91	0,88
S1	2	2	0,68	0,56	0,92	0,91
S1	2	2	0,62	0,56	0,89	0,84

Como se pode observar pela análise efetuada, o menor valor num dos eixos nem sempre corresponde ao valor mínimo do erro de um determinado ponto (Tabela 8). Quando o valor do erro em ambos os eixos é somado, o valor resultante mostrou-se consistente com menor valor sempre no mesmo ponto. No caso apresentado, o ponto 2 teve consistentemente o erro mais baixo (Tabela 9). O ponto 2 é o ponto de interseção entre a reta formada pelo sensor 1 e 2, com a reta formada pelo sensor 2 e 3.

A mesma análise revelou nos outros pontos testados uma consistência semelhante, em relação aos pontos respetivos. Os testes efetuados no quadrante do sensor 2 mostraram que o ponto de menor erro foi o ponto 3, do sensor 3 foi o ponto 4 e do sensor 4 foi o ponto 1. Foi através desta análise, que se constatou que os valores ideais para a escolha do ponto mais próximo do real, são baseados nos valores dos sensores mais distantes (retas opostas), i.e., dos sensores opostos ao sensor mais próximo (com o menor *timestamp*), tal como explicado anteriormente na descrição da Arquitetura do Sistema na Figura 15, agora transposta para a Figura 42.

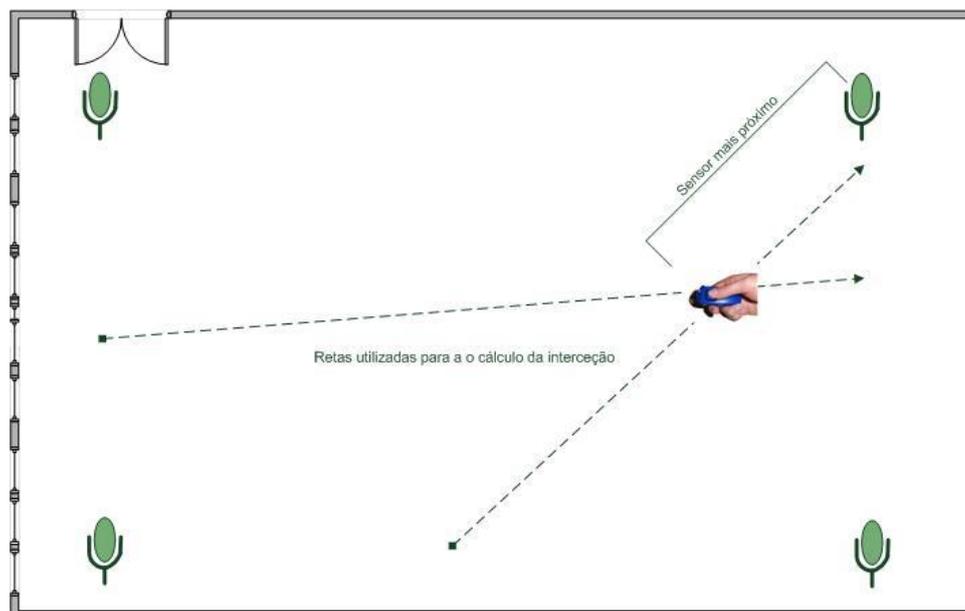


Figura 42. Exemplo de escolha do ponto baseado na interseção das retas opostas

Esta análise também revelou um aspeto de **singularidade** quando os valores dos sensores adjacentes ao sensor mais próximo são utilizados. Essa singularidade será explicada de seguida.

6.2.1 Singularidade

A singularidade no sistema desenvolvido ocorre devido ao erro de desfaseamento no cálculo dos ângulos entre sensores. Idealmente, esse erro é zero pois as retas interseccionam-se sempre dentro da área dos sensores, mas na realidade, existe um erro no ângulo calculado o que faz com que a interseção das duas retas geradas a partir dos sensores adjacentes ao sensor mais próximo do evento de clique se possam cruzar fora da área dos sensores.

Resultados obtidos

Considerando que na prática cada ângulo formado pelo cálculo do tempo de chegada do som ao sensor contém erros, esse fenômeno da singularidade ocorre. Nos diversos testes efetuados ao sistema, esta situação foi verificada inúmeras vezes, sempre que o dispositivo de clique era utilizado junto do alinhamento entre duas retas adjacentes. Os pontos resultantes eram valores completamente fora do espaço do laboratório, umas vezes por valores positivos elevados, outros por valores de posição negativos. A Figura 43 ilustra essa situação.

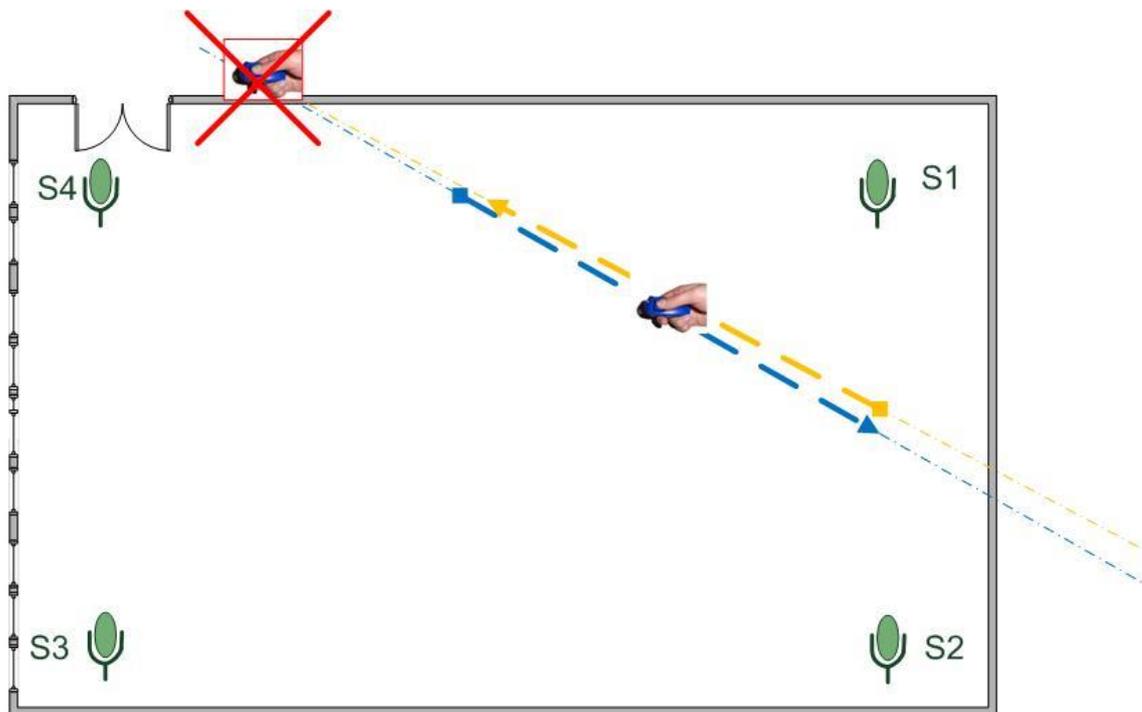


Figura 43. Exemplo de singularidade na interseção das retas geradas entre sensores

6.2.2 Análise gráfica dos erros obtidos

Tal como fora referido anteriormente no subcapítulo 4.3 (*Hardware desenvolvido*), foram desenvolvidos dois protótipos da unidade de controlo, onde a inconsistência dos resultados era patente na 1ª versão desta unidade. Nesta análise gráfica dos resultados, serão ilustrados os valores obtidos em ambos os protótipos onde será possível visualizar essa inconsistência.

A Figura 44 ilustra graficamente os pontos obtidos do protótipo 1, bem como a posição real esperada. No gráfico, é possível observar pelo agrupamento dos pontos através de linhas coloridas, qual o desfasamento espacial de cada ponto obtido. No caso da versão 1 do protótipo, salienta-se o facto destes pontos se encontrarem mais dispersos dentro do teste no mesmo local, e por isso diminuir a consistência do erro.

