

## Localização de Precisão Usando Redes Sem Fios Enterradas

**JOSÉ CARLOS FERREIRA VENANCIO**

Outubro de 2015

# LOCALIZAÇÃO DE PRECISÃO USANDO REDES SEM FIOS ENTERRADAS

José Carlos Ferreira Venâncio



Departamento de Engenharia Eletrotécnica  
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Área de Especialização em Telecomunicações

**2015**



Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de  
Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: José Carlos Ferreira Venâncio, Nº 1080490, 1080490@isep.ipp.pt

Orientação científica: Jorge Botelho da Costa Mamede, JBM@isep.ipp.pt

Empresa: Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores – Tecnologia e Ciência  
(INESC TEC)

Supervisão: Rui Lopes Campos, rcampos@inesctec.pt

Supervisão: José Carlos Marques Pedreira de Oliveira, jcpo@inesctec.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica  
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Área de Especialização em Telecomunicações

**2015**



“Tudo o que você quer na vida está fora da sua zona de conforto”



## *Agradecimentos*

Gostaria de agradecer ao meus pais, à minha irmã e ao meu cunhado por toda a ajuda e apoio que me têm dado durante todos estes anos. Também gostaria de agradecer aos meus orientadores Eng.º Jorge Mamede, Eng.º Rui Campos e Eng.º José Oliveira pela sua disponibilidade para me ajudar e tirar qualquer dúvida que tenha tido durante a realização desta tese/dissertação. Por fim, mas não menos importante, aos meus amigos e colegas de curso, Artur Costa, João Ribeiro, Miguel Macedo, Nuno Carvalho, Pedro Ribeiro e Pedro Salazar, que me ajudaram e aturaram durante estes anos de Licenciatura e Mestrado e que de uma maneira ou outra fizeram toda a diferença no meu percurso académico.





## *Resumo*

As Redes Sem Fios Enterradas (*Wireless Underground Networks* - WUN) são formadas por nós que comunicam entre si através de ligações sem fios e têm como meio de propagação o solo. Os sistemas de localização mais utilizados atualmente têm desvantagens ao nível da precisão e o custo.

Nesta tese é proposta uma solução de localização de precisão que recorre à utilização de redes sem fios enterradas e um algoritmo de posicionamento baseados em Wi-Fi. O objetivo é estimar a localização de objetos, utilizando dispositivos Wi-Fi de baixo custo. Os resultados experimentais obtidos demonstram que o erro de localização é inferior a 0,40 m, e que esta solução é viável para, por exemplo, localizar jogadores num campo de futebol ou localizar um objeto num campo agrícola.

### *Palavras-Chave*

*Wireless Underground Networks* (WUN), Posicionamento, Wi-Fi, *Search Nearest Neighbor*.



## *Abstract*

Wireless Networks Underground (WUN) are formed by nodes that communicate with each other via wireless links and have as propagation medium the soil. Current positioning systems have disadvantages in terms of accuracy and cost.

This thesis proposes an accurate positioning solution that makes use of wireless underground networks based on Wi-Fi, and a positioning algorithm. The objective is to estimate the location of an object using inexpensive Wi-Fi devices. The experimental results show that the localization error is less than 0.40 m, and the feasibility of the proposed solution, for example, to locate players in a football pitch or locate an object in a farm field.

### ***Keywords***

Wireless Underground Networks (WUN), Positioning, Wi-Fi, Search Nearest Neighbor.



## *Résumé*

Réseaux sans fil enterré (*Wireless Underground Networks* (WUN)) sont formés par des noeuds qui communiquent les uns avec les autres via des liaisons sans fil et ont comme moyen de répandre le sol. La plupart des systèmes de localisation actuellement utilisés présentent des inconvénients, y compris la niveau de précision et de coût.

Cette thèse propose une solution de précision de localisation qui permet l'utilisation des réseaux sans fil souterrains basées sur Wi-Fi, et un algorithme de positionnement également basée sur Wi-Fi. L'objectif est d'estimer l'emplacement d'un objet à l'aide appareils peu coûteux. Les résultats expérimentaux montrent que l'erreur de localisation est inférieur à 0,40 m, et la faisabilité de la solution proposée par exemple, localiser des joueurs dans un terrain de football ou de localiser un objet dans un champ agricole.

### ***Mots-clés***

*Wireless Underground Networks* (WUN), positionnement, Wi-Fi, *Search Nearest Neighbor*.



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO.....	1
1.2.OBJETIVOS .....	2
1.3.CALENDARIZAÇÃO.....	2
1.4.ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....	2
<b>2. ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>3</b>
2.1.WIRELESS UNDERGROUND NETWORKS .....	3
2.2.WUN UTILIZANDO ONDAS ELETROMAGNÉTICAS .....	5
2.2.1.MODELO DE PROPAGAÇÃO U2U.....	6
2.2.2.COMUNICAÇÃO U2U COM ONDAS LATERAIS .....	8
2.2.3.MODELO DE PROPAGAÇÃO U2A.....	9
2.2.4.MODELO DE PROPAGAÇÃO A2U.....	11
2.3.WUN UTILIZANDO INDUÇÃO MAGNÉTICA (IM) .....	12
2.4.CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS .....	13
2.5.LOCALIZAÇÃO .....	14
2.5.1.RECEIVED SIGNAL STRENGTH (RSS).....	14
2.5.2.TIME OF ARRIVAL (TOA).....	15
2.5.3.TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL (TDOA) .....	16
2.5.4.ANGLE OF ARRIVAL (AOA) .....	17
2.5.5.ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO .....	19
2.6.POSICIONAMENTO UTILIZANDO O RSS.....	19
2.6.1.MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO RSS.....	20



2.6.2.POSICIONAMENTO UTILIZANDO A TRIANGULAÇÃO .....	20
2.6.3.LOCALIZAÇÃO RSS RECORRENDO À UTILIZAÇÃO DE BASE DE DADOS.....	22
2.6.4.ALGORITMO SEARCH NEAREST NEIGHBOR.....	23
2.6.5.MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO RSS UTILIZANDO INTERFERÊNCIA BAYESIAN .....	28
<b>3. SOLUÇÃO PROPOSTA E IMPLEMENTAÇÃO .....</b>	<b>27</b>
3.1.SOLUÇÃO IMPLEMENTADA .....	27
3.2.ARQUITETURA DO SISTEMA .....	28
3.3.HARDWARE UTILIZADO.....	29
3.4.SOFTWARE UTILIZADO .....	31
3.5.AMBIENTE EXPERIMENTAL.....	31
3.6.VALORES TEÓRICOS E REAIS EM CADA PONTO DE REFERÊNCIA .....	34
<b>4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>37</b>
4.1.ANÁLISE DE RESULTADOS .....	37
4.2.ALTERAÇÕES DOS VALORES DE RSS AO LONGO DO TEMPO.....	41
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>43</b>
<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....</b>	<b>45</b>

## Índice de Figuras

Figura 1 Arquitetura de um nó de uma WUN [2]	4
Figura 2 Modelo de dois raios [9]	7
Figura 3 As três ondas eletromagnéticas numa comunicação U2U [10]	8
Figura 4 Modelo U2A [11]	9
Figura 5 Modelo A2U [11]	11
Figura 6 Modelo de Comunicação MI [15]	12
Figura 7 Triângulo da textura do solo [6]	13
Figura 8 Diagrama de blocos de um sistema de posicionamento <i>wireless</i> [17]	14
Figura 9 RSS em função da distância [20]	15
Figura 10 Localização utilizando a técnica TDOA [20]	16
Figura 11 Diagrama de radiação horizontal de uma antena anisotrópica típica [20]	17
Figura 12 Agrupamento de antenas com N elementos [20]	18
Figura 13 Posicionamento utilizando a intersecção de círculos [18]	20
Figura 14 As duas fases de localização <i>fingerprinting</i> (a) fase <i>off-line</i> (b) fase <i>on-line</i> [19]	22
Figura 15 Mapa de contornos com um AP [18]	24
Figura 16 Simulação de localização de uma WLAN [18]	25
Figura 17 Arquitetura do sistema	28
Figura 18 TP-LINK TL-WN722N [30]	29

Figura 19 Método de recepção de RSS dos 4 nós	30
Figura 20 Local de realização das experiências com os respectivos pontos de referência e suas coordenadas	32
Figura 21 RSS teórico e real em cada ponto de referência em cada AP	35
Figura 22 Erro em cada um dos pontos aleatórios utilizando 2 vizinhos	39
Figura 23 Erro em cada um dos pontos aleatórios utilizando 3 vizinhos	39
Figura 24 Erro em cada um dos pontos aleatórios utilizando 4 vizinhos	40
Figura 25 Erro em cada um dos pontos aleatórios utilizando 5 vizinhos	40
Figura 26 Mediana do erro em função do n.º de vizinhos	41
Figura 27 Variação do RSS de cada AP em cada ponto de referência ao longo do dia	42

## *Índice de Tabelas*

Tabela 1	Calendarização da Tese	2
Tabela 2	RSS em dBm para cada ponto de referência dos três APs	25
Tabela 3	RSS normalizados ao RSS do AP1 para cada ponto de referência	25
Tabela 4	Distância métrica entre o RSS normalizado da base de dados com o RSS normalizado do objeto	26
Tabela 5	Especificações Wireless do TP-LINK TL-WN722N	30
Tabela 6	Especificações ambientais e físicas do TP-LINK TL-WN722N	31
Tabela 7	RSS em dBm para cada ponto de referência dos 4 APs e respectivas coordenadas	32
Tabela 8	RSS normalizados ao RSS do AP1 para cada ponto de referência	33
Tabela 9	Normalização do ponto aleatório em dBm	33
Tabela 10	Distância métrica entre o RSS normalizado da base de dados com o RSS normalizado do ponto aleatório	33
Tabela 11	Constante dielétrica do solo para o VWC=5%	34
Tabela 12	Coordenadas e erros em metros (m) utilizando os vários números de vizinhos	38



## *Acrónimos*

AOA	–	Angle of Arrival
AP	–	Access Point
A2U	–	Aboveground-to-Underground
dBm	–	dB miliwatt
ESPIRIT	–	Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques
ESSID	–	Extended Service Set Identification
GPS	–	Global Positioning System
IM	–	Indução Magnética
MUSIC	–	Multiple Signal Classification
OE	–	Ondas Eletromagnéticas
RF	–	Rádio Frequência
RSS	–	Received Signal Strength
RTT	–	Round-Trip Time
TDOA	–	Time Difference of Arrival
TOA	–	Time of Arrival
U2A	–	Underground-to-Aboveground
U2U	–	Underground-to-Underground

- VWC – Volumetric Water Content
- WSN – Wireless Sensor Networks
- WUN – Wireless Underground Networks
- WUSN – Wireless Underground Sensor Networks







# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

Os sistemas de localização têm ganho importância na última década para a localização de pessoas, veículos, animais e objetos. O sistema GPS (*Global Positioning System*) é hoje o mais utilizado, no entanto não é adequado para todas as aplicações. Para além de funcionar apenas em ambientes exteriores, possui precisão limitada e é sensível a variações súbitas das condições de propagação do sinal, que se traduzem em informação de localização imprecisa. Devido a estas limitações, têm sido desenvolvidos sistemas de localização complementares, sendo que as classes mais utilizadas são as seguintes: localização baseada em vídeo e localização baseada em Rádio Frequência (RF). A primeira classe tem sido nos últimos anos utilizada, por exemplo, para seguimento de jogadores nos jogos da UEFA Champions League, enquanto a segunda tem sido principalmente utilizada em ambientes interiores, para seguimento de pessoas, tipicamente recorrendo a Wi-Fi. Ambos os sistemas têm ainda assim desvantagens. Os sistemas de localização de vídeo têm custo elevado e são computacionalmente exigentes; os sistemas de posicionamento RF têm tradicionalmente baixa precisão.

Nesta tese pretende-se desenvolver um sistema de localização de precisão recorrendo a uma WUN (*Wireless Underground Network*).

## 1.2. OBJETIVOS

Esta tese teve como objetivo principal a localização de objetos através de redes Wi-Fi enterradas. Para isso, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Estudo de aplicações, topologias e princípios de funcionamento de redes Wi-Fi enterradas;
- Estudo dos diferentes algoritmos de posicionamento utilizando redes Wi-Fi;
- Caracterização do problema e definição da solução proposta;
- Avaliação experimental da solução proposta;

## 1.3. CALENDARIZAÇÃO

No cronograma da Tabela 1 são apresentadas as tarefas realizadas ao longo desta tese.

**Tabela 1 Calendarização da Tese**

Mês	Outubro					Novembro					Dezembro					Janeiro					Fevereiro					Março					Abril					Maio					Junho					Julho					Agosto					Setembro				
Semana	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5													
Familiarização com os objetivos da tese																																																												
Estudo sobre redes Wi-Fi enterradas																																																												
Estudo sobre Localização																																																												
Escrita do estado da arte																																																												
Estudo da melhor solução																																																												
Configuração do Material para implementação																																																												
Implementação e experiências																																																												
Escrita da tese																																																												
Escrita de artigo																																																												

## 1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

O Capítulo 1 faz uma introdução ao trabalho efetuado. No Capítulo 2 é apresentado o estado da arte relativamente às aplicações, topologias, princípios de funcionamento de redes Wi-Fi enterradas e algoritmos de posicionamento utilizando redes Wi-Fi. No Capítulo 3 é caracterizado o problema a resolver, e apresentada a solução. O Capítulo 4 inclui os resultados experimentais obtidos, utilizando a solução proposta. No capítulo 5 são tecidas as principais conclusões desta tese, assim como identificados alguns dos possíveis trabalhos futuros.