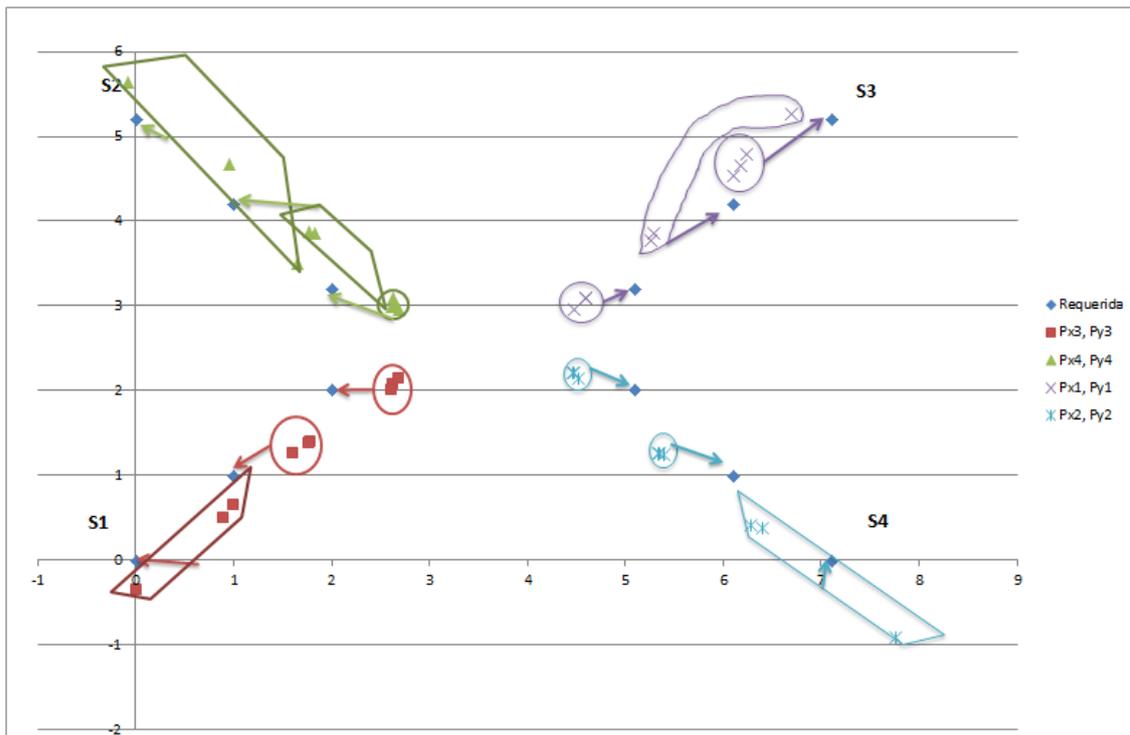


Figura 44. Resultados da localização nas diagonais aos sensores com a unidade de controle do protótipo 1

A Figura 45 ilustra graficamente os pontos obtidos do protótipo 2, bem como a posição real esperada. No gráfico, é possível observar pelo agrupamento dos pontos através de círculos, qual o desfasamento espacial de cada ponto obtido.

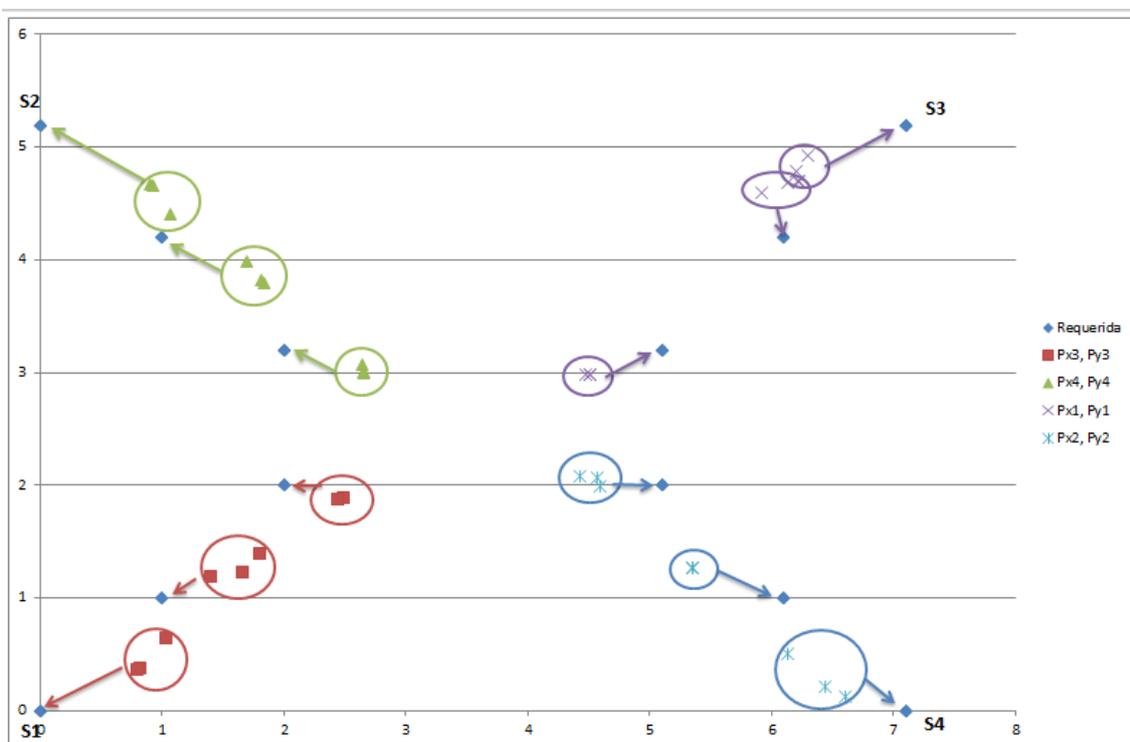


Figura 45. Resultados da localização nas diagonais aos sensores com a unidade de controle do protótipo 2

6.2.3 Desvio padrão

O cálculo do desvio padrão permitiu visualizar o desvio típico que os pontos obtidos tinham de diferença em relação aos pontos reais. Para tal utilizou-se a expressão (5) para o cálculo do desvio padrão.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (5)$$

Em que:

σ é o desvio padrão

N é a número de amostras

μ é o valor médio das amostras

x_i é o valor da amostra

Tal como referido anteriormente, o desvio padrão foi calculado em duas situações distintas, sendo em ambos os casos nos dados obtidos para o protótipo 2. O valor resultante para o desvio padrão local foi de **0,229 m** para o eixo das abcissas e de **0,193 m** para o eixo das ordenadas. Por outras palavras, este valor de desvio expressa o valor máximo de erro na inconsistência entre os testes realizados no mesmo local. Cada vez que é despoletado o evento de clique no mesmo local, a distância média resultante entre cada clique não excede os 22 cm no eixo das abcissas e de 19 cm no eixo das ordenadas.

No caso do desvio padrão global, foi efetuado o cálculo do desvio por quadrante, no ponto com os valores mais baixos, e depois calculada a média desses vários desvios para o valor final. A Tabela 10 resume os valores do desvio padrão calculados em função do quadrante respetivo.

Tabela 10 - Desvio padrão global por quadrante

Quadrante	X (m)	Y (m)
1º	0,684523312	0,330336495
2º	0,81212981	0,429232324
3º	0,635961332	0,461925981
4º	0,913362087	0,706452613

O valor do desvio padrão médio é então de **0,761 m** no eixo das abcissas e de **0,482 m** no eixo das ordenadas. Se o ponto de coordenada real for considerado o ponto central de uma

circunferência, e o raio dessa circunferência for a linha entre o ponto real e o ponto obtido, esse raio poderá ser calculado através do teorema de Pitágoras em função do desvio padrão global obtido (hipotenusa). Isso demonstra o erro máximo obtido de **0,901 m (< 1 m)**.

6.3 Resultados dos testes efetuados na ortogonal aos sensores

No caso da análise efetuada aos testes executados na ortogonal aos sensores, percebeu-se que se trabalhava na fronteira dos quadrantes e dessa forma, os valores são mais próximos e intermitentes na escolha de um dos quatro pontos calculados.

Os resultados seguintes ilustram os dados obtidos aos testes efetuados, sendo que neste caso, só o valor final dos pontos obtidos é apresentado, não sendo por isso apresentado o passo intermédio do cálculo do módulo da subtração entre o ponto real e o ponto obtido. Como é possível observar, as células preenchidas a verde significam os valores mais baixos obtidos, mas a diferença em relação aos outros pontos não é significativa. Num dos casos, os valores foram iguais em dois pontos diferentes (Meio 4_1).

Tabela 11 - Valores dos erros obtidos por ponto e localização real do teste (valores em metros)

Local	Pos. X	Pos. Y	P1	P2	P3	P4
Centro	3,55	2,6	0,04	0,02	0,04	0,06
Centro	3,55	2,6	0,04	0,05	0,04	0,03
Centro	3,55	2,6	0,11	0,19	0,12	0,04
Meio 1_2	0	2,6	1,29	1,29	1,22	1,25
Meio 1_2	0	2,6	1,29	1,29	1,21	1,25
Meio 1_2	0	2,6	1,28	1,28	1,23	1,25
Meio 2_3	3,55	5,2	0,58	0,59	0,60	0,60
Meio 2_3	3,55	5,2	0,56	0,58	0,62	0,57
Meio 2_3	3,55	5,2	0,57	0,59	0,60	0,60
Meio 3_4	7,1	2,6	1,17	1,18	1,22	1,27
Meio 3_4	7,1	2,6	1,17	1,18	1,21	1,26
Meio 3_4	7,1	2,6	1,17	1,18	1,21	1,26
Meio 4_1	3,55	0	0,37	0,44	0,44	0,36
Meio 4_1	3,55	0	0,36	0,44	0,44	0,36
Meio 4_1	3,55	0	0,36	0,44	0,44	0,36

6.3.1 Análise gráfica dos erros obtidos

Os testes realizados na ortogonal aos sensores também foram efetuados em ambos os protótipos, havendo alguma semelhança na inconsistência de valores no protótipo 1 à imagem dos testes na diagonal dos sensores, embora neste caso não seja tão significativo a diferença

Resultados obtidos

dos valores obtidos. A Figura 46 e a Figura 47 ilustram graficamente os resultados obtidos nos testes, respectivamente com o protótipo 1 e com o protótipo 2. Volta-se a salientar da ligeira dispersão ou inconsistência dos valores obtidos no protótipo 1, visíveis na Figura 46.

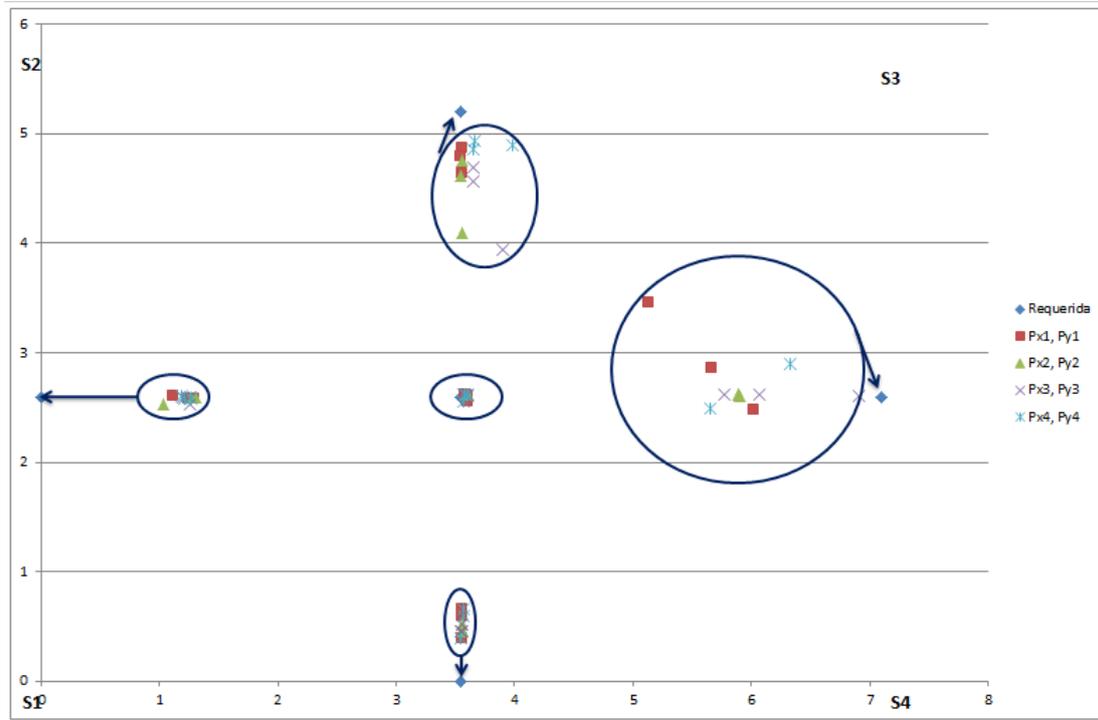


Figura 46. Resultados da localização na ortogonal aos sensores com a unidade de controlo do protótipo 1

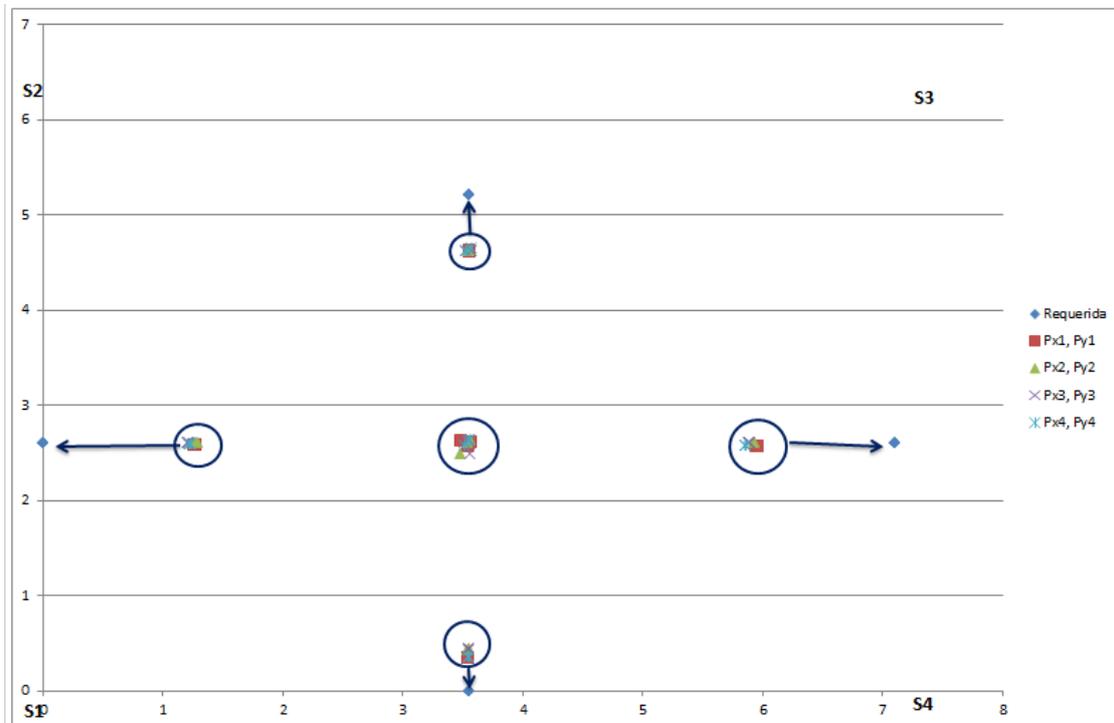


Figura 47. Resultados da localização na ortogonal aos sensores com a unidade de controlo do protótipo 2

6.4 Influência da altura do clique

Por forma a estudar qual a influência no sinal recebido pelos sensores em função da distância ao solo do dispositivo de clique, efetuaram-se um conjunto de testes que permitissem avaliar essa situação. Utilizando o ponto central do espaço (posição central entre os quatro sensores), foi colocado um varão de 2 m de comprimento (colocado na vertical), com marcações a cada 0,5 m, para servir como guia para a colocação do dispositivo de clique em diversas alturas. O ponto central foi o escolhido por ter revelado menor erro nas leituras efetuadas na experimentação. A começar no solo (0 m), efetuaram-se três cliques em cada posição e uma média de cada valor foi posteriormente calculada. Foi também calculado o erro em relação ao valor real da posição onde se fizeram os testes (X=3,55 m; Y=2,6 m).

Os resultados obtidos estão descritos na Tabela 12 e representados no gráfico da Figura 48.

Tabela 12 - Valores obtidos com o dispositivo de clique em diversas alturas ao solo

Posição (m)	Média X (m)	Média Y (m)	Erro X posição real (m)	Erro Y posição real (m)
0	3,57	2,66	0,02	0,06
0,5	3,56	2,59	0,01	-0,01
1	3,54	2,55	-0,01	-0,05
1,5	3,55	2,56	0,00	-0,04
2	3,55	2,53	0,00	-0,07

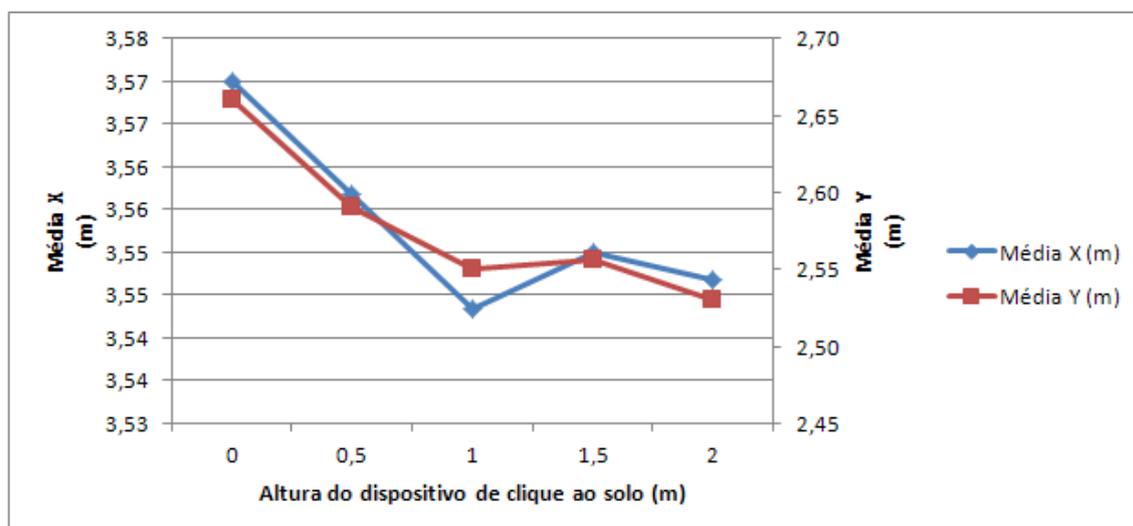


Figura 48. Gráfico da evolução da posição obtida em diversas alturas ao solo do dispositivo de clique