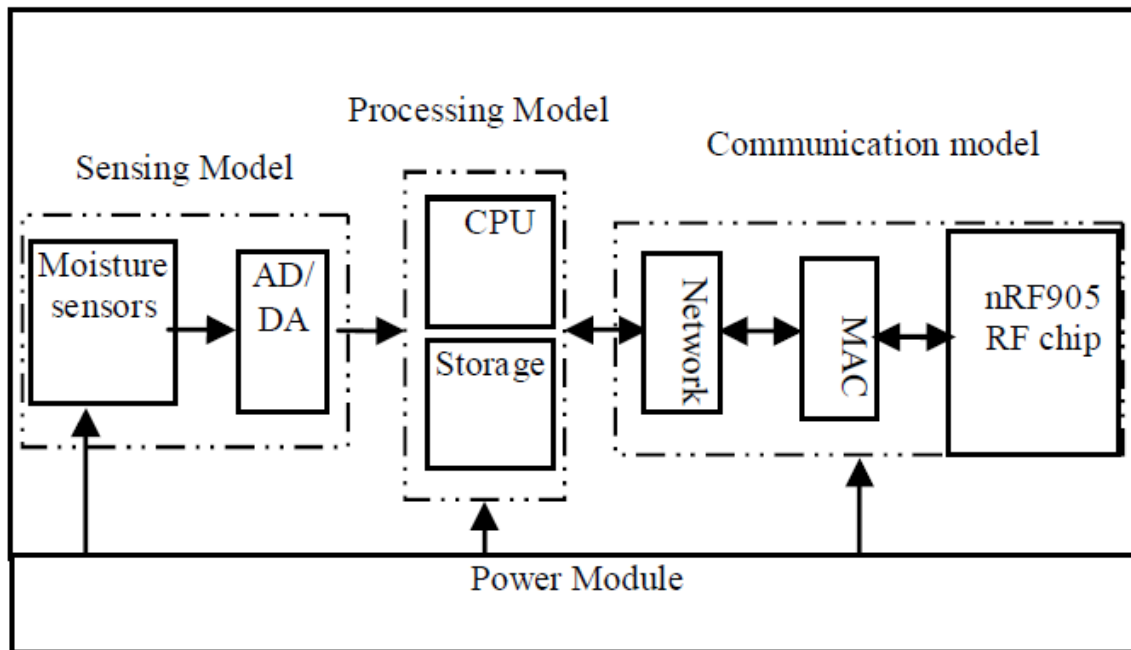
## 2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo é abordado o estado da arte das *Wireless Underground Networks* (WUN) e dos algoritmos de localização baseados em Wi-Fi. É apresentada a definição de uma WUN, assim como algumas das suas aplicações e os tipos de comunicações possíveis e os respectivos modelos de propagação. Além disso, são apresentadas as técnicas de localização baseadas em Rádio Frequência (RF) existentes, assim como os algoritmos de localização que utilizam essas técnicas, dando especial importância ao algoritmo *Search Nearest Neighbor*, o algoritmo utilizado nesta tese.

### 2.1. WIRELESS UNDERGROUND NETWORKS

As WUN são formadas por nós que estão tipicamente localizados debaixo de terra e que utilizam tecnologias sem fios para comunicar com outros nós enterrados ou à superfície. Numa WUN há a particularidade do meio de comunicação ser o solo, podendo esta comunicação ser *underground-to-underground* (U2U), quando os dois nós estão enterrados e o único meio de propagação é o solo, *underground-to-aboveground* (U2A), quando a informação é enviada a partir do nó enterrado para o nó que está à superfície e *aboveground-to-underground* (A2U), quando o transmissor está à superfície e o recetor está enterrado. Uma vez que o meio de propagação é o solo, é necessário definir novos modelos de propagação rádio. As implementações WUN são baseadas em redes de

sensores sem fios (*Wireless Sensor Networks* – WSN). A este novo tipo de redes dá-se o nome de redes de sensores sem fios enterradas (*Wireless Underground Sensor Networks* – WUSN). Esta tecnologia é utilizada, por exemplo, em aplicações de monitorização remota [1]. Na Figura 1 é possível ver um exemplo de arquitetura de um nó de uma WUN.



**Figura 1 Arquitetura de um nó de uma WUN [2]**

As WUN têm diversas aplicações [3]: na agricultura, em campos de golfe ou em campos de futebol, podendo ser usadas para monitorizar parâmetros como o teor de água, o teor de minerais e a temperatura nos solos, através de nós enterrados que transmitem a informação em tempo real para um ou mais dispositivos acima do solo. Além disso, também podem ser utilizadas para monitorizar a presença e a concentração de substâncias tóxicas no solo em áreas de elevado risco de poluição.

As WUN têm utilidade em minas, em estradas e em túneis sendo que neste caso o meio de propagação é o ar; a propagação do sinal é feita a partir de espaços vazios existentes no solo [4][5]. Neste ambiente os canais de comunicação dependem de vários parâmetros, tais como o tamanho do túnel, a estrutura da mina, as características das antenas, e as propriedades dielétricas das paredes. Este tipo de WUN tem sido até hoje o mais estudado no âmbito das redes sem fios enterradas, apesar de o meio de propagação ser o ar.

As WUN têm como grande vantagem a facilidade de implementação, visto que não são necessárias ligações físicas (cabos) para estabelecer comunicação entre os nós. As WUN

podem ser implementadas através de ondas eletromagnéticas (OE) ou por indução magnética (IM) para transmitir informações entre os nós [3].

## 2.2. WUN UTILIZANDO ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

As ondas eletromagnéticas são a tecnologia mais utilizada para estabelecer comunicações sem fios. A propagação destas ondas em espaço livre pode ser aproximada pela seguinte expressão, a que se dá o nome de equação de Friis:

$$\frac{P_r}{P_t} \approx G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (1)$$

em que  $P_R$  é a potência recebida,  $P_T$  a potência transmitida,  $G_t$  e  $G_r$  são os ganhos das antenas transmissoras e das antenas recetoras respetivamente, o  $\lambda$  é o comprimento de onda e o  $r$  a distância entre a fonte e o recetor.

Quando as comunicações são feitas através do solo, as OE têm outro tipo de comportamento, uma vez que as propriedades de propagação são diferentes. A propagação de uma OE através do solo irá depender das características do meio, como a permissividade, permeabilidade e a condutividade elétrica, sendo que estas dependem do teor de água existente no solo. Algumas das causas para que haja atenuação de uma onda rádio quando esta se propaga através do solo, irá depender das características do solo, como a composição, densidade e textura [7].

Nas comunicações subterrâneas U2U, U2A e A2U os meios de propagação são o solo e o ar. Os nós que se encontram à superfície ou que se encontram enterrados podem ter funcionalidades como aquisição de dados, gestão de redes e retransmissão de dados.

A superfície do solo, ou seja, a interface entre o solo e o ar, pode ter bastante impacto nas WUN. Devido a este impacto as comunicações U2U têm dois caminhos principais. O primeiro é o caminho direto entre os dois nós enterrados, que é por onde é feita a comunicação. O segundo caminho é a reflexão na superfície do solo, que apenas afeta comunicações com pouca profundidade. No caso das comunicações U2A e A2U o sinal terá de ultrapassar a superfície do solo, o que poderá provocar níveis elevados de reflexão e de atenuação, prejudicando a comunicação. Este tipo de efeitos irá depender da direção da comunicação, isto é, no caso de uma comunicação U2A, o sinal irá atravessar em primeiro

lugar o solo e depois o ar, ou seja irá passar de um meio com um índice de reflexão mais alto, para um meio com um índice de reflexão mais baixo, que irá ter uma menor atenuação do que uma comunicação em sentido contrário que é o caso da comunicação A2U [5][7].

### 2.2.1. MODELO DE PROPAGAÇÃO U2U

Neste modelo, foi acrescentado à equação de Friis em espaço aberto, um fator que representa a atenuação do sinal quando se propaga através do solo [8][9]. A potência do sinal recebido é apresentada da seguinte forma:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_p \quad (2)$$

em que  $P_t$  é a potência transmitida,  $G_t$  e  $G_r$  são os ganhos das antenas que transmitem e que recebem respectivamente, em que  $L_p = L_0 + L_s$ , o  $L_0$  é o *path loss* em espaço livre que é dado pela seguinte expressão:

$$L_0 = 32,4 + 20\log(d) + 20\log(f) \quad (3)$$

em que  $d$  é a distância entre o emissor e o recetor e  $f$  é a frequência de operação em MHz. Para a propagação do solo é necessário incluir um fator de correção tendo em conta o solo, que irá adicionar alguma atenuação. O  $L_s$  é o *path loss* adicional no solo, que é calculado da seguinte maneira:

$$L_s = L_\beta + L_\alpha = 154 - 20\log(f) + 20\log(\beta) + 8,69\alpha d \quad (4)$$

Em que  $d$  é a distância entre o emissor e o recetor,  $\alpha$  trata-se da constante de atenuação do solo, e  $\beta$  é a constante de mudança de fase,  $\alpha$  e  $\beta$  dependem da frequência do sinal, da permeabilidade magnética e da constante dielétrica do solo, que por sua vez vai variando com as propriedades do solo. Assim, o RSS (*Received Signal Strength*) é descrito da seguinte forma:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - (L_0 + L_s) \quad (5)$$

Em que  $L_p$  de uma onda eletromagnética é calculado da seguinte maneira:

$$L_p = 6,4 + 20\log(d) + 20\log(\beta) + 8,9\alpha d \quad (6)$$

O *path loss* total em dB para o modelo de propagação direto pode ser expresso da seguinte maneira:

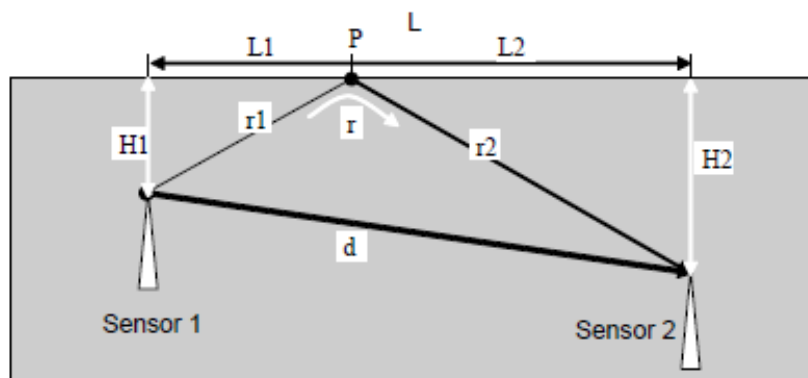
$$P_{sl}dB = 6,4 + 20\log(d) + 20\log(\beta) + 8,69\alpha d - 10\log(G_a G_b) \quad (7)$$

Com a constante dielétrica complexa do solo estimada ( $\epsilon' - j\epsilon''$ ), mais a permeabilidade magnética do solo ( $\mu$ ) é possível o cálculo da constante de propagação  $\gamma = \alpha + j\beta$ , em que  $\alpha$  é a constante de atenuação e  $\beta$  é a constante de fase para uma determinada frequência angular ( $\omega$ ), utilizando as seguintes equações:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon'}{2}} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right] \quad (8)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon'}{2}} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} + 1 \right] \quad (9)$$

Utilizando a equação (7) é possível obter uma aproximação da atenuação em decibéis entre o emissor e o receptor quando estes estão enterrados. No entanto quando se estima o *path loss* total no canal enterrado, também deve-se ter em conta a onda refletida que resulta da superfície do solo. Na Figura 2 é possível ver uma representação do modelo de dois raios.



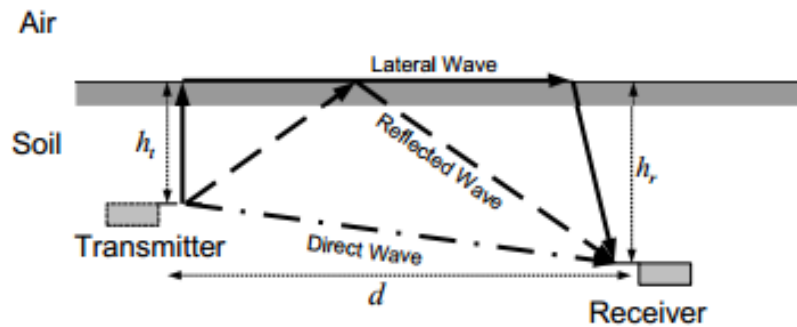
**Figura 2 Modelo de dois raios [9]**

Esta onda refletida tem um maior efeito quando a profundidade dos nós enterrados é menor, uma vez que neste caso o sinal refletido tem uma distância mais reduzida para percorrer. Por isso mesmo, esta componente de sinal é necessária para se poder estimar o *path loss* do sinal.



### 2.2.2. COMUNICAÇÃO U2U COM ONDAS LATERAIS

Como já foi referido no modelo de propagação que estima a perda do percurso no canal enterrado, considera duas ondas fundamentais de propagação do sinal sendo elas as seguintes: a de onda direta e a de onda refletida. No caso da onda direta resulta da linha de vista entre os dois nós. No caso da onda refletida resulta da reflexão na interface solo - ar. Quando os nós se encontram enterrados perto da superfície, existe uma outra onda importante na propagação da perda de percurso entre esses dois nós a que se dá o nome de onda lateral [10]. Na Figura 3 é possível ver essas três ondas representadas.



**Figura 3** As três ondas eletromagnéticas numa comunicação U2U [10]

Como se pode ver pela Figura 3 a onda lateral propaga-se pelo solo, de seguida vai para o ar e logo a seguir volta para o solo. Como já se referiu a atenuação no ar é menor que no solo, esta onda será a componente dominante para pequenas profundidades e grandes distâncias horizontais. Com base nisto, a potência recebida de cada onda pode ser calculada da seguinte forma:

$$P_d = P_t + 20\log(\lambda_s) - 20\log(r_1) - 8,69\alpha r_1 - 45 \quad (10)$$

$$P_r = P_t + 20\log(\lambda_s) - 20\log(r_2) - 8,69\alpha r_2 + 20\log(\Gamma) - 45 \quad (11)$$

$$P_l = P_t + 20\log(\lambda_s) - 40\log(d) - 8,69\alpha(h_t + h_r) + 20\log(T) - 30 \quad (12)$$

em que  $P_t$  é a potência emitida, o  $\lambda_s$  é o comprimento de onda no solo, o  $r_1$  e o  $r_2$  são a distância percorrida pela onda direta e pela onda refletida respetivamente,  $d$  é a distância horizontal,  $\alpha$  é a constante de atenuação,  $\Gamma$  é o coeficiente de refração e o  $T$  o coeficiente de refração.

O coeficiente de reflexão  $\Gamma$  e o coeficiente de refração  $T$  são dadas pelas seguintes expressões:

$$\Gamma = \frac{\frac{1}{n} \cos \theta_{ri} - \cos \theta_{rt}}{\frac{1}{n} \cos \theta_{ri} + \cos \theta_{rt}} \quad (13)$$

$$T = \frac{2 \cos \theta_{ri}}{n \times \cos \theta_{ri} + \cos \theta_{rt}} \quad (14)$$

em que  $n$  é o índice de refração no solo,  $\theta_{ri}$  é o ângulo de incidência e  $\theta_{rt}$  é o ângulo refratado. Com a combinação das equações das três componentes de potência recebida, é possível ter-se um único valor de potência recebida que é dada pela seguinte expressão:

$$P_r = 10 \log \left( 10^{\frac{P_d}{10}} + 10^{\frac{P_r}{10}} + 10^{\frac{P_t}{10}} \right) \quad (15)$$

Nesta expressão todos os ganhos das antenas são considerados iguais a 1.