Como se pode observar no gráfico, existe alguma influência nos valores obtidos conforme se vai colocando o dispositivo de clique em alturas diferentes, revelando no entanto apenas uma diferença de 0,03 m no eixo das abcissas e 0,13 m no eixo das ordenadas, valor esse entre o valor máximo e o valor mínimo obtidos. No entanto, em relação à posição real, o máximo de erro obtido foi de 0,02 m no eixo das abcissas e de 0,07 m no eixo das ordenadas. Concluiu-se então que este valor de erro, apesar de merecer um estudo mais aprofundado da sua influência, não é para já significativo para o sistema desenvolvido onde se pretende um valor de erro máximo de 1 m.

6.5 Considerações aos resultados obtidos

Neste ponto, pretende-se levantar algumas considerações sobre diversas situações que foram encontradas na análise efetuada. A primeira delas é a evolução visível entre os dois protótipos desenvolvidos. Pode-se constatar que o segundo protótipo revelou-se mais consistente em termos dos valores obtidos, contendo o mesmo código fonte em ambos os casos. Efetivamente, os comparadores com histerese colocados à chegada do sinal vindo dos sensores, permitiu de uma forma expedita nivelar o sinal para assim este poder ser percebido como um sinal lógico correto.

Outro aspeto que é importante realçar, é o consistente aumento do erro obtido entre o valor real e o valor calculado, quando o dispositivo de clique se aproxima de um qualquer sensor. É notório pelos resultados obtidos e demonstrados anteriormente, que quanto mais próximo se encontra o dispositivo de clique da fronteira entre os quadrantes, especialmente no centro, o erro obtido no cálculo da localização tende a cair para zero. Uma tentativa de linearização dos valores, através da multiplicação dos valores obtidos por uma constante, fica aquém do necessário, pois como se pode observar na Figura 45, existem pontos na diagonal aos sensores, mais concretamente nas imediações do sensor 3, que frustrariam essa linearização. Por outro lado, não se conseguiu perceber ou encontrar uma razão plausível para esta situação. Um estudo mais exaustivo e detalhado sobre este assunto poderá ajudar a encontrar uma explicação possível.

7 Conclusão e trabalho futuro

Neste capítulo irão ser apresentadas algumas conclusões retiradas do trabalho desenvolvido, bem como serão deixadas algumas sugestões para trabalhos futuros neste projeto.

7.1 Conclusão

O objetivo central deste trabalho prendeu-se com o desenvolvimento de um sistema que permite a localização de uma entidade chamadora, baseada num sistema acústico passivo sem consumo de energia elétrica (dispositivo de clique). Determinaram-se assim as diversas possibilidades para se desenvolver este sistema com a finalidade de satisfazer este objetivo.

Após o desenvolvimento de um protótipo para a receção e tratamento do sinal acústico, concluiu-se que o mesmo conseguia produzir impulsos respeitantes ao sinal do dispositivo de clique, filtrando com bom desempenho todos os outros sinais ou sons existentes no espaço utilizado para testes. Desenvolveu-se então um conjunto de quatro sensores, baseados no primeiro protótipo e foram instalados nos locais definidos, cobrindo assim a área desejada para se efetuar a localização.

O controlo centralizado foi desenvolvido e testado, tendo sido necessário efetuar alterações na componente de *hardware* para se obter uma normalização dos impulsos de chegada a fim de se evitarem erros na leitura. As alterações efetuadas terminaram num segundo protótipo em que os testes revelaram uma maior consistência nas posições obtidas, tendo-se diminuído o erro global de posição do dispositivo.

A experimentação desenvolvida, permitiu uma análise do desempenho de todo o sistema, e permitiu concluir, que os valores obtidos de posição global apenas diferem num máximo de 0,90 m de raio, encontrando-se dentro dos valores definidos nos objetivos deste trabalho (<1 m).

Por fim, uma das premissas deste trabalho prendeu-se com a necessidade de este ser uma solução de baixo custo. O custo total da solução desenvolvida rondou os 100 € em material, o que prova que esta solução pode ser considerada uma solução de baixo custo,

comparativamente com os milhares de euros de outras soluções encontradas. De salientar, que o dispositivo chamador é baseado numa solução passiva que por si só, terá naturalmente um custo de manutenção nulo devido à não necessidade de qualquer bateria.

Em suma, pode-se então concluir que os objetivos propostos foram alcançados, tendo-se obtido o resultado esperado na solução proposta, desenvolvida e testada.

7.2 Trabalho futuro

Apesar dos objetivos terem sido atingidos, existem alguns aspetos neste trabalho que têm espaço a melhorias. O primeiro aspeto prende-se com a redução do erro, onde será necessária uma análise mais profunda do sistema, a fim de serem entendidas as razões para os valores obtidos e conseguir-se diminuir o erro para alguns centímetros.

Um outro aspeto de melhoria prende-se com a possibilidade de utilização do sistema para um maior número de sensores (distribuição em malha), levando a que os algoritmos de cálculo possam ser distribuídos numa rede e aumentando a área de cobertura do sistema. Por outro lado, era importante permitir um aumento do espaço de localização com apenas os 4 sensores existentes, percebendo qual o valor máximo com o atual sistema. Com a instalação efetuada no laboratório utilizado, não foi possível estabelecer qual seria esse valor.

Por último, era importante uma análise à posição e direcionabilidade dos microfones utilizados, para saber com pormenor se a sua posição poderá aumentar a precisão da leitura. Os testes efetuados no primeiro protótipo do sensor desenvolvido não revelou grande influência, mas não foram efetuados testes após a instalação do sistema no teto do laboratório.

Referências

- [1] M. Ocaña, L. M. Bergasa, M. A. Sotelo, J. Nuevo e R. Flores, "Indoor Robot Localization System Using WiFi Signal Measure and Minimizing Calibration Effort," em *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2005. ISIE 2005.*, 2005.
- [2] G. R. a. L. Z. Kirti Chawla, "Object Localization Using RFID," Department of Computer Science, University of Virginia, Charlottesville, Virginia, 22904, USA, 2010.
- [3] C. Technologies, "Real Time Location Systems," 11 2009. [Online]. Available: <http://www.nottingham.ac.uk/grace/documents/resources/marketreports/realtimelocati onsystems09.pdf>. [Acedido em 2013].
- [4] N. B. Priyantha, "Providing Precise Indoor Location Information to Mobile Devices," pp. 12-15, Janeiro 2001.
- [5] N. B. Priyantha, "The Cricket Indoor Location System," pp. 53-54, Junho 2005.
- [6] W. M. Hartmann, B. Rakerd, E. Macaulay, M. Henry e Y. J. Cho, "LOCALIZATION OF SOUND SOURCES," Michigan State Acoustics/Psychoacoustics, [Online]. Available: <http://www.pa.msu.edu/acoustics/loc.htm>. [Acedido em 2013].
- [7] W.M.Hartmann, "Localization of sound in rooms," 1983. [Online]. Available: <http://www.pa.msu.edu/acoustics/rooms1.pdf>. [Acedido em 2013].
- [8] W. M. Hartmann e Z. A. Constan, "Interaural level differences and the level-meter model," 2002. [Online]. Available: <http://www.pa.msu.edu/acoustics/levelmeter.pdf>. [Acedido em 2013].
- [9] J.-Y. Lee, S.-y. Chi, J.-Y. Lee, M. Hahn e Y.-J. Cho, "REAL-TIME SOUND LOCALIZATION USING TIME DIFFERENCE FOR HUMAN ROBOT INTERACTION," 2005. [Online]. Available: <http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/ifac2005/Fullpapers/03863.pdf>. [Acedido em 2013].
- [10] J. Huang, N. Ohnishi e N. Sugie, Sound localization in reverberant environment based on the model of the precedence effect, vol. 46, *EEE Trans. Instrum, and Meas*, 1997 , pp. 842 -846 .

- [11] “Inventors & Inventions,” 2008. [Online]. Available: <http://www.design-technology.info/inventors/page29.htm>. [Acedido em 2013].
- [12] M. Bouet e A. L. d. Santos, “RFID Tags: Positioning Principles and Localization Techniques,” em *Wireless Days, 2008. WD '08. 1st IFIP*, 2008.
- [13] “Aparelhos auditivos,” [Online]. Available: <http://www.aparelhosauditivosecia.com.br/sistema-auditivo.html>. [Acedido em 2013].
- [14] N. Machado, “Aulas de Física e Química,” [Online]. Available: http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f_07.html. [Acedido em 2013].
- [15] R. M. Warren, *Auditory Perception*, Cambridge University Press, 2008.
- [16] “GENERAL CONTEXT,” [Online]. Available: http://peterbremen.com/LL_Recordings.html. [Acedido em 2013].
- [17] “WolframMathWorld,” [Online]. Available: <http://mathworld.wolfram.com/Line-LineIntersection.html>. [Acedido em 2013].
- [18] T. Instruments, “LM124-N/LM224-N/LM324-N/LM2902-N,” 2004. [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm124-n.pdf>. [Acedido em 2013].
- [19] “mbed,” [Online]. Available: <https://mbed.org/handbook/mbed-NXP-LPC1768-Getting-Started>. [Acedido em 2013].
- [20] “Arduino,” [Online]. Available: <http://www.arduino.cc/>. [Acedido em 2013].
- [21] Microsoft, “Visual Studio,” [Online]. Available: <http://msdn.microsoft.com/en-us/vstudio/hh341490.aspx>. [Acedido em 2013].

Apêndices

Apêndice A – Valores completos das diversas variáveis do sistema

Valores completos das diversas variáveis do sistema obtidos nos testes efetuados nas posições referidas. Estão também representadas as variáveis intermédias para o cálculo dos ângulos (bx_y) em radianos.

Centro:

$ang1_2=0.019454$, $ang2_3=-0.027416$, $ang3_4=-0.002452$, $ang4_1=0.016611$

$b1_2=0.186779$, $x1_2_=9.600000$, $y1_2_=3.236779$

$b2_3=-0.167279$, $x2_3_=4.632721$, $y2_3_=0.000000$

$b3_4=-0.023544$, $x3_4_=0.000000$, $y3_4_=3.073544$

$b4_1=0.101338$, $x4_1_=4.698662$, $y4_1_=6.100000$

$x1_2_=9.600000$, $y1_2_=3.236779$, $x2_3_=4.632721$, $y2_3_=0.000000$

$x3_4_=0.000000$, $y3_4_=3.073544$, $x4_1_=4.698662$, $y4_1_=6.100000$

$px_1=4.718878$, $px_2=4.716689$, $px_3=4.749134$, $px_4=4.747797$

$py_1=3.141811$, $py_2=3.061976$, $py_3=3.061897$, $py_4=3.142374$

Na proximidade do sensor 1 (1 metro):

$ang1_2=-0.631798$, $ang2_3=-0.581117$, $ang3_4=0.239044$, $ang4_1=0.884792$

$b1_2=-7.025974$, $x1_2_=9.600000$, $y1_2_=-3.975974$

$b2_3=-4.006277$, $x2_3_=0.793723$, $y2_3_=0.000000$

$b3_4=2.339554$, $x3_4_=0.000000$, $y3_4_=0.710446$

$b4_1=7.451378$, $x4_1_=-2.651378$, $y4_1_=6.100000$

$x1_2_=9.600000$, $y1_2_=-3.975974$, $x2_3_=0.793723$, $y2_3_=0.000000$

$x3_4_=0.000000$, $y3_4_=0.710446$, $x4_1_=-2.651378$, $y4_1_=6.100000$

$px_1=1.888917$, $px_2=1.500482$, $px_3=3.030118$, $px_4=10.135913$

$py_1=1.667554$, $py_2=1.076119$, $py_3=1.448897$, $py_4=-4.368194$

Na proximidade do sensor 2 (1 metro)

ang1_2=0.886326, ang2_3=-0.807616, ang3_4=-0.223240, ang4_1=0.380113

b1_2=11.763528, x1_2_=9.600000, y1_2_=14.813528

b2_3=-6.377269, x2_3_=-1.577269, y2_3_=0.000000

b3_4=-2.179427, x3_4_=0.000000, y3_4_=5.229427

b4_1=2.437214, x4_1_=2.362786, y4_1_=6.100000

x1_2_=9.600000, y1_2_=14.813528, x2_3_=-1.577269, y2_3_=0.000000

x3_4_=0.000000, y3_4_=5.229427, x4_1_=2.362786, y4_1_=6.100000

px₁=-5.733065, px₂=3.143718, px₃=2.981013, px₄=2.404285

py₁=-3.975111, py₂=4.515729, py₃=4.552667, py₄=5.996133

Na proximidade do sensor 3 (1 metro)

ang1_2=0.184137, ang2_3=0.829910, ang3_4=-0.580454, ang4_1=-0.530251

b1_2=1.787971, x1_2_=9.600000, y1_2_=4.837971

b2_3=6.668740, x2_3_=11.468740, y2_3_=0.000000

b3_4=-6.295842, x3_4_=0.000000, y3_4_=9.345842

b4_1=-3.576152, x4_1_=8.376152, y4_1_=6.100000

x1_2_=9.600000, y1_2_=4.837971, x2_3_=11.468740, y2_3_=0.000000

x3_4_=0.000000, y3_4_=9.345842, x4_1_=8.376152, y4_1_=6.100000

px₁=6.758300, px₂=4.421778, px₃=7.424502, px₄=7.395586

py₁=4.308713, py₂=6.445966, py₃=4.476729, py₄=4.427405

Na proximidade do sensor 4 (2 metros)