### 2.2.3. MODELO DE PROPAGAÇÃO U2A

Como já foi referido anteriormente, na construção das WUN é possível ter conexões entre nós que estão acima da superfície e nós que estão enterrados, sendo possível uma comunicação bidirecional. Como se pode perceber nesta situação o sinal propaga-se através do solo e através do ar. Na Figura 4 a onda de propagação neste modelo comporta-se de forma diferente em relação ao modelo U2U, visto que a onda se propaga primeiro no solo, de seguida atravessa a interface solo - ar e por fim propaga-se pelo ar.

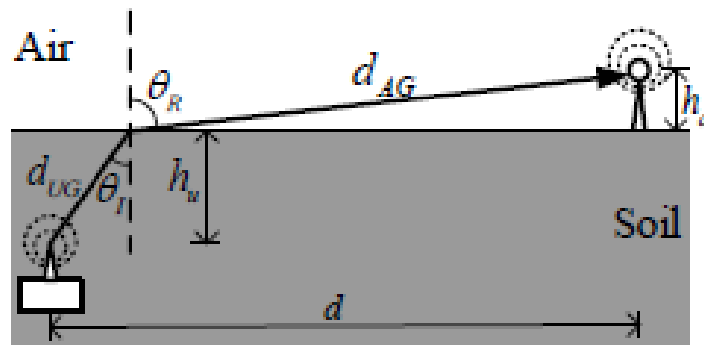


Figura 4 Modelo U2A [11]

O *path loss* pode ser calculado da seguinte forma [11][12]:

$$P_{u-a} dB = P_u dB + P_a dB + L_{ug-ag} dB \quad (16)$$

$$P_u = 6 + 20 \log(d_{UG}) + 20 \log(\beta) + 8,69 \alpha d_{UG} \quad (17)$$

$$P_a = 20 \log(f) + 20 \log(d_{AG}) - 147,56 \quad (18)$$

$$L_{ug-ag} \approx 10 \log \frac{(\sqrt{\epsilon'} + 1)^2}{4\sqrt{\epsilon'}} \quad (19)$$

Como se pode ver na equação (16) o *path loss* é a soma de três componentes em que o  $P_u$  é atenuação no solo,  $P_a$  é a atenuação no ar e o  $L_{ug-ag}$  é a atenuação na interface solo-ar. Como também já foi referido a constante dielétrica relativa do solo é maior que a do ar. Desta forma o ângulo de incidência ( $\theta_1$ ) é maior que o ângulo crítico  $\left(\theta_c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon'}}\right)$  logo o raio será completamente refletido. Além disso, visto que o caminho do ar ( $d_{AG}$ ) é maior que a altura do nó que se encontra à superfície, o ângulo de incidência é aproximadamente ( $\theta_c$ ) e o ângulo refratado é de aproximadamente  $90^\circ$ . Com estas aproximações é possível estimar as distâncias percorridas tanto no solo como no ar que são denominadas de  $d_{UG}$  e  $d_{AG}$ , respetivamente [6].

$$d_{UG} \approx \frac{h_u}{\cos \theta_c} \quad (20)$$

$$dh_{soil} = \sqrt{d_{UG}^2 - h_u^2} \quad (21)$$

$$dh_{air} = d - dh_{soil} \quad (22)$$

$$d_{AG} = \sqrt{dh_{air}^2 + h_a^2} \quad (23)$$

Este conjunto de equações consideram a propagação no canal U2A com o ângulo incidente ( $\theta_c$ ), no entanto em [13] utilizando estes modelos consideram que o ângulo incidente é de aproximadamente  $0^\circ$ , o que quer dizer que a distância percorrida no solo é igual a  $h_u$  que é mais preciso comparado com o caso da comunicação A2U onde [11][12][13] concordam que a distância percorrida no solo é  $h_u$  [6].

#### 2.2.4. MODELO DE PROPAGAÇÃO A2U

Este tipo de cenário de comunicação é idêntico ao que foi descrito anteriormente com a diferença deste ser comunicação A2U, ou seja do ar para o solo, como se pode verificar na Figura 5.

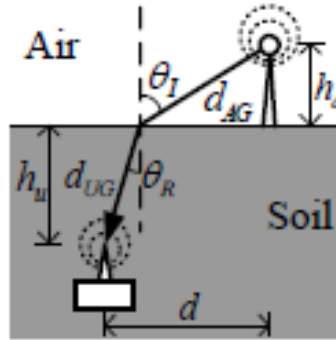


Figura 5 Modelo A2U [11]

Visto que o meio de propagação para este modelo é ar, interface ar-solo e por fim o solo, a equação que estima o *path loss* é idêntico ao que foi apresentado no modelo U2A como se pode ver de seguida:

$$P_{a-u} dB = P_a dB + P_u dB - L_{ag-ug} dB \quad (24)$$

$$P_a = 20 \log(f) + 20 \log(d_{AG}) - 147,56 \quad (25)$$

$$P_u = 6 + 20 \log(d_{UG}) + 20 \log(\beta) + 8,69 \alpha d_{UG} \quad (26)$$

$$L_{ag-ug} \approx 10 \log \frac{\left( \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon' - \sin^2 \theta_i} \right)^2}{4 \cos \theta_i \sqrt{\varepsilon' - \sin^2 \theta_i}} \quad (27)$$

Comparando as equações deste modelo com o do modelo U2A a única diferença é que a interface é ar-solo, o que quer dizer que o raio vai do meio com menor índice de refração para o maior índice de refração. O que quer dizer que existe uma maior atenuação neste tipo de comunicação [6].

Tal como no modelo U2A, em [11] fizeram umas aproximações, a fim de estimar a distância percorrida pelo raio em cada meio, ou seja,  $d_{AG}$  e  $d_{UG}$ . Desta forma estas aproximações levam às seguintes equações:

$$d_{UG} \approx h_a \quad (28)$$

$$d_{AG} = \sqrt{h_u^2 + dh^2} \quad (29)$$

$$\cos \theta_i = \frac{h_u}{d_{AG}} \quad (30)$$

Neste caso consideram que o ângulo incidente é igual a  $0^\circ$ , o que quer dizer que a distância percorrida no solo é igual a  $h_u$  [11][12] [13]. Desta forma pode-se dizer que este modelo é menos preciso comparado com o caso da comunicação U2A.

### 2.3. WUN UTILIZANDO INDUÇÃO MAGNÉTICA (IM)

Como já foi referido as OE podem sofrer uma grande atenuação quando se propaga pelo solo sendo a técnica IM uma alternativa a esta atenuação. Nas comunicações IM a transmissão de informação é conseguida utilizando duas bobinas: uma para transmitir e outra para receber a informação. O sinal de transmissão, com uma frequência angular  $\omega$ , induz uma corrente sinusoidal, à mesma frequência, na bobina transmissora e esta corrente irá criar um campo magnético que induz uma outra corrente sinusoidal na bobina do recetor. Desta forma é possível criar um canal de comunicação sem fios entre as duas bobinas [14][15]. Na Figura 6 está representado o modelo de comunicação IM.

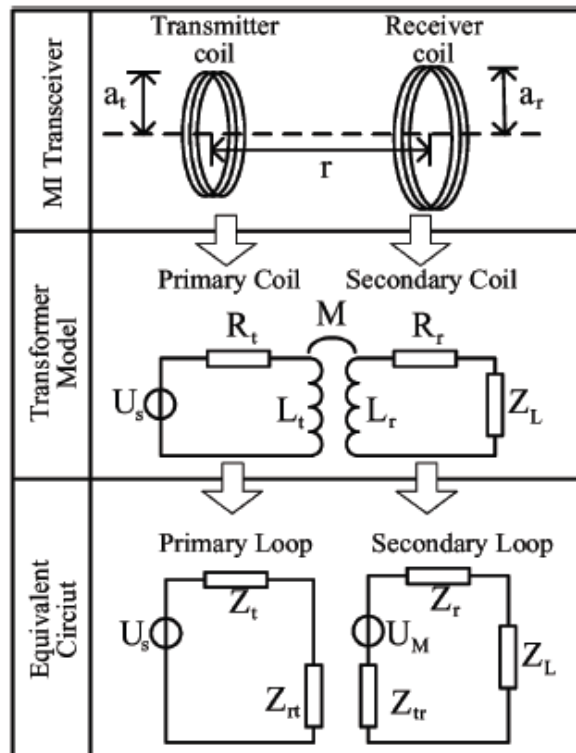


Figura 6 Modelo de Comunicação MI [15]

As duas bobinas devem ter uma pequena distância para ser possível a transmissão. No entanto de forma a viabilizar comunicações para distâncias maiores é recomendável utilizar bobinas de retransmissão entre o transmissor e o recetor da bobina [15].

## 2.4. CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Para ser possível saber qual é a constante dielétrica do solo, é necessário classificar o tipo de solo que se está a utilizar. Para isso é feita uma recolha de uma amostra do solo do local onde se pretende trabalhar. Essa amostra do solo deve ser analisada em laboratório de forma a avaliar-se as percentagens de areia, argila e lama. Com estes três parâmetros é possível classificar o solo como se pode ver na Figura 7.

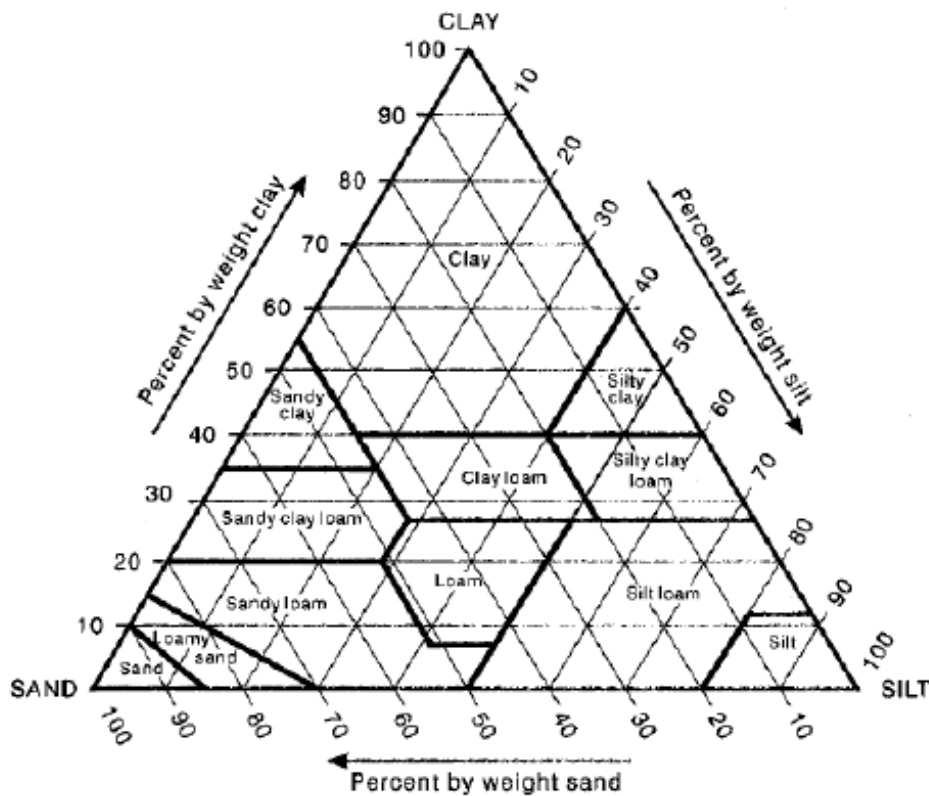


Figura 7 Triângulo da textura do solo [6]

Além destes três parâmetros do solo, também se deve ter em conta a quantidade de água expressa pelo *Volumetric Water Content* (VWC), e que representa a quantidade de água na amostra do solo [6].

## 2.5. LOCALIZAÇÃO

A medição de uma distância e a localização são dois conceitos que estão relacionados. A localização é um ponto no espaço e é descrito, geométrica ou geograficamente, como um conjunto de coordenadas definidas como distâncias em relação a outro ponto. As distâncias podem ser utilizadas para calcular a localização de um determinado objeto [16][18].

Existem quatro técnicas que permitem o cálculo da distância e a localização a partir da análise das características físicas específicas de sinais de rádio: 1) intensidade do sinal recebido (RSS – *Received Signal Strength*); 2) o tempo de chegada do sinal (TOA – *Time of Arrival*); 3) a diferença de tempo de chegada do sinal (TDOA – *Time Difference of Arrival*); 4) o ângulo de chegada (AOA – *Angle of Arrival*) [17][18][19]. Na Figura 8 é possível visualizar um diagrama de blocos de um sistema de posicionamento *wireless*. Nesta Figura é possível verificar que é necessário utilizar uma destas técnicas, utilizando um algoritmo de posicionamento, para descobrir as coordenadas de localização de um determinado sistema.