ang1_2=-0.141713, ang2_3=0.499648, ang3_4=0.491417, ang4_1=-0.760396

b1_2=-1.369628, x1_2_=9.600000, y1_2_=1.680372

b2_3=3.329658, x2_3_=8.129658, y2_3_=0.000000

b3_4=5.138009, x3_4_=0.000000, y3_4_=-2.088009

Valores completos das diversas variáveis do sistema

$b4_1 = -5.802352$, $x4_1 = 10.602352$, $y4_1 = 6.100000$

$x1_2 = 9.600000$, $y1_2 = 1.680372$, $x2_3 = 8.129658$, $y2_3 = 0.000000$

$x3_4 = 0.000000$, $y3_4 = -2.088009$, $x4_1 = 10.602352$, $y4_1 = 6.100000$

$px_1 = 7.010799$, $px_2 = 7.173663$, $px_3 = 5.732002$, $px_4 = 6.780947$

$py_1 = 2.049773$, $py_2 = 1.751402$, $py_3 = 0.979812$, $py_4 = 2.082565$

Apêndice B – Dados completos da experimentação

Sensor	Posição X	Posição Y	t1	t2	t3	t4	px1	py1	px2	py2	px3	py3	px4	py4	px1-	py1-	px2-	py2-	px3-	py3-	px4-	py4-	P1	P2	P3	P4
S1	0	0	305161949	305174123	305184430	305179345	1,19	1,04	0,82	0,39	2,22	0,88	0,37	2,11	1,19	1,04	0,82	0,39	2,22	0,88	0,37	2,11	2,23	1,20	3,10	2,48
S1	0	0	307028855	307041041	307051350	307046218	1,19	1,04	0,80	0,36	2,25	0,87	0,35	2,14	1,19	1,04	0,80	0,36	2,25	0,87	0,35	2,14	2,22	1,16	3,12	2,49
S1	0	0	311097243	311109436	311119541	311114848	1,22	0,99	1,03	0,64	2,03	0,97	0,49	1,95	1,22	0,99	1,03	0,64	2,03	0,97	0,49	1,95	2,21	1,67	3,00	2,44
S1	1	1	39148378	39155008	39164889	39161214	1,71	1,78	1,40	1,19	2,43	1,44	2,44	1,43	0,71	0,78	0,40	0,19	1,43	0,44	1,44	0,43	1,49	0,58	1,87	1,87
S1	1	1	45866755	45874326	45883294	45879554	1,82	1,56	1,66	1,23	2,44	1,43	2,75	1,03	0,82	0,56	0,66	0,23	1,44	0,43	1,75	0,03	1,38	0,89	1,87	1,78
S1	1	1	49212197	49219995	49228734	49225369	1,85	1,51	1,80	1,40	2,31	1,52	2,77	0,96	0,85	0,51	0,80	0,40	1,31	0,52	1,77	0,04	1,35	1,21	1,83	1,82
S1	2	2	77341443	77344306	77350729	77348404	2,55	2,11	2,48	1,89	2,86	1,95	2,82	2,06	0,55	0,11	0,48	0,11	0,86	0,05	0,82	0,06	0,67	0,59	0,91	0,88
S1	2	2	79148376	79151055	79157690	79155349	2,53	2,15	2,44	1,88	2,86	1,94	2,81	2,10	0,53	0,15	0,44	0,12	0,86	0,06	0,81	0,10	0,68	0,56	0,92	0,91
S1	2	2	80790708	80793665	80800301	80797961	2,51	2,10	2,44	1,88	2,83	1,94	2,79	2,05	0,51	0,10	0,44	0,12	0,83	0,06	0,79	0,05	0,62	0,56	0,89	0,84
S2	0	5,2	105051398	105039281	105056822	105061676	0,47	3,21	2,11	4,27	0,91	4,67	1,20	4,16	0,47	1,99	2,11	0,93	0,91	0,53	1,20	1,04	2,46	3,04	1,44	2,24
S2	0	5,2	106947092	106934977	106952952	106957338	0,71	3,52	1,82	4,18	1,07	4,41	1,21	4,16	0,71	1,68	1,82	1,02	1,07	0,79	1,21	1,04	2,39	2,84	1,86	2,24
S2	0	5,2	109025839	109013733	109031277	109036097	0,47	3,21	2,10	4,26	0,93	4,65	1,20	4,16	0,47	1,99	2,10	0,94	0,93	0,55	1,20	1,04	2,46	3,03	1,48	2,24
S2	1	4,2	125213830	125206008	125218794	125222606	2,85	4,30	2,46	3,79	1,70	3,99	1,84	3,69	1,85	0,10	1,46	0,41	0,70	0,21	0,84	0,51	1,95	1,87	0,91	1,34
S2	1	4,2	127876794	127868940	127881979	127885376	2,82	4,29	2,34	3,68	1,84	3,80	1,87	3,72	1,82	0,09	1,34	0,52	0,84	0,40	0,87	0,48	1,91	1,85	1,24	1,35
S2	1	4,2	130750113	130742292	130755348	130758786	2,80	4,27	2,35	3,70	1,81	3,82	1,86	3,71	1,80	0,07	1,35	0,50	0,81	0,38	0,86	0,49	1,87	1,85	1,18	1,35
S2	2	3,2	151082716	151080456	151087080	151088684	2,82	3,02	2,83	3,05	2,63	3,07	2,66	3,00	0,82	0,18	0,83	0,15	0,63	0,13	0,66	0,20	1,00	0,98	0,76	0,86
S2	2	3,2	152949877	152947622	152954477	152955842	2,79	3,02	2,78	2,99	2,66	3,00	2,66	3,00	0,79	0,18	0,78	0,21	0,66	0,20	0,66	0,20	0,97	0,99	0,86	0,86
S2	2	3,2	154680024	154677553	154684604	154685983	2,78	3,06	2,76	2,99	2,66	3,00	2,65	3,03	0,78	0,14	0,76	0,21	0,66	0,20	0,65	0,17	0,93	0,97	0,85	0,81
S3	7,1	5,2	9336027	9331136	9313644	9325686	4,97	4,28	6,64	3,18	5,90	4,13	6,23	4,70	2,13	0,92	0,46	2,02	1,20	1,07	0,87	0,50	3,06	2,47	2,27	1,37
S3	7,1	5,2	12038772	12033874	12016391	12028457	4,96	4,28	6,65	3,17	5,90	4,14	6,22	4,70	2,14	0,92	0,45	2,03	1,20	1,06	0,88	0,50	3,06	2,47	2,26	1,37
S3	7,1	5,2	17377049	17372132	17354664	17366968	4,95	4,28	6,71	3,13	5,89	4,24	6,13	4,68	2,15	0,92	0,39	2,07	1,21	0,96	0,97	0,52	3,07	2,46	2,17	1,49

Apêndice B

S3	6,1	4,2	57312752	57307870	57295187	57303194	4,40	4,08	4,15	4,41	5,42	3,63	5,91	4,59	1,70	0,12	1,95	0,21	0,68	0,57	0,19	0,39	1,81	2,16	1,25	0,58
S3	6,1	4,2	59444835	59439763	59426827	59434688	4,39	4,14	4,26	4,30	5,52	3,55	6,21	4,78	1,71	0,06	1,84	0,10	0,58	0,65	0,11	0,58	1,77	1,95	1,23	0,69
S3	6,1	4,2	61728932	61723636	61710717	61718765	4,34	4,20	4,17	4,41	5,54	3,57	6,29	4,92	1,76	0,00	1,93	0,21	0,56	0,63	0,19	0,72	1,76	2,14	1,20	0,92
S3	5,1	3,2	75743688	75742388	75735004	75737307	4,39	2,97	4,38	3,01	4,51	2,99	4,51	2,98	0,71	0,23	0,72	0,19	0,59	0,21	0,59	0,22	0,93	0,91	0,79	0,81
S3	5,1	3,2	77860098	77858813	77851391	77853905	4,40	2,97	4,37	3,06	4,49	3,03	4,47	2,98	0,70	0,23	0,73	0,14	0,61	0,17	0,63	0,22	0,93	0,88	0,77	0,85
S3	5,1	3,2	80066221	80064916	80057494	80059828	4,40	2,98	4,38	3,02	4,51	3,00	4,51	2,99	0,70	0,22	0,72	0,18	0,59	0,20	0,59	0,21	0,93	0,90	0,79	0,80
S4	7,1	0	100485776	100491095	100480631	100468379	6,44	0,21	5,95	1,06	6,74	2,12	4,79	0,82	0,66	0,21	1,15	1,06	0,36	2,12	2,31	0,82	0,87	2,21	2,48	3,13
S4	7,1	0	102543538	102548888	102538110	102526129	6,60	0,13	5,97	1,18	6,68	2,08	4,78	0,82	0,50	0,13	1,13	1,18	0,42	2,08	2,32	0,82	0,63	2,31	2,49	3,13
S4	7,1	0	104660488	104665427	104655353	104643085	6,13	0,51	5,88	0,96	6,74	2,11	4,93	0,92	0,97	0,51	1,22	0,96	0,36	2,11	2,17	0,92	1,47	2,18	2,48	3,08
S4	6,1	1	125049565	125053258	125044590	125036551	5,34	1,27	5,26	1,46	4,19	0,80	4,69	1,43	0,76	0,27	0,84	0,46	1,91	0,20	1,41	0,43	1,03	1,30	2,11	1,84
S4	6,1	1	127310858	127314553	127305889	127297843	5,34	1,27	5,26	1,46	4,18	0,80	4,69	1,43	0,76	0,27	0,84	0,46	1,92	0,20	1,41	0,43	1,03	1,30	2,12	1,84
S4	6,1	1	129609207	129612885	129604214	129596175	5,34	1,28	5,26	1,46	4,19	0,80	4,70	1,44	0,76	0,28	0,84	0,46	1,91	0,20	1,40	0,44	1,04	1,30	2,11	1,84
S4	5,1	2	152672936	152674704	152668233	152665619	4,57	2,07	4,54	2,16	4,34	2,12	4,33	2,10	0,53	0,07	0,56	0,16	0,76	0,12	0,77	0,10	0,60	0,71	0,88	0,86
S4	5,1	2	155004008	155005772	155000105	155000121	4,43	2,09	4,28	2,60	4,04	2,60	3,96	2,14	0,67	0,09	0,82	0,60	1,06	0,60	1,14	0,14	0,76	1,42	1,66	1,29
S4	5,1	2	157227439	157229443	157222965	157220390	4,60	1,99	4,54	2,16	4,31	2,12	4,28	2,03	0,50	0,01	0,56	0,16	0,79	0,12	0,82	0,03	0,51	0,72	0,91	0,85
Centro	3,5 5	2,6	31347333	31347462	31347553	31347575	3,54	2,57	3,54	2,61	3,52	2,61	3,52	2,57	0,01	0,03	0,01	0,01	0,03	0,01	0,03	0,03	0,04	0,02	0,04	0,06
Centro	3,5 5	2,6	33046202	33046077	33046009	33046190	3,56	2,63	3,56	2,64	3,55	2,64	3,55	2,63	0,01	0,03	0,01	0,04	0,00	0,04	0,00	0,03	0,04	0,05	0,04	0,03
Centro	3,5 5	2,6	34746201	34746054	34746643	34746158	3,48	2,63	3,47	2,48	3,56	2,49	3,56	2,63	0,07	0,03	0,08	0,12	0,01	0,11	0,01	0,03	0,11	0,19	0,12	0,04
Meio 1_2	0	2,6	295357940	295358191	295371903	295371891	1,27	2,58	1,28	2,60	1,22	2,60	1,23	2,58	1,27	0,02	1,28	0,00	1,22	0,00	1,23	0,02	1,29	1,29	1,22	1,25
Meio 1_2	0	2,6	297092856	297093096	297106819	297106830	1,27	2,58	1,29	2,60	1,20	2,60	1,23	2,58	1,27	0,02	1,29	0,00	1,20	0,00	1,23	0,02	1,29	1,29	1,21	1,25
Meio 1_2	0	2,6	298725286	298725493	298739241	298739229	1,26	2,58	1,27	2,60	1,22	2,60	1,23	2,58	1,26	0,02	1,27	0,00	1,22	0,00	1,23	0,02	1,28	1,28	1,23	1,25
Meio 2_3	3,5 5	5,2	206172140	206164546	206164699	206172236	3,55	4,63	3,55	4,61	3,53	4,62	3,53	4,62	0,00	0,57	0,00	0,59	0,02	0,58	0,02	0,58	0,58	0,59	0,60	0,60
Meio 2_3	3,5 5	5,2	207320754	207313125	207313056	207320629	3,55	4,64	3,55	4,62	3,58	4,61	3,58	4,66	0,00	0,56	0,00	0,58	0,03	0,59	0,03	0,54	0,56	0,58	0,62	0,57
Meio 2_3	3,5 5	5,2	208368629	208361028	208361196	208368730	3,55	4,63	3,55	4,61	3,53	4,62	3,53	4,62	0,00	0,57	0,00	0,59	0,02	0,58	0,02	0,58	0,57	0,59	0,60	0,60
Meio	7,1	2,6	45298483	45298560	45284466	45284531	5,96	2,57	5,92	2,61	5,89	2,61	5,86	2,57	1,14	0,03	1,18	0,00	1,21	0,01	1,24	0,03	1,17	1,18	1,22	1,27