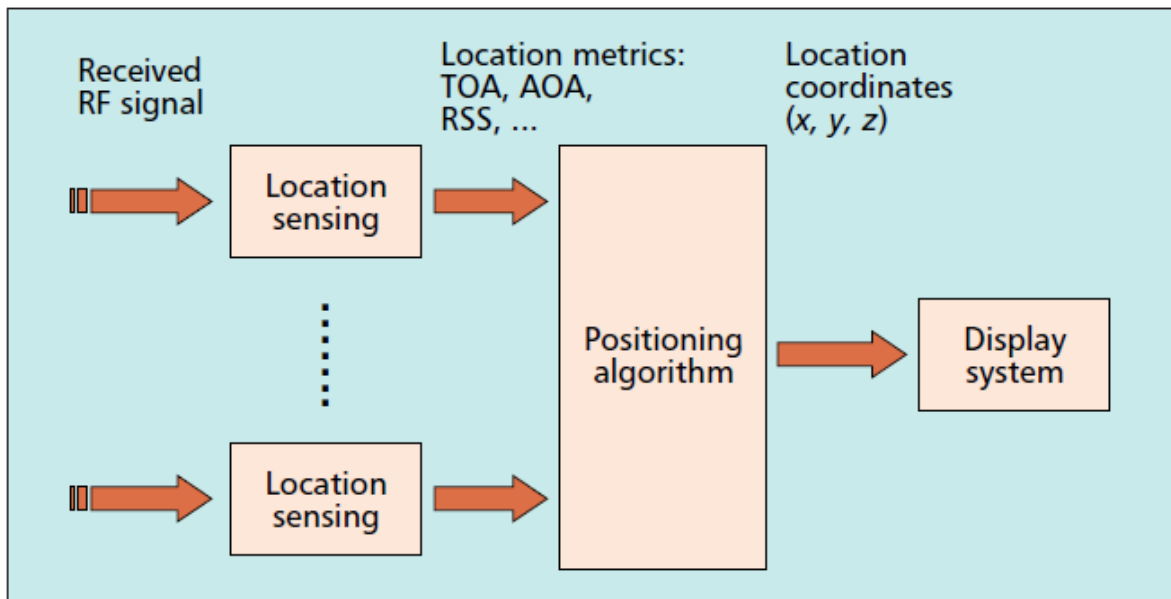
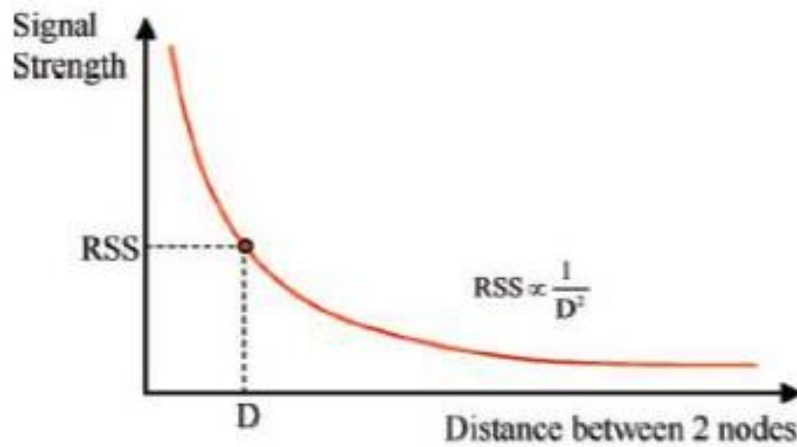


Figura 8 Diagrama de blocos de um sistema de posicionamento *wireless* [17]

### 2.5.1. RECEIVED SIGNAL STRENGTH (RSS)

No caso da técnica RSS, esta mede a diferença da potência dos sinais recebidos. A intensidade de um sinal eletromagnético em espaço livre é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o emissor e o receptor. Hoje em dia a maioria dos equipamentos

que usam comunicação sem fios possuem a capacidade de medição do RSS. Na Figura 9 é possível ver um gráfico do RSS em função da distância [19].



**Figura 9** RSS em função da distância [20]

A seguinte expressão descreve a potência do sinal em função da distância:

$$P_r(d)[dBm] = P_0(d_0)[dBm] - 10n_p \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (31)$$

em que  $P_r(d)[dBm]$  trata-se do valor de potência recebida,  $P_0$  é a potência de referência a uma distância  $d_0$  do emissor,  $n_p$  representa a taxa de perda em que o sinal decresce com a distância, que é dependente do tipo de ambiente em que o sinal se propaga, e  $X_\sigma$  é uma variável aleatória de distribuição Gaussiana e desvio padrão  $\sigma$ , que representa o efeito causado por obstruções e propagação *multipath*.

### 2.5.2. TIME OF ARRIVAL (TOA)

Em relação à técnica TOA, esta pode ser dividida em duas categorias: uma que mede o tempo de propagação entre o emissor e o recetor, e outra que mede o tempo que o sinal leva a percorrer a distância entre o emissor e o recetor nos dois sentidos (RTT – *Round-Trip Time*) [19][20].

No caso da medição do tempo de propagação num único sentido, é medida a diferença entre o instante de tempo em que o sinal é transmitido pelo transmissor e o tempo em que o sinal é recebido no recetor. Para que seja possível utilizar esta técnica é necessário que exista sincronização de relógio no transmissor e no recetor. Devido a esta sincronização

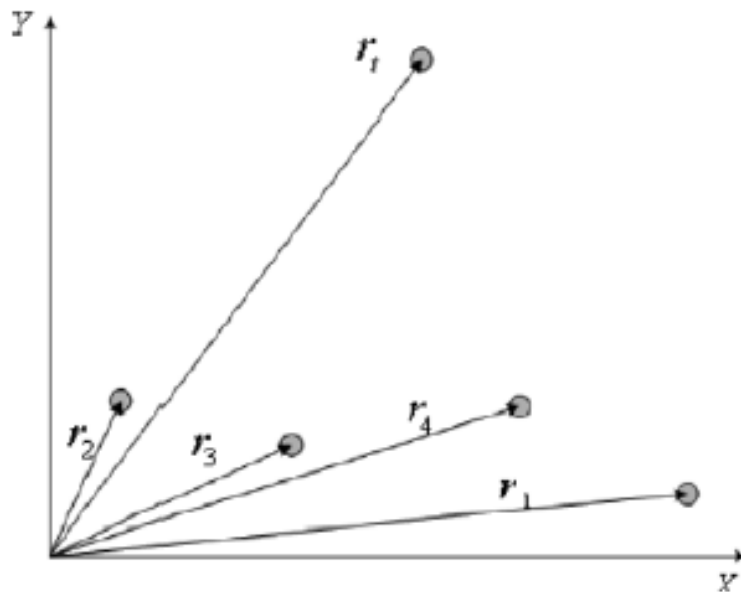


entre as duas fontes, a complexidade do sistema aumenta, o que torna esta técnica menos atrativa.

Em relação à técnica RTT esta mede o tempo de ida e volta entre o emissor e o recetor. Neste caso não existe o problema de sincronização de relógios, como no caso do tempo de propagação num único sentido, pois é usado o mesmo relógio para processar o tempo de propagação nos dois sentidos. No entanto, podem existir problemas com o tempo necessário para o processamento do sinal no recetor, que irá provocar um atraso. Para minimizar ou eliminar o efeito deste atraso, o recetor mede-o e envia-o para o emissor para que este possa ser subtraído.

### 2.5.3. TIME DIFERENCE OF ARRIVAL (TDOA)

A técnica TDOA mede a diferença entre os instantes de tempo de chegada do sinal a duas antenas no recetor para estimar a localização do transmissor. Na Figura 10 é apresentado um esquema com quatro recetores ( $r_1, r_2, r_3$  e  $r_4$ ) e um transmissor ( $r_t$ ) [19][20].



**Figura 10 Localização utilizando a técnica TDOA [20]**

Se duas antenas  $i$  e  $j$  estiverem nas posições  $X_i$  e  $X_j$ , respetivamente, e o emissor estiver na posição  $X_t$ , a diferença temporal ( $\Delta t_{ij}$ ) referente às duas antenas será dada pela seguinte expressão:

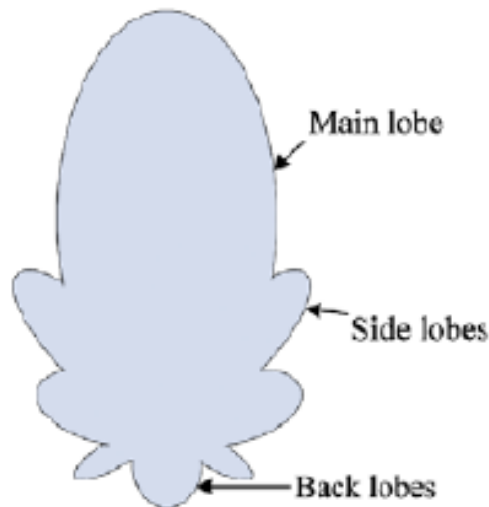
$$\Delta t_{ij} = t_i - t_j = \frac{1}{c} (\|X_t - X_i\| - \|X_t - X_j\|) \quad (32)$$

em que  $t_i$  e  $t_j$  representam os instantes de tempo em que o sinal chega às antenas  $i$  e  $j$ , respectivamente, e  $c$  representa a velocidade de propagação no meio. A aplicação deste método pode, em certos ambientes, resultar em erros muito grandes, pois pode existir sobreposição de sinais devido a caminhos *multipath*, que por vezes não é possível resolver.

#### 2.5.4. ANGLE OF ARRIVAL (AOA)

O AOA necessita do uso de antenas direcionais ou de recorrer a técnicas de processamento avançado. Este tipo de requisitos não é encontrado em equipamentos comuns, sendo preciso outro tipo de *hardware* que normalmente tem um custo elevado [16]. Existem duas formas de fazer a medição do AOA: 1) utilizando as características de resposta em amplitude; 2) utilizando as características de fase da antena recetora [19][20].

Esta técnica utiliza antenas anisotrópicas, que têm um valor máximo de radiação numa determinada direção a que se dá o nome de lóbulo principal. Na Figura 11 está representado um diagrama de radiação horizontal de uma antena anisotrópica típica.

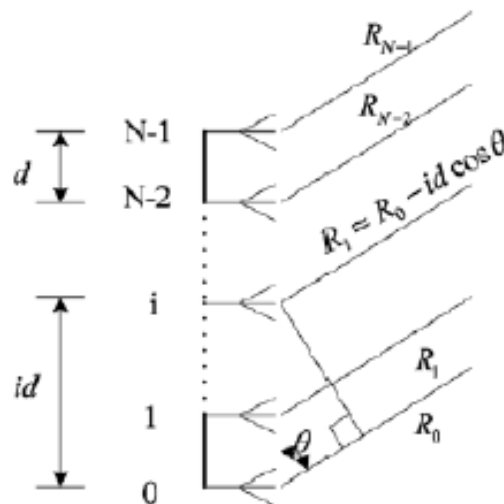


**Figura 11 Diagrama de radiação horizontal de uma antena anisotrópica típica [20]**

A utilização de uma antena recetora anisotrópica é conhecida pelo nome de *beamforming*. Neste caso o feixe do sinal da antena recetora é rodada eletricamente ou mecanicamente e a direção que tenha o valor máximo do sinal corresponde à direção do emissor. Os parâmetros que definem a precisão da localização da fonte são: a largura do feixe e a sensibilidade da antena recetora. No entanto existem problemas quando o sinal transmitido sofre variações de potência. Neste caso, o recetor não consegue diferenciar a variação de

intensidade do sinal devido à variação de amplitude do sinal transmitido e da variação de intensidade do sinal causada pela anisotropia da antena recetora. Para resolver este problema deve normalizar-se o RSS da antena rotativa, em relação ao RSS de uma segunda antena fixa e omnidirecional localizada no recetor. Outra solução, será utilizar duas ou mais antenas anisotrópicas, com diagramas de radiação conhecidos, orientadas em direções diferentes. Neste caso o erro diminui, conforme a utilização de um maior número de antenas.

A segunda forma de fazer a medição do AOA também é conhecida como fase interferométrica [19]. Nesta técnica é estimada a direção de chegada do sinal a partir da diferença de fases do sinal, medidas em duas ou mais antenas. Na Figura 12 é possível ver um agrupamento de antenas.



**Figura 12 Agrupamento de antenas com N elementos [20]**

Pela Figura 12 é possível verificar que as antenas estão separadas entre si por uma distância  $d$ . A distância entre um transmissor e uma antena  $i$  do agrupamento de antenas é dada pela seguinte expressão:

$$R_i = R_0 - kd \cos(\theta) \quad (33)$$

em que  $R_0$  representa a distância entre o emissor e a antena de índice 0,  $\theta$  representa a direção de transmissão vista pelo agrupamento de antenas.

Os sinais transmitidos recebidos pelas antenas adjacentes têm uma diferença de fase dada por:

$$\phi = 2\pi \frac{d \cos(\theta)}{\lambda} \quad (34)$$

Assim é possível calcular a direção do transmissor medindo a diferença de fase entre os sinais individuais. A utilização desta técnica não é muito viável em ambientes interiores devido a multipath, sombras e outros efeitos que possam afetar o sinal, no entanto consegue ter resultados satisfatórios e ambientes exteriores.

### 2.5.5. ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO

Existem alguns algoritmos de localização baseados em RF que implementam as técnicas acima apresentadas: método de Fourier, método do atraso e soma, *beamforming* clássico e triangulação. No entanto, os algoritmos referidos apresentam pouca resolução e precisão quando os sinais estão correlacionados entre si [19][21]. Os algoritmos de classificação de múltiplos sinais (MUSIC – *Multiple Signal Classification*) e de estimativa dos parâmetros dos sinais via invariância rotacional (ESPIRIT – *Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques*) são mais precisos que os anteriores, mas têm um custo computacional mais elevado, baseando-se na técnica AOA [19][22][23]. O algoritmo MUSIC e ESPIRIT estimam a posição através de amostras de ruído [22][23]. Por fim, existem ainda os métodos baseados em bases de dados, também chamados de *fingerprinting*, como o método *Search Nearest Neighbor*, e o método estatístico que recorre a interferência Bayesian [18][19][24][25].

## 2.6. POSICIONAMENTO UTILIZANDO O RSS

O posicionamento utilizando o RSS (*Received Signal Strength*) tem várias vantagens sobre as técnicas TOA (*Time of Arrival*), TDOA (*Time Difference of Arrival*) e AOA (*Angle of Arrival*). A grande vantagem de técnicas baseadas em RSS deve-se ao facto de utilizar infraestruturas já existentes para implementar um sistema de posicionamento. É mais simples obter informações RSS do que do tipo TOA, TDOA ou AOA que exigem um processamento de sinal avançado e *hardware* especial [26]. As infraestruturas necessitam apenas de ter capacidade de leitura do RSS, algo que está disponível em praticamente todos os recetores, e ter *software* com capacidade de leitura para que seja possível estimar a posição. A capacidade de localização pode ser adicionada a um sistema sem fios por um custo reduzido. Este método é sensível às variações de RSS resultantes da interferência e *multipath* no canal de rádio, diminuindo a precisão. De forma a obter-se maior precisão, a

localização de um objeto deve usar-se um número mínimo de APs (*Access Points*). Existem dois tipos de sistemas que usam RSS para calcular o posicionamento [18]: 1) os que se baseiam em relações analíticas de propagação de rádio; e 2) aqueles que envolvem pesquisa numa base de dados que é pré carregada com medidas de RSS (técnica de *fingerprinting*). Esta técnica baseada em RSS tem uma maior precisão, do que a primeira [18].

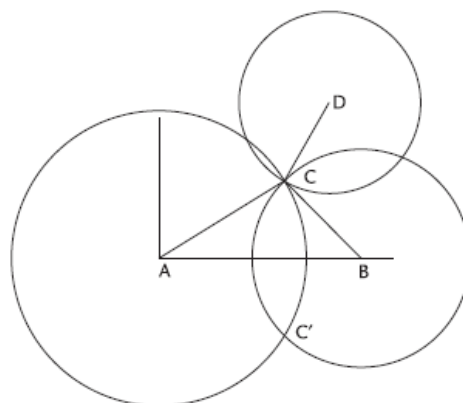
### 2.6.1. MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO RSS

A informação RSS pode ser utilizada para determinar a distância entre um transmissor e um recetor de duas formas. A primeira abordagem é com o conhecimento do RSS a partir de, pelo menos, três transmissores localizando-se o recetor por triangulação.

Outra forma é usar modelos de *path loss* para compilar uma base de dados artificial de valores RSS. Os valores RSS medidos são em seguida comparados com a base de dados para obter a localização do objeto [16].

### 2.6.2. POSICIONAMENTO UTILIZANDO A TRIANGULAÇÃO

As distâncias são encontradas a partir do RSS usando as fórmulas de propagação. As coordenadas de localização podem ser calculadas com base em estimativas utilizando um modelo de propagação. Neste método para se encontrar a localização de um objeto utiliza-se geometria de interseção de círculos ou esferas, que também é usada nas técnicas TOA e TDOA. Este exemplo é ilustrado na Figura 13. Os terminais A, B e D são fixos e as suas coordenadas são conhecidas. O terminal C é aquele que se pretende localizar. As distâncias podem ser encontradas medindo o RSS de cada terminal.



**Figura 13** Posicionamento utilizando a intersecção de círculos [18]

Considerando cada um dos pares de terminais A-C e B-C, C encontra-se no perímetro de um círculo, cujo centro é o terminal fixo e o raio é a distância medida. A intersecção dos círculos centrados em A e B é a localização de C. Como pode ver-se na Figura 13, existe uma ambiguidade na determinação da posição de C quando calculada utilizando apenas dois terminais fixos A e B. A intersecção C' na realidade também se trata de uma intersecção dos círculos A e B, mas trata-se de uma posição falsa. Para se obter a verdadeira localização é necessário um terminal fixo adicional, neste caso o D. Como se pode ver na Figura 13 a localização de C é obtida a partir da intersecção dos círculos cujos raios são três medidas de distância.

Nestes casos deve-se utilizar leis de propagação de acordo com as condições ambientais em que o sistema de posicionamento está inserido. Para a maioria dos ambientes utilizando este método, os erros de localização são significativamente grandes [18].

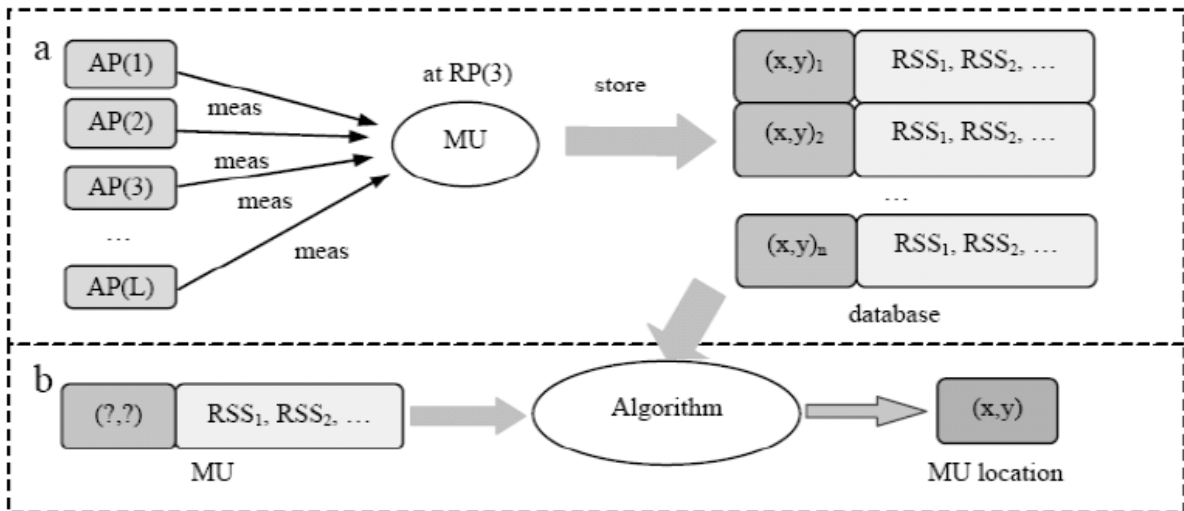
### **2.6.3. LOCALIZAÇÃO RSS RECORRENDO À UTILIZAÇÃO DE BASE DE DADOS**

A técnica de *fingerprinting* consiste em comparar um conjunto de valores RSS entre um objeto e pontos de referência, em tempo real, com medições RSS obtidas anteriormente em toda a área de cobertura de um local específico, em que as características de sinal são dependentes desse local. As leituras dos valores de RSS de diferentes localizações são armazenadas numa base de dados e combinadas com as medidas de RSS da atual localização de um determinado objeto [16].

Esta base de dados apenas é aplicável para o sítio específico onde foi criada, e as mudanças físicas, como mudanças climáticas, afetam a propagação rádio no local e podem exigir a criação de base de dados que tenham este aspeto em conta. A técnica de localização com comparação com a base de dados pode ser aplicada tanto em ambientes interiores como em exteriores.

De acordo com [16] e [18], as propriedades físicas e limitações tecnológicas associadas a outras técnicas, fazem com que os esquemas de localização *fingerprinting* sejam a solução mais viável para a localização.

O principal objetivo de um sistema de localização é estimar as coordenadas  $(x, y)$  de um objeto. O processo de estimativa de localização baseado em *fingerprinting* tem duas fases: a *off-line* e a *on-line* [26] que podem ser vistas na Figura 14.



**Figura 14** As duas fases de localização *fingerprinting* (a) fase *off-line* (b) fase *on-line* [19]

Na fase *off-line* (Figura 10 (a)), ou fase de pesquisa, é criada uma base de dados. As medições dos valores de RSS dos pontos de referência são feitas através de vários APs. A intensidade do sinal varia ao longo do tempo, devido a interferências que possam existir no local onde estão a ser realizadas as medições. Por esse motivo é necessário realizar várias medições para o mesmo ponto de referência.

A natureza da base de dados que é criada a partir dos dados recolhidos depende do método de comparação, que será abordado de seguida. As componentes de informação na base de dados são identificados como posições de referência.

A segunda fase do processo de localização, ou fase *on-line* (Figura 10 (b)) trata da medição do RSS em tempo real. Nesta fase, pretende-se saber o posicionamento de um certo objeto que se encontra na área de cobertura. Os RSS do objeto medido pelos APs são registados. O conjunto de RSS adquirido nesta fase é comparado com a base de dados, associando-se a todos os pontos de referência ou aos pontos de melhor correspondência para indicar a estimativa da localização do objeto.

A maior desvantagem do método que utiliza a base de dados é o facto de não poder ser reutilizado num ambiente diferente daquele para o qual foi criado. Existem métodos diferentes de comparar medições de dados em tempo real com a base de dados, incluindo: 1) com base na distância euclidiana mínima, referido como o método *Search Nearest Neighbor* que será utilizado nesta tese; 2) o método estatístico utilizando a interferência *Bayesian* [18][24][25].

#### 2.6.4. ALGORITMO SEARCH NEAREST NEIGHBOR

Alguns estudos têm incidido neste algoritmo, também denominado por método das distâncias euclidianas [18][24][25][26][27][28][29].

Primeiro a base de dados é criada na fase *off-line* onde é avaliado o local onde será feita instalação do sistema de localização. Aqui são efetuadas várias medições de RSS em cada ponto de referência que serão posteriormente inseridos na base de dados. Desta forma, cada elemento da base de dados é representado pelo seguinte vetor:

$$V_n = (x, y, p, s_1, s_2, s_k, \dots, s_K) \quad (35)$$

em que as componentes são as coordenadas de localização  $x$ ,  $y$ , a orientação  $p$ , e as intensidades de sinal em  $s_k$ ,  $k$  representa o AP onde foi feita a medição,  $K$  é o número de APs e  $n$  é o índice do ponto de referência.

Durante a fase de medição em tempo real, objeto a localizar transmite e cada AP mede o RSS, ou em sentido oposto, os APs transmitem e o objeto mede os RSS. É feita uma média de um número de leituras RSS de um objeto vinda de cada um dos APs. As leituras são normalizadas de modo a que os RSS dos diferentes pontos de acesso sejam mantidos, permitindo a comparação com a base de dados. Esta normalização é realizada para reduzir a redundância de dados e de forma a tornar os dados consistentes. Sendo assim a normalização será feita em relação a um dos APs do sistema. As leituras de RSS de cada um dos APs irá formar um vetor  $(s_1 \dots s_K)$ , cujos componentes são a média normalizada do RSS do objeto em cada um dos APs. De seguida, é verificada a base de dados previamente preparada, e verificados os RSS que se aproximam mais dos valores das medições em tempo real, neste caso utilizando o algoritmo da distância euclidiana mínima. Para cada entrada na base de dados um valor  $D_n$  é calculado da seguinte forma:

$$D_n = \sqrt{\sum_{i=1}^K (S_{Ti} - S_{i,n})^2} \quad (36)$$

onde  $S_T$  é o RSS *on-line* do objeto,  $S$  é o vetor da intensidade do sinal da base de dados,  $i$  é um índice do AP, e  $n$  é o índice da posição de referência. O menor  $D$  corresponde a uma estimativa da posição onde o objeto se encontra mais próximo. Uma maior precisão da posição do objeto pode ser obtida ao escolher mais que um ponto de referência da base



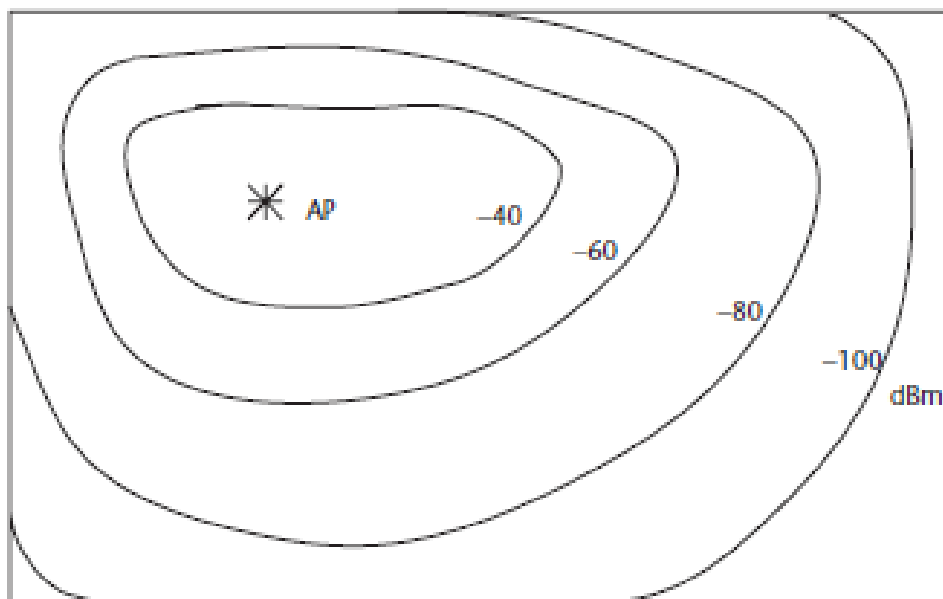
de dados e com a média das suas coordenadas, que já são conhecidas, obtém-se uma estimativa da localização do objeto. Para isso utilizam-se as seguintes expressões:

$$x = \frac{1}{L} \cdot \sum_{l=1}^L x_l \quad (37)$$

$$y = \frac{1}{L} \cdot \sum_{l=1}^L y_l \quad (38)$$

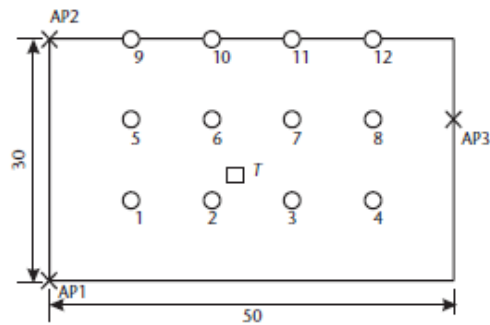
em que  $L$  representa o número de vizinhos, ou pontos de referência da base de dados mais próximos,  $x_l$  as coordenadas  $x$  desses vizinhos e  $y_l$  as coordenadas  $y$  desses vizinhos.

A formação e utilização de base de dados pode ser visualizada através de contornos de mapas de intensidade de sinal em cada AP. Na Figura 15 está representado um exemplo de um mapa de quatro orientações de posição. Cada linha de contorno corresponde a um RSS constante. No caso de uma configuração não aleatória, se as leis de propagação fossem aplicadas em todas as direções, os contornos seriam todos círculos. No entanto, efeitos de reflexão do ambiente em que o sistema de localização está inserido distorcem os contornos.



**Figura 15 Mapa de contornos com um AP [18]**

De forma a explicar o funcionamento do algoritmo pode considerar-se um exemplo para obtenção das coordenadas de um objeto em um sistema de localização [18]. Isto baseia-se numa simulação WLAN que opera numa área de 30 por 50 m como mostra a Figura 16.



**Figura 16 Simulação de localização de uma WLAN [18]**

É feito um levantamento do local mediante a obtenção da média e medições de RSS para os três APs situados nas posições marcadas com cruzes. Os pontos de referência com coordenadas conhecidas estão marcados por círculos. Os dados podem ser obtidos tanto através da medição de RSS de um objeto em cada AP ou em sentido inverso. Neste caso o objeto recebe a medição de RSS de cada AP. A exibição na base de dados da pesquisa de RSS para cada ponto de pesquisa e do ponto de coordenadas  $x, y$  pode ser visto na Tabela 2.

**Tabela 2 RSS em dBm para cada ponto de referência dos três APs [18]**

<i>RL</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>x, y</i>	1, 1	2, 1	3, 1	4, 1	1, 2	2, 2	3, 2	4, 2	1, 3	2, 3	3, 3	4, 3
AP1	-73	-82	-89	-94	-82	-86	-91	-95	-89	-91	-94	-97
AP2	-82	-86	-91	-95	-73	-82	-89	-94	-66	-80	-87	-93
AP3	-94	-89	-82	-73	-93	-87	-80	-66	-94	-89	-82	-73

O RSS normalizado para cada ponto de pesquisa são registados na Tabela 3, onde para cada ponto de referência os RSS são subtraídos pelo RSS no AP1 em dBm.