Dados completos da experimentação

3_4																											
Meio 3_4	7,1	2,6	46965990	46966049	46951947	46952034	5,95	2,58	5,92	2,61	5,89	2,61	5,87	2,58	1,15	0,02	1,18	0,01	1,21	0,01	1,23	0,02	1,17	1,18	1,21	1,26	
Meio 3_4	7,1	2,6	48590323	48590389	48576281	48576364	5,96	2,57	5,93	2,61	5,89	2,61	5,86	2,57	1,14	0,03	1,17	0,01	1,21	0,01	1,24	0,03	1,17	1,18	1,21	1,26	
Meio 4_1	3,5 5	0	64315301	64323471	64323498	64315533	3,54	0,36	3,54	0,43	3,55	0,43	3,55	0,36	0,01	0,36	0,01	0,43	0,00	0,43	0,00	0,36	0,37	0,44	0,44	0,36	
Meio 4_1	3,5 5	0	66265612	66273801	66273829	66265867	3,54	0,35	3,54	0,43	3,54	0,43	3,55	0,35	0,01	0,35	0,01	0,43	0,01	0,43	0,00	0,35	0,36	0,44	0,44	0,36	
Meio 4_1	3,5 5	0	67985503	67993679	67993705	67985746	3,54	0,36	3,54	0,43	3,54	0,43	3,55	0,36	0,01	0,36	0,01	0,43	0,01	0,43	0,00	0,36	0,36	0,44	0,44	0,36	

Apêndice C – Código fonte em Microsoft Visual Studio em C#

Código *Visual Studio C#* para o ambiente gráfico no computador pessoal.

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
using System.IO.Ports;

namespace ClickLocalization
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        Bitmap DrawArea;
        double comprimento = 7.1;
        double largura = 5.2;

        public Form1()
        {
            // Inicialização do ambiente
            InitializeComponent();

            DrawArea = new Bitmap(pictureBox1.Size.Width,
pictureBox1.Size.Height);
            pictureBox1.Image = DrawArea;
        }

        private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            //Sair do programa
            this.Close();
        }

        private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
        {
            //Desenhar a sala e abrir porta-série
            desenha_sala();
            serialPort1.DataReceived += new
SerialDataReceivedEventHandler(sp_DataReceived);
            serialPort1.Open();
        }

        void sp_DataReceived(object sender, SerialDataReceivedEventArgs e)
        {
            //Recebe dados da porta-série
            SerialPort sp = (SerialPort)sender;
            string indata = sp.ReadExisting();
            this.Invoke(new DefinirValorListBoxInvoke(DefinirValorListBox), new
object[] { indata });
        }
    }
}

```

```

private void DefinirValorListBox(string strValor)
{
    //Definição de variáveis
    double x;
    double y;
    Random rnd = new Random();
    int red = rnd.Next(1, 255);
    int green = rnd.Next(1, 255);
    int blue = rnd.Next(1, 255);
    Font drawFont = new Font("Arial", 8);
    SolidBrush drawBrush = new SolidBrush(Color.FromArgb(red, green,
blue));

    //Adiciona valores à lista
    listBox1.Items.Add(strValor);

    //Cria variáveis de teste dos valores de entrada
    bool strComprimento = strValor.Length.Equals(10);

    //Testa se os valores de entrada são aceitáveis
    if (strComprimento)
    {
        //Separa valores recebidos por vírgula num vetor
        string[] valores = strValor.Split(',');

        //Converte texto em valores numéricos
        x = Convert.ToDouble(valores[0],
System.Globalization.CultureInfo.InvariantCulture);
        y = Convert.ToDouble(valores[1],
System.Globalization.CultureInfo.InvariantCulture);

        //Adquire a largura e altura da caixa de imagem
        double c = (double)pictureBox1.Width;
        double l = (double)pictureBox1.Height;

        //Define posição do ponto a representar
        int px = (int)(x * c / comprimento);
        int py = (int)(l-(y * l / largura));

        //Desenha quadrado representando o ponto recebido
        Graphics g = Graphics.FromImage(DrawArea);

        Pen mypen = new Pen(Color.FromArgb(red, green, blue));

        g.DrawRectangle(mypen, px, py, 6, 6);

        PointF drawPoint = new PointF((float)px-50, (float)py+7);

        g.DrawString(strValor, drawFont, drawBrush, drawPoint);

        pictureBox1.Image = DrawArea;

        g.Dispose();
    }
}

private delegate void DefinirValorListBoxInvoke(string strValue);

private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
{
    //Limpa a imagem, redesenha a sala e limpa a lista de valores
    pictureBox1.Image = null;
}

```

```
        DrawArea          =          new          Bitmap(pictureBox1.Size.Width,
pictureBox1.Size.Height);
        pictureBox1.Image = DrawArea;
        desenha_sala();
        listBox1.Items.Clear();

    }

    private void desenha_sala()
    {
        //Desenha sala
        Graphics g = Graphics.FromImage(DrawArea);
        Pen mypen = new Pen(Color.Brown);

        // Retângulo da Porta
        g.DrawRectangle(mypen,    pictureBox1.Width-141,pictureBox1.Height-14,
100, 13);

        // Inicializacao do texto
        String strPorta = "Porta";
        String strSensor1 = "S1";
        String strSensor2 = "S2";
        String strSensor3 = "S3";
        String strSensor4 = "S4";

        // Criar fonte e pincel
        Font drawFont = new Font("Arial", 10);
        SolidBrush drawBrush = new SolidBrush(Color.Black);

        // Desenhar porta e sensores
        PointF drawPorta    =    new    PointF(pictureBox1.Width    -    111,
pictureBox1.Height - 15);
        g.DrawEllipse(mypen, 5, pictureBox1.Height - 25, 20, 20); //ponto da
bola
        PointF drawS1 = new PointF(6, pictureBox1.Height - 23);    // ponto
do texto
        g.DrawEllipse(mypen, 5, 5, 20, 20);
        PointF drawS2 = new PointF(6, 7);
        g.DrawEllipse(mypen, pictureBox1.Width - 25, 5, 20, 20);
        PointF drawS3 = new PointF(pictureBox1.Width - 25, 7);
        g.DrawEllipse(mypen, pictureBox1.Width - 25, pictureBox1.Height - 25,
20, 20);
        PointF drawS4 = new PointF(pictureBox1.Width - 25, pictureBox1.Height
- 23);

        // Desenhar o texto no ecrã.
        g.DrawString(strPorta, drawFont, drawBrush, drawPorta);
        g.DrawString(strSensor1, drawFont, drawBrush, drawS1);
        g.DrawString(strSensor2, drawFont, drawBrush, drawS2);
        g.DrawString(strSensor3, drawFont, drawBrush, drawS3);
        g.DrawString(strSensor4, drawFont, drawBrush, drawS4);

        pictureBox1.Image = DrawArea;
        g.Dispose();
    }
}
}
```

Apêndice D – Código fonte para a plataforma MBED

Código em linguagem C++ para a plataforma MBED.