**Tabela 3 RSS normalizados ao RSS do AP1, para cada ponto de referência [18]**

<i>RL</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
AP1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AP2	-9	-4	-2	-1	9	4	2	1	23	11	7	4
AP3	-21	-7	7	-21	-11	-1	11	29	-5	2	12	24

O processo de estimativa das coordenadas de localização de um objeto é mostrado de seguida. Na Figura 16 a posição do objeto é indicada por um pequeno quadrado. A sua verdadeira posição  $(x, y)$  é de (23m, 13m).

O vetor de RSS obtido a partir de cada AP do objeto é:

$$PT = (-94dBm \quad -96dBm \quad -95dBm) \quad (39)$$

Este vetor é normalizado

$$PTN = (0dBm \quad -2dBm \quad -1dBm) \quad (40)$$

A Equação 36 é aplicada utilizando os dados da base de dados representada na Tabela 3, resultando numa distância métrica mostrada na Tabela 4.

**Tabela 4 Distância métrica entre o RSS normalizado da base de dados com o RSS normalizado do objeto [18]**

<i>RL</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<i>D</i>	21	6	8	22	15	6	13	30	25	13	16	26

A partir de uma Pesquisa de D na Tabela 4, os pontos de referência relativos aos três valores mais baixos são encontrados. As coordenadas desses locais são encontrados na Tabela 2. De seguida é calculada a média dos três pontos utilizando as equações (37) e (38), utilizando  $L=3$  para se obter a localização estimada. Assim obtém-se:

$$X = 23,33 \quad (41)$$

$$Y = 13,33 \quad (42)$$

Estas coordenadas dão a posição estimada do objeto.

A precisão do método do RSS do vizinho mais próximo melhora à medida que se aumentam o número de APs.

### **2.6.5. MÉTODO DE LOCALIZAÇÃO RSS UTILIZANDO INTERFERENCIA BAYESIAN**

Outra forma de combinar um vetor de RSS de um local desconhecido com vetores de referência da base de dados é encontrar o máximo de uma função de probabilidade. Na fase *off-line*, as estatísticas de RSS para diferentes APs são determinadas em locais de referência na área de cobertura. Durante a fase de *on-line*, a probabilidade do vetor de RSS é calculada para cada ponto de referência na base de dados e o local no qual a probabilidade é maior é a estimativa de onde o objeto está situado.

# 3. SOLUÇÃO PROPOSTA E IMPLEMENTAÇÃO

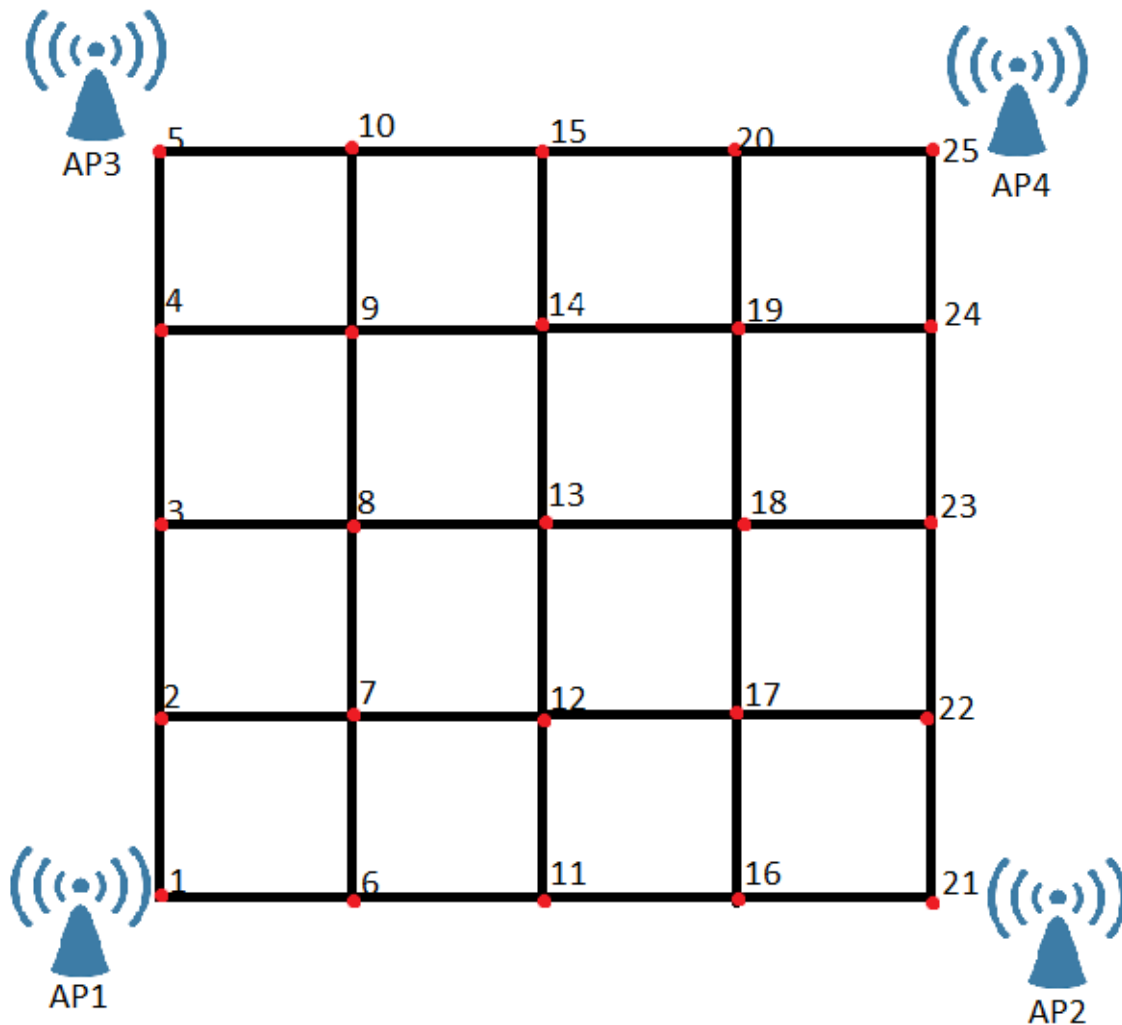
Neste capítulo é apresentada a solução proposta para a realização de um sistema de localização de precisão no contexto das redes sem fios enterradas, incluindo a arquitetura do sistema, incluindo as especificações de *hardware* e *software* utilizado e o ambiente experimental.

## 3.1. SOLUÇÃO IMPLEMENTADA

Depois de ter sido feito um estudo do estado da arte, sobre os modelos de propagação debaixo de terra, assim como dos diferentes algoritmos existentes, o algoritmo de localização *Search Nearest Neighbor* foi o escolhido. Como já foi referido, este algoritmo, consegue ser mais preciso que outros, não sendo necessário equipamento com custos elevados para realizar as experiências, sendo que este é um dos objetivos deste trabalho. Foi utilizada uma comunicação U2A, uma vez que este tipo de comunicação tem uma menor atenuação de RSS, em relação à comunicação A2U. Para realizar este tipo de comunicação foram enterrados 4 nós (os APs), a emitir, e à superfície um nó a receber essa informação dentro da área estipulada.

### 3.2. ARQUITETURA DO SISTEMA

Neste sistema tínhamos uma área com 4m de lado cada. Os 4 APs foram colocados em cada um dos vértices da área quadrada com 4 m de lado, como é possível ver na Figura 17. Os APs foram colocados a 20 cm de profundidade. Foi usada esta profundidade uma vez que em certas zonas da área onde foi estipulado enterrar os nós, encontrou-se zonas rochosas onde já não seria possível cavar a uma maior profundidade.



**Figura 17** Arquitetura do sistema

Este sistema continha 25 pontos de referência que estavam espaçados entre eles a uma distância de 1 m. Nestes pontos de referência realizaram-se as medições de RSS de cada um dos 4 APs, sendo esses valores guardados na base de dados. Em cada ponto de referência foram utilizadas 50 medições do RSS de cada AP, calculando no final uma média desses valores.

### 3.3. *HARDWARE UTILIZADO*

Em relação ao *hardware* foram necessários 4 nós enterrados e um nó móvel acima do solo cerca de 90 cm. O nó usado à superfície tratou-se de um adaptador USB *wireless* (Figura 18) igual aos enterrados. Nas tabelas 5 e 6 é possível ver algumas das especificações dos adaptadores USB *wireless* utilizados.

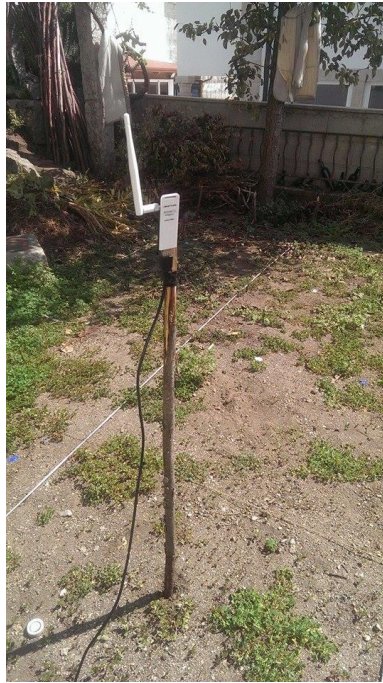


**Figura 18 TP-LINK TL-WN722N [30]**

Os 4 adaptadores USB *wireless* dos 4 nós enterrados foram ligados a quatro Raspberry Pi. Cada um dos Raspberry Pi arrancava como AP emitindo a uma potência de 5 dBm, cada com um ESSID (*Extended Service Set Identification*) associado, sendo eles, respetivamente, AP1, AP2, AP3 e AP4. Cada Raspberry Pi estava configurado em modo *Ad-Hoc*. Em relação à potência de emissão de cada AP, inicialmente foram feitos testes com 0 dBm, mas verificou-se que a essa potência não era possível cobrir toda a área. Cada um dos 4 nós enterrados ligados aos Raspberry Pi trabalhava como emissor enquanto que, o nó móvel que se encontrava acima da superfície funcionava como recetor.

Em relação ao nó móvel, numa primeira fase, foi utilizado um telemóvel segurado por uma pessoa para fazer a recolha do RSS em cada ponto de referência, o que envolvia movimentação na área. No entanto essa ideia foi abandonada depois de alguns testes, pelo facto do corpo da pessoa que estava a mover-se na área ser mais um ponto de grande interferência do sinal emitido pelos nós, o que influenciou de certa forma nos resultados, tendo-se obtido erros acima do esperado. Foi então depois utilizado um adaptador USB *wireless*, como nó móvel, com as mesmas características dos que estão enterrados. A

movimentação na área foi mais simples, como se poderá ver na Figura 18, pois o suporte não cria grandes interferências, que eram causadas com a abordagem anterior. Desta forma tentou-se diminuir o erro o mais possível, o que acabou por se verificar nos resultados obtidos.



**Figura 19 Método de receção de RSS dos 4 nós**

**Tabela 5 Especificações wireless do TP-LINK TL-WN722N [30]**

Normal	
Interface	USB 2.0 Interface
Standards	IEEE 802.11n, IEEE 802.11g, IEEE 802.11b
Button	Wi-fi Protected Setup (WPS) Button (QSS Compatible)
Operating System	Windows XP, Windows Vista, Windows 7, Windows 8, Windows 8.1
Wireless Signal Rate With Automatic Fallback	11b: Up to 11Mbps(dynamic) 11g: Up to 54Mbps(dynamic) 11n: Up to 150Mbps(dynamic) - TL-WN721N/TL-WN722N
Modulation	11b: CCK,QPSK,BPSK 11g: OFDM 11n: QPSK, BPSK, 16-QAM, 64-QAM
Media Access Protocol	CSMA/CA with ACK
Data Security	WEP; WPA/WPA2; WPA-PSK/WPA2-PSK
Frequency*	2.4 ~ 2.4835GHz
Spread Spectrum	Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
Safety & Emissions	FCC, CE, RoHS

**Tabela 6 Especificações Ambientais e Físicas do TP-LINK TL-WN722N [30]**

Environmental and Physical	
Working Temperature	0°C~40°C (32°F~104°F)
Storage Temperature	-40°C~70°C(-40°F~158°F)
Working Humidity	10% ~ 90% RH, Non-condensing
Storage Humidity	5% ~ 90% RH, Non-condensing

### **3.4. SOFTWARE UTILIZADO**

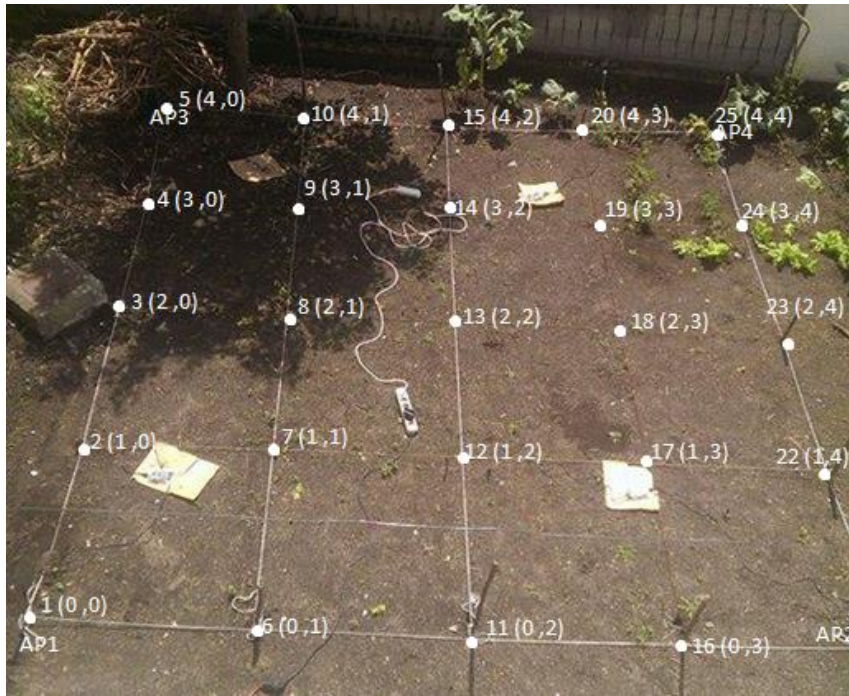
Em termos de *software* o nó móvel utilizou uma distribuição Linux, onde um *script*, utilizando a ferramenta *iwlist*, era executado e guardava num ficheiro o ESSID e o RSS de cada nó enterrado de 2 em 2 segundos. O tempo mínimo que foi possível executar o *script* foi de 2 em 2 segundos, uma vez que o *iwlist* é uma ferramenta que escuta o ambiente percorrendo todos os canais, não sendo possível executá-lo em períodos de tempo menores. Em relação aos nós enterrados, uma vez que estes estavam ligados a Raspberry's Pis para arrancarem como AP, foi utilizado o Raspbian, uma distribuição Linux para Raspberry Pi.

### **3.5. AMBIENTE EXPERIMENTAL**

Para execução da experiência após a seleção do local marcou-se uma grelha com fios espaçados por 1 m de comprimento e 1 m de largura, de forma a saber-se a localização dos pontos de referência em que seriam recolhidos os RSS de referência, a inserir na base de dados, como pode ver-se na Figura 20.

Na área seleccionada o solo era argiloso, um pouco rochoso, e não uniforme, típico de um terreno agrícola. Cada nó estava localizado em cada um dos vértices do quadrado mais precisamente, o AP1 perto do ponto de referência 1, o AP2 perto do ponto de referência 21, o AP3 perto do ponto de referência 5 e por último o AP4 perto do ponto de referência 25.





**Figura 20 Local de realização das experiências com os respectivos pontos de referência e suas coordenadas**

Numa primeira fase foram realizadas as medições dos pontos de referência. Em cada ponto de referência foram lidas e guardadas as medições de 50 amostras de RSS, em que a sua média foi inserida na base de dados. Note-se que para esses pontos de referência já eram conhecidas as suas coordenadas, como se pode verificar na Tabela 7. Na base de dados foi feita uma normalização em relação a um dos APs, em todos os pontos de referência. Neste caso a normalização foi feita sempre em relação ao AP1, conforme ilustrado na Tabela 8.

**Tabela 7 RSS em dBm para cada ponto de referência dos 4 APs e respectivas coordenadas**

PR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
(x,y)	(0,0)	(1,0)	(2,0)	(3,0)	(4,0)	(0,1)	(1,1)	(2,1)	(3,1)	(4,1)
AP1	-57,525	-59,7	-64,375	-74,575	-77,825	-65,05	-66,625	-74,675	-75,725	-77,575
AP2	-83,25	-81,35	-80,4	-81,475	-79,75	-80,9	-77,55	-76	-78,05	-80,2
AP3	-80,975	-76,875	-76,15	-71,075	-60,175	-80,775	-79,2	-74,05	-68,5	-64,6
AP4	-79,325	-77,275	-76,35	-80,55	-79,05	-74,8	-72,9	-78	-70,675	-73,4
PR	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
(x,y)	(0,2)	(1,2)	(2,2)	(3,2)	(4,2)	(0,3)	(1,3)	(2,3)	(3,3)	(4,3)
AP1	-67,2	-73,925	-77	-79,95	-78,45	-73,35	-80,5	-75,975	-77,65	-80,125
AP2	-73,575	-72	-79,4	-79,425	-76,225	-70,725	-69,775	-71,675	-76,5	-77,525
AP3	-81,15	-80,675	-81,2	-73,9	-69,55	-80,2	-79,275	-79,225	-77,25	-75,3
AP4	-72,825	-71,25	-71,1	-71,225	-71,3	-73,375	-75,975	-74,05	-68,075	-60,9
PR	21	22	23	24	25					
(x,y)	(0,4)	(1,4)	(2,4)	(3,4)	(4,4)					
AP1	-78,075	-81,025	-80,1	-79,875	-78,675					
AP2	-59,7	-63,55	-64,825	-72,925	-77,925					
AP3	-81,95	-82,275	-83,925	-80,075	-79,775					
AP4	-80,35	-78,325	-75,85	-65,775	-63,7					

**Tabela 8 RSS normalizados ao RSS do AP1 para cada ponto de referência**

PR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AP1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AP2	-25,725	-21,65	-16,025	-6,9	-1,925	-15,85	-10,925	-1,325	-2,325	-2,625
AP3	-23,45	-17,175	-11,775	3,5	17,65	-15,725	-12,575	0,625	7,225	12,975
AP4	-21,8	-17,575	-11,975	-5,975	-1,225	-9,75	-6,275	-3,325	5,05	4,175
PR	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
AP1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AP2	-6,375	1,925	-2,4	0,525	2,225	2,625	10,725	4,3	1,15	2,6
AP3	-13,95	-6,75	-4,2	6,05	8,9	-6,85	1,225	-3,25	0,4	4,825
AP4	-5,625	2,675	5,9	8,725	7,15	-0,025	4,525	1,925	9,575	19,225
PR	21	22	23	24	25					
AP1	0	0	0	0	0					
AP2	18,375	17,475	15,275	6,95	0,75					
AP3	-3,875	-1,25	-3,825	-0,2	-1,1					
AP4	-2,275	2,7	4,25	14,1	14,975					

Depois de terem sido realizadas as medições dos pontos de referência e inseridas na base de dados, foram escolhidos alguns pontos aleatórios nesta mesma área. Nos pontos escolhidos foi feita uma leitura de 50 amostras, tal como nos pontos de referência, e calculada a média. Depois de ter recolhido os RSSs nesses pontos foi então usado o algoritmo *Search Nearest Neighbor* para estimar a localização desses pontos.

De seguida, é apresentado um exemplo de estimação de posição de um dos pontos aleatórios da experiência, para melhor se perceber o processo utilizado. Com a média das leituras de RSS recebidas de cada AP neste ponto aleatório é feita uma normalização em relação ao AP1 como se pode ver na seguinte Tabela 9. Essa normalização consiste no cálculo da diferença dos RSSs de todos os APs em relação ao AP1.

**Tabela 9 Normalização do Ponto Aleatório em dBm**

	RSS	APk-AP1
AP1	-55,98	0
AP2	-83,43	-26,45
AP3	-78,38	-21,4
AP4	-77,3	-20,33

Utilizando a Equação 36 do Capítulo 2, com os dados da Tabela 8 calculou-se a distância métrica que pode ser vista num excerto da Tabela 10.

**Tabela 10 Distância métrica entre o RSS normalizado da base de dados com o RSS normalizado do Ponto Aleatório**

PR	1	2	3	4	5	6	7
D	2,63	6,96	16,46	34,76	49,91	16,01	22,72

Por exemplo, para o cálculo, da distância  $D$  ao ponto de referência 1.

$$D_n = \sqrt{\sum_{i=1}^4 (0-0)^2 + (-26,45 - (-25,73))^2 + (-21,4 - (-23,45))^2 + (-20,33 - (-21,8))^2} = 2,63 \quad (43)$$

Os valores que estão sombreados a azul correspondem às distâncias menores obtidas utilizando o algoritmo, o que significa que foram os pontos de referência que estavam mais próximos do ponto aleatório cuja posição se pretendia estimar. Como já se conhecem as coordenadas destes pontos, usando as Equações 37 e 38 para estimar a coordenadas  $x$  e  $y$  respetivamente, é possível estimar uma posição para esse ponto aleatório.

### 3.6. VALORES TEÓRICOS E REAIS EM CADA PONTO DE REFERÊNCIA

Neste trabalho foi feito um estudo teórico do valor de RSS em cada ponto de referência. O objetivo é verificar as diferenças entre os valores teóricos, utilizando os modelos de propagação em ambiente underground, com os valores reais das experiências e tentar perceber as causas. Como já foi referido neste trabalho foi utilizada uma comunicação U2A. Desta forma foram utilizadas as expressões (8) e (9) (cf. Secção 2.2.1), em que os valores das constantes dielétricas, para o tipo de solo utilizado nas experiências, para um VWC de 5% [5] podem ser vistas na Tabela 11, e as expressões referentes ao modelo U2A referido na Secção 2.2.3. para estimar as perdas de percurso.

**Tabela 11 Constante dielétrica do solo para o VWC=5%**

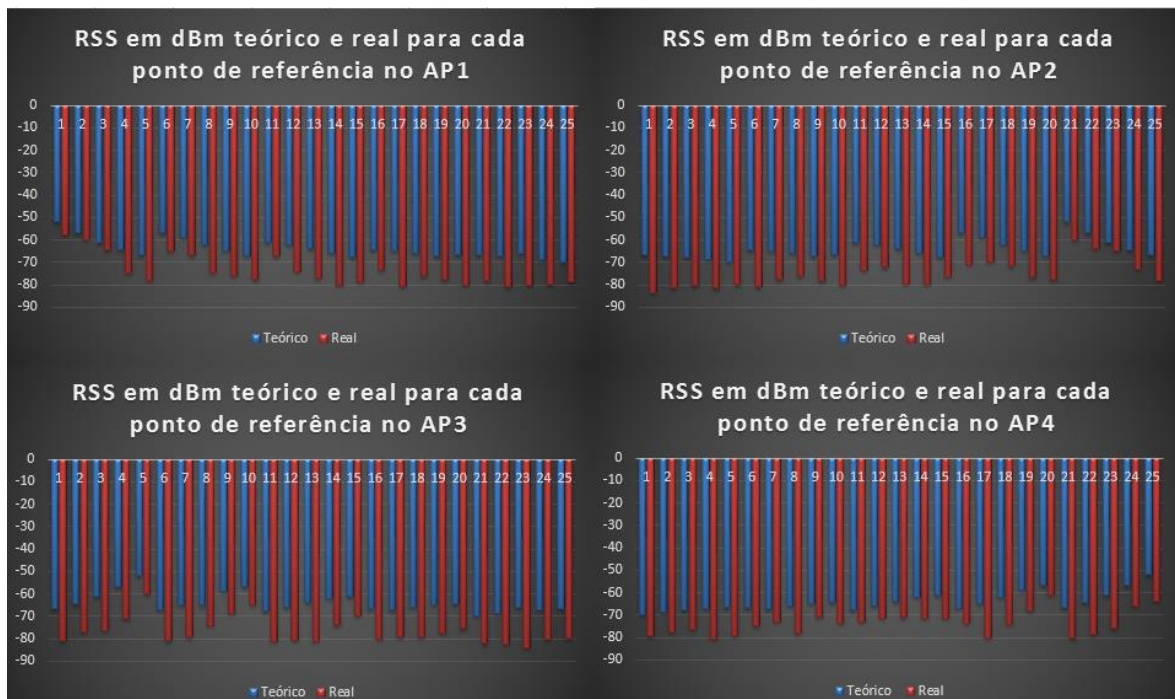
VWC=5%	
$\epsilon'$	$\epsilon''$
4,2	1,7

Utilizando a equação seguinte obteve-se então o RSS em cada ponto de referência.

$$P_r = P_e + G_u + G_A - P_{u-a} \quad (48)$$

em que  $P_r$  é a potência recebida em cada ponto de referência,  $P_e$  é a potência emitida que neste caso foi de 5 dBm,  $G_u$  e  $G_A$  são os ganhos das antenas de emissão e de receção respetivamente, em que cada uma tinha um ganho de 4 dBi e  $P_{u-a}$  as perdas de percurso no solo, na interface solo – ar e no ar. A frequência de operação utilizada foi de 2.4 GHz. Na Figura 21 é possível ver a comparação do RSS teórico e real em cada ponto de referência.

Como se pode verificar existe alguma diferença entre os pontos teóricos e reais em cada ponto de referência, diferença essa que se acentua conforme se aumenta a distância de cada ponto de referência em relação a cada AP. Outro aspeto que se verifica é que pontos de referência que se encontram à mesma distância teoricamente têm o mesmo RSS, mas no ambiente real isso não se verificou. Por exemplo o RSS do ponto de referência 2 e 6 deveriam ter o mesmo RSS em relação ao AP1, pois ambos estão a uma distância de 1 m em relação ao AP1. De facto isso não aconteceu pois no ponto de referência 2 o RSS é de -59,7 dBm e no ponto de referência 6 é de -65.05 dBm.



**Figura 21 RSS teórico e real em cada ponto de referência em cada AP**

As razões para estas discrepâncias podem ser as várias interferências que possam ter existido no meio ambiente das experiências, para além de que os valores das constantes dielétricas do solo, utilizadas para os cálculos teóricos, são aproximações, podendo ser também uma das razões para estas discrepâncias.



# 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nas experiências efetuadas com a solução proposta no Capítulo 3.

## 4.1. ANÁLISE DE RESULTADOS

Um dos aspetos em que este estudo incidiu foi na análise da influência do número de pontos de referência vizinhos, existentes na base de dados, com que se obteria o menor erro de localização relativamente à posição real desse ponto aleatório. Neste estudo foram então utilizados 2, 3, 4 e 5 vizinhos. Na Tabela 12 é possível ver as coordenadas estimadas de um ponto aleatório para 2, 3, 4 e 5 pontos de referência vizinhos e o respetivo erro em relação à posição real. A título de exemplo é mostrado o cálculo das coordenadas  $x$  e  $y$  para 3 vizinhos, com recurso à Tabela 7 da Secção 3.5, para o cálculo das coordenadas dos pontos de referência vizinhos.

$$x = \frac{1}{3}(0+1+0) = 0,33m \quad (44)$$

$$y = \frac{1}{3}(0+0+1) = 0,33m \quad (45)$$

**Tabela 12 Coordenadas e erros em metros (m) utilizando os vários números de vizinhos**

	2 vizinhos	3 vizinhos	4 vizinhos	5 vizinhos	Valor real (m)
x(m)	0,5	0,33	0,75	0,8	0,41
y(m)	0	0,33	0,25	0,4	0,44
Erro (m)	0,45	0,14	0,39	0,4	

O valor real foi obtido com recurso a uma fita métrica aquando da leitura do RSS nesse ponto. Pela Tabela 10 da Secção 3.5 é possível verificar que com a utilização de 2 vizinhos os pontos de referência mais próximos seriam, 1 e o 2, com 3 seria incluído o ponto de referência 6, uma vez que é o 3º ponto com menor  $D$ , com 4 seria incluído o 3 e com 5 seria incluído o 7, uma vez que seriam os 4º e 5º pontos de referência com menor  $D$ . Em relação ao erro, este é calculado da seguinte forma:

$$Erro = \sqrt{(x_{med} - x_{real})^2 + (y_{med} - y_{real})^2} \quad (46)$$

em que  $x_{med}$  se trata da coordenada  $x$  obtida pelo algoritmo,  $x_{real}$  trata-se da coordenada  $x$  real, do ponto resultante da medição,  $y_{med}$  a coordenada  $y$  obtida pelo algoritmo e  $y_{real}$  a coordenada  $y$  real do ponto. Por exemplo, o cálculo do erro para o caso de 3 vizinhos com base nos valores estimados e medidos na realidade, dado por:

$$Erro = \sqrt{(0,33 - 0,41)^2 + (0,33 - 0,44)^2} = 0,14m \quad (47)$$

Nesta experiência foi considerada uma amostra de 26 pontos aleatórios com 50 leituras de RSS em cada um dos pontos aleatórios. Depois de ter sido feita a recolha das leituras de cada um dos pontos foi feita a média de cada um e usado o algoritmo *Search Nearest Neighbor* como já foi referido. Utilizando as equações 38 e 39 e variando o número de pontos vizinhos,  $L$ , com 2, 3, 4 e 5 vizinhos mais próximos, obteve-se os seguintes erros em cada um dos pontos.