```
#include "mbed.h"

Timer timer;

DigitalOut led1(LED1);
DigitalOut led2(LED2);
DigitalOut led3(LED3);
DigitalOut led4(LED4);

AnalogIn ain1(p15);
AnalogIn ain2(p16);
AnalogIn ain3(p17);
AnalogIn ain4(p18);

Serial pc(USBTX, USBRX);

#define PI 3.1415926535897932384626433832795

Timer t;
long t1, t2, t3, t4;
int s1, s2, s3, s4;
double x, y;
long wd = 01;
long wdl = 01;

InterruptIn isr_a(p5); //definir entradas
InterruptIn isr_b(p6);
InterruptIn isr_c(p7);
InterruptIn isr_d(p8);

void isr_a_interrupt (void) {
    if(t1 == 0)
    {
        t1=t.read_us();
    }
}

void isr_b_interrupt (void) {
    if(t2 == 0)
    {
        t2=t.read_us();
    }
}

void isr_c_interrupt (void) {
    if(t3 == 0)
    {
        t3=t.read_us();
    }
}

void isr_d_interrupt (void) {
    if(t4 == 0)
    {
        t4=t.read_us();
    }
}
```

```
    }
}

double calc_px (double x1, double y1, double x2, double y2, double x3, double y3,
double x4, double y4)
{
    double x1y2 = x1 * y2;
    double y1x2 = y1 * x2;
    double x3_x4 = x3 - x4;
    double x1_x2 = x1 - x2;
    double x3y4 = x3 * y4;
    double y3x4 = y3 * x4;
    //double x1_x2 = x1 - x2;
    double y3_y4 = y3 - y4;
    double y1_y2 = y1 - y2;
    //double x3_x4 = x3 - x4;
    double q1 = (x1y2-y1x2) * x3_x4;
    double q2 = x1_x2 * (x3y4 - y3x4);
    double q3 = x1_x2 * y3_y4;
    double q4 = y1_y2 * x3_x4;
    double final = (q1 - q2)/(q3 - q4);

    return (final);
}

double calc_py (double x1, double y1, double x2, double y2, double x3, double y3,
double x4, double y4)
{
    return (((((x1*y2) - (y1*x2))*(y3-y4)) - ((y1-y2)*((x3*y4) - (y3*x4)))) /
(((x1-x2)*(y3-y4)) - ((y1-y2)*(x3-x4))));
}

void calcular_posicao()
{
    double dif1_2 = 0.0;
    double dif2_3 = 0.0;
    double dif3_4 = 0.0;
    double dif4_1 = 0.0;

    double ang1_2 = 0.0;
    double ang2_3 = 0.0;
    double ang3_4 = 0.0;
    double ang4_1 = 0.0;

    double dx = 7.10;
    double dy = 5.20;
    double sound_speed = 340.0;
    long txdif = 21000; //~(7.10/340)*1000000 (tempo máximo para o som atravessar
o comprimento da sala)
    long tydif = 16000; //~(5.20/340)*1000000 (tempo máximo para o som
atruvessar a largura da sala)

    double x1_2 = 0.0;
    double y1_2 = dy/2.0;
    double x2_3 = dx/2.0;
    double y2_3 = dy;
    double x3_4 = dx;
    double y3_4 = dy/2.0;
    double x4_1 = dx/2.0;
    double y4_1 = 0.0;

    double b1_2 = 0.0;
```

```

double x1_2_ = 0.0;
double y1_2_ = 0.0;

double b2_3 = 0.0;
double x2_3_ = 0.0;
double y2_3_ = 0.0;

double b3_4 = 0.0;
double x3_4_ = 0.0;
double y3_4_ = 0.0;

double b4_1 = 0.0;
double x4_1_ = 0.0;
double y4_1_ = 0.0;

double px1 = 0.0;
double px2 = 0.0;
double px3 = 0.0;
double px4 = 0.0;

double py1 = 0.0;
double py2 = 0.0;
double py3 = 0.0;
double py4 = 0.0;

double asin1_2 = 0.0;
double asin2_3 = 0.0;
double asin3_4 = 0.0;
double asin4_1 = 0.0;

if((abs(t1 - t2) < tydif) && (abs(t2 - t3) < txdif) && (abs(t3 - t4) < tydif)
&& (abs(t1 - t4) < txdif))
{
    dif1_2 = (double)(t1-t2)/1000000.0;
    dif2_3 = (double)(t2-t3)/1000000.0;
    dif3_4 = (double)(t3-t4)/1000000.0;
    dif4_1 = (double)(t4-t1)/1000000.0;

    asin1_2 = dif1_2*sound_speed/dy;
    asin2_3 = dif2_3*sound_speed/dx;
    asin3_4 = dif3_4*sound_speed/dy;
    asin4_1 = dif4_1*sound_speed/dx;

    if(asin1_2<1 && asin1_2>-1 && asin2_3<1 && asin2_3>-1 && asin3_4<1 &&
asin3_4>-1 && asin4_1<1 && asin4_1>-1)
    {
        ang1_2 = asin(asin1_2);/**180.0/PI;
        ang2_3 = asin(asin2_3);/**180.0/PI;
        ang3_4 = asin(asin3_4);/**180.0/PI;
        ang4_1 = asin(asin4_1);/**180.0/PI;

        b1_2 = tan (ang1_2) * dx ;
        x1_2_ = dx;
        y1_2_ = (dy/2.0) + b1_2;

        b2_3 = tan (ang2_3 )* dy;
        x2_3_ = (dx/2.0) + b2_3;
        y2_3_ = 0.0;

        b3_4 = tan (ang3_4) * dx ;
        x3_4_ = 0.0;
        y3_4_ = (dy/2.0) - b3_4;

```

```

    b4_1 = tan (ang4_1)* dy;
    x4_1_ = (dx/2.0) - b4_1;
    y4_1_ = dy;

    px1 = calc_px (x1_2, y1_2, x1_2_, y1_2_, x2_3, y2_3, x2_3_, y2_3_);
    py1 = calc_py (x1_2, y1_2, x1_2_, y1_2_, x2_3, y2_3, x2_3_, y2_3_);

    px2 = calc_px (x2_3, y2_3, x2_3_, y2_3_, x3_4, y3_4, x3_4_, y3_4_);
    py2 = calc_py (x2_3, y2_3, x2_3_, y2_3_, x3_4, y3_4, x3_4_, y3_4_);

    px3 = calc_px (x3_4, y3_4, x3_4_, y3_4_, x4_1, y4_1, x4_1_, y4_1_);
    py3 = calc_py (x3_4, y3_4, x3_4_, y3_4_, x4_1, y4_1, x4_1_, y4_1_);

    px4 = calc_px (x4_1, y4_1, x4_1_, y4_1_, x1_2, y1_2, x1_2_, y1_2_);
    py4 = calc_py (x4_1, y4_1, x4_1_, y4_1_, x1_2, y1_2, x1_2_, y1_2_);

    if(t1<t2 && t1<t3 && t1<t4)
    {
        x = px2;
        y = py2;
    }
    else if(t2<t1 && t2<t3 && t2<t4)
    {
        x = px3;
        y = py3;
    }
    else if(t3<t1 && t3<t2 && t3<t4)
    {
        x = px4;
        y = py4;
    }
    else if(t4<t1 && t4<t2 && t4<t3)
    {
        x = px1;
        y = py1;
    }

    if(x < -1 || x > dx + 1 || y < -1 || y > dy + 1)
    {
        x = -1;
        y = -1;
    }
}
}
}

int main() {
    int flag = 0;

    pc.printf("ClickLocalization V1.0 - Inicializando ...\n\r");

    isr_a.mode(PullUp);
    isr_b.mode(PullUp);
    isr_c.mode(PullUp);
    isr_d.mode(PullUp);

    wait(.01);

    isr_a.rise(&isr_a_interrupt);
    isr_b.rise(&isr_b_interrupt);
    isr_c.rise(&isr_c_interrupt);

```

```
isr_d.rise(&isr_d_interrupt);

t.start();
t1=t2=t3=t4=01;
s1=s2=s3=s4=0;
wd1 = t.read();

while(1) {
    if(t1!=0 || t2!=0 || t3!=0 || t4!=0)
    {
        if(wd == 0 && flag == 0)
            wd=t.read_ms();
        else if(wd > 0 && wd < t.read_ms() + 50)
        {
            if(t1!=0 && t2!=0 && t3!=0 && t4!=0)
            {
                calcular_posicao();
                if((x == 0.0 && y == 0.00)|| (x == -1.0 && y == -1.00))
                    pc.printf("");
                else
                    pc.printf("%.21f,%.21f\r", x, y);
                t1=t2=t3=t4=01;
                wd = 0;
                flag = 1;
                x = y = 0.0;
            }
        }
    }
    if(t.read() - wd1 > 1)
    {
        led1=!led1;

        wd1 = t.read();
        t1=t2=t3=t4=01;
        wd = 01;
        flag = 0;
    }
}
}
```