**Figura 22 Erro em cada um dos pontos aleatórios utilizando 2 vizinhos**

Com base nos resultados da Figura 22 é possível verificar que com 2 vizinhos o menor erro obtido foi de cerca de 3 cm, no ponto aleatório 23, e o maior erro de cerca de 94 cm, no ponto aleatório 18. Deste conjunto de 26 amostras a mediana do erro foi cerca de 46 cm.



**Figura 23 Erro em cada um dos pontos aleatórios utilizando 3 vizinhos**

Como se pode verificar pela Figura 23, com 3 vizinhos, o ponto aleatório com menor erro foi o 1 com cerca de 13 cm e o maior erro de cerca de 86 cm no ponto aleatório 11. Neste conjunto de 26 amostras a mediana do erro foi de cerca de 41,8 cm.





**Figura 24 Erro em cada um dos pontos aleatórios utilizando 4 vizinhos**

Utilizando 4 vizinhos, pode-se concluir pela Figura 24 que o erro mais baixo acontece no ponto aleatório 16 que de cerca de 22 cm enquanto que o erro máximo acontece no ponto 15 com cerca de 1,12m. A mediana do erro neste caso é de cerca de 50 cm.



**Figura 25 Erro em cada um dos pontos aleatórios utilizando 5 vizinhos**

Com a utilização de 5 vizinhos o erro mínimo foi de 15 cm, no ponto aleatório 8, e o máximo no ponto 15, com cerca de 1,28 m, como se pode constatar pelo gráfico da Figura 25. A mediana do erro com 5 vizinhos foi de cerca de 59,7 cm.

Na Figura 25 é possível ver um gráfico com as medianas dos erros em função do número de vizinhos, em cada um dos pontos aleatórios onde foram realizadas as experiências.



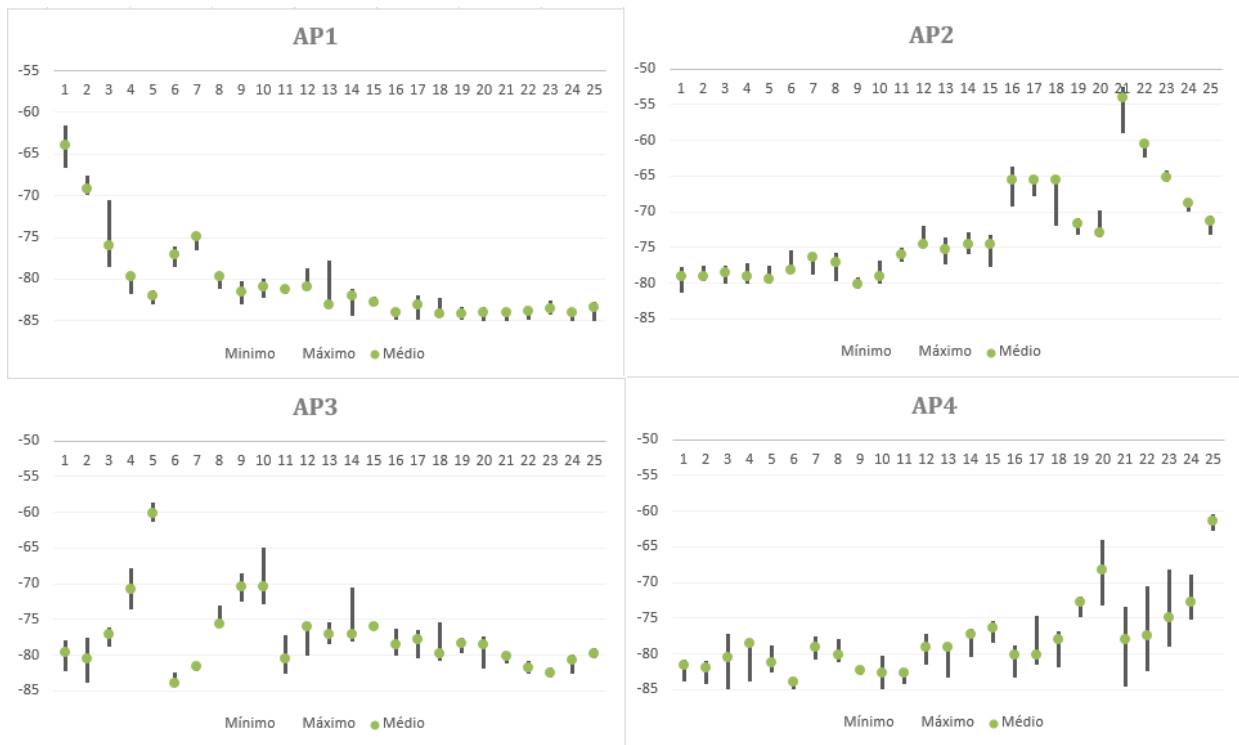
**Figura 26 Mediana do erro em função do n.º de vizinhos**

Pelo gráfico da Figura 26 é possível constatar que com a utilização de 3 vizinhos é possível ter uma maior precisão. Com os resultados obtidos, neste caso, na maior parte das vezes o algoritmo identificou os pontos de referência reais como sendo os vizinhos que estavam mais próximos do ponto aleatório. Por outro lado, o menos vantajoso será utilizar 5 vizinhos, uma vez que é o que tem uma mediana maior de erro. Isto acontece pelo facto do algoritmo assumir como seus vizinhos mais próximos alguns pontos de referência que estão mais distantes, de onde foram feitas as medições dos pontos aleatórios, não sendo esses os reais vizinhos. Existem várias causas para isto acontecer. Por exemplo, o facto do meio não ser uniforme, podendo haver rochas, humidade e outras substâncias no solo que possam condicionar o valor de RSS medido em determinada direção. Em relação às outras duas experiências para  $L$  igual a 2 e 4, obteve-se um erro superior ao de 3 vizinhos, mas inferior a 4 e 5.

#### **4.2. ALTERAÇÕES DOS VALORES DE RSS AO LONGO DO TEMPO**

A base de dados deve ser atualizada algumas vezes durante o dia para que a estimação da localização seja o mais precisa possível, uma vez que existem alterações climatéricas ao longo do dia, principalmente a nível de temperatura. Na Figura 27 está representada essa variação em cada um dos nós do sistema, em cada um dos pontos de referência, ao longo

do dia, de manhã, de tarde e ao fim do dia. Os pontos verdes representam os valores médios obtidos dessa experiência.



**Figura 27** Variação do RSS de cada AP em cada ponto de referência ao longo do dia

Como se pode verificar pela Figura 27 existiu efetivamente uma variação em cada ponto de referência.

## 5. CONCLUSÕES

O trabalho aqui apresentado teve como objetivo avaliar técnicas de localização de objetos utilizando uma WUN e o algoritmo *Search Nearest Neighbor*. Depois do estudo realizado sobre WUN e sistemas de localização foi possível encontrar uma solução para criar um sistema de localização. Com as experiências realizadas, utilizando esta solução, conseguiu-se uma mediana de erro que não ultrapassa os 41,8 cm.

O facto do solo ter as características referidas afetou diretamente os resultados finais das experiências. O solo à superfície não é 100 % plano, ou seja tem irregularidades ao longo de toda a área, sendo mais um fator que influenciou os resultados.

Com os resultados conclui-se que a solução proposta tem como principais vantagens, o baixo custo, arquitetura simples e precisão aceitável. Como maiores desvantagens o facto de ser necessário atualizar várias vezes a base de dados devido à variação das condições do meio ambiente, uma vez que as experiências foram realizadas num ambiente exterior.

Como trabalhos futuros, poderão considerar-se testes noutros tipos de solos, por exemplo em areia, para aplicação em futebol de praia, por exemplo, utilização de mais nós enterrados, de modo a verificar em quanto diminuiria o erro, e o desenvolvimento de uma aplicação de simulação de posicionamento neste contexto, com diferentes tipos de solo.



## *Referências Documentais*

- [1] AKYILDIZ, I.F; SU, W; SANKARASUBRAMANIAM, Y; CAYIRCI, E.– *Wireless Sensor Networks: A Survey, Computer Networks* 38 (2002) 393-422.
- [2] YU, Xiaoqing; WU, Pute; HAN, Wenting; ZHANG, Zenglin – *Overview of wireless underground sensor networks for agriculture, African Journal of Biothecnology, Vol. 11 (17)*, 28 de Fevereiro de 2012.
- [3] STUNTEBECK, Erich P.; POMPILI, Dario; MELODIA, Tomasso – *Wireless Underground Sensor Networks using Commodity Terrestrial Motes, In Wireless Networks 2006, WIMesh 2006, 2nd IEEE Workshop*, Setembro 2006.
- [4] LINEARD, M.; DEGAUQUE, P. – *Natural wave propagation in mine environments. Antennas and Propagation, IEEE Transactions* 48 (9): 1326-1339, Setembro de 2000.
- [5] OLIVEIRA, José – *Wi-Fi Underground Networks*, Tese, 2013.
- [6] CONCEIÇÃO, Sérgio – *NS-3 Simulation Model For Underground Networks*, Tese, 2014.
- [7] YOON, Suk-Un; CHENG, Liang; GHAZANFARI, Ehsan; PAMUCKU, Sibel; SULEIMAN, Muhannad T – *A radio propagation model for wireless underground sensor networks, IEEE Globecom URPM*, 2011.
- [8] AKYILDIZ, Ian F; SUN, Zhi; VURAN, Mehmet C. – *Signal propagation techniques for wireless underground communication networks, Physical Communication*, 2009.
- [9] VURAN, Mehmet C.; AKYILDIZ, Ian F. – *Channel model and analysis for wireless underground sensor networks in soil medium, Physical Communication*, 2010.
- [10] DONG, Xin; VURAN, Mehmet C. – *A Channel Model for Wireless Underground Sensor Networks Using Lateral Waves, Global Telecommunications Conference, GLOBECOM*, 2011.
- [11] SUN, Zhi; AKYILDIZ, Ian F. – *Connectivity in Wireless Underground Networks Sensor Networks, Sensor Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, (SECON)*, 2010.
- [12] SUN, Zhi; AKYILDIZ, Ian F; HANCKE, Gerhard P. – *Dynamic Connectivity in Wireless Underground Sensor Networks, Wireless Communications*, 2011.

- [13] DONG, Xin; VURAN, Mehmet C.; IRMAK, Suat – *Autonomous precision agriculture through integration of wireless underground sensor networks with center pivot irrigation systems*, *Ad Hoc Networks*, 2013.
- [14] SAEEDNIA, Farzam; KHORSHIDI, Shapour; MASOUMI, Mohssem – *The feature of underground channel for the wireless underground sensor networks*, *Journal of Electrical and Electronic Engineering*, 2014.
- [15] SUN, Zhi; AKYILDIZ, Ian F. – *Magnetic Induction Communications for Wireless Underground Sensor Networks*, *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, 2010.
- [16] PRASITHSANGAREE, P.; KRISHNAMURTHY, P; CHRYSANTHIS, P.K. – *On Indoor Position Location With Wireless LANs*.
- [17] PAHLAVAN, Kaveh; LI, Xinrong – *Indoor Geolocation Science and Technology, Next-Generation BroadBand Wireless Networks and Navigation Services*, 2002.
- [18] BENSKY, Alan – *Wireless Positioning Technologies and Applications*, Artech House, 2004.
- [19] PEREIRA, Esequiel da Veiga – *Desenvolvimento de um sistema de localização de fontes Rádio Frequência para aplicações indoor*, Tese, 2011.
- [20] SILVA, Luís Filipe de Almeida – *Sistema de Localização de Fontes Eletromagnéticas*, Tese, 2012.
- [21] SAVVIDES, A.; PARK, H.; SRIVASTAVA, M. – *The bits and flops of the n-hop multilateration primitive for node localization problems*, *First ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications*, Setembro de 2002.
- [22] SCHELL, S.V.; GARDNER, W.A. – *High-resolution direction finding*, *Proceeding of the IEEE*, 74 (7), 1986.
- [23] ROY, R.; KAILATH, T. – *Espirit-estimation of signal Parameters via rotational invariance techniques*, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Setembro de 1986.
- [24] KHODAYARI, Shahrzad; MALEKI, Mina; HAMED, Elham – *A RSS-based Fingerprinting Method for Positioning based on Historical Data*.
- [25] CHANG, Ning; RASHIDZADEH, Rashid – *Robust Indoor Positioning using Differential Wi-fi Access Points*, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol 56, No 3, Agosto de 2010.

- [26] BODAWY, Osama Mohamed; HASAN, Mustafa Ahmed Bani – *Decision Tree Approach to Estimate User Location in WLAN Based on Location Fingerprinting*, 2007, 24<sup>th</sup> National Radio Science Conference.
- [27] XIAO, Wendong; NI, Wei; TOH, Yue Khing – *Integrated Wi-Fi Fingerprinting and Inertial Sensing for Indoor Positioning*.
- [28] ROSHANA EI, Mahnaz; MALEKI, Mina – *Dynamic-KNN: A Novel Locating Method in WLAN Based on Angle of Arrival*, 2009 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA 2009), 4-6 de Outubro, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [29] MAO, Guoqiang; FIDAN, Baris – *Localization Algorithms and Strategies for Wireless Sensor Networks*, 2009.
- [30] Adaptador USB Wireless N de Alto Ganho de 150Mbps TL-WN722N,  
<http://www.tp-link.com.br/products/details/?model=tl-wn722n>