



Dissertação

Mestrado em Engenharia Informática – Computação Móvel

***Fotografar e Ver Através das Paredes Utilizando  
Wi-Fi***

**Carlos Miguel da Silva Ferreira**

Leiria, *Setembro* de 2018





Dissertação

Mestrado em Engenharia Informática – Computação Móvel

***Fotografar e Ver Através das Paredes Utilizando  
Wi-Fi***

**Carlos Miguel da Silva Ferreira**

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Professor Doutor João da Silva Pereira, Docente na Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria

Leiria, *Setembro de 2018*



# Dedicatória

---

Este trabalho é dedicado à Licínia, ao André e ao Tiago pelo apoio e boa disposição.

*Carlos Miguel da Silva Ferreira*



# Agradecimentos

---

Agradeço de forma muito especial a disponibilidade, o apoio, as ideias e sugestões do Professor Doutor João da Silva Pereira e também a participação interessada do professor Doutor Sílvio Priem Mendes.

Agradeço ainda a colaboração e suporte do Instituto de Telecomunicações.

*Carlos Miguel da Silva Ferreira*



# Nota Prévia

---

Do trabalho realizado resultou o seguinte:

- Submissão da patente: J. Pereira, C. Ferreira, “An Assembly For The Generation of a Two or Three-Dimensional Map of Obstacles in a Surrounding Area Through Walls, System Comprising it and Associated Method and Uses”, 2018
- Artigo em anexo: C. Ferreira, J. Pereira, S. Mendes, “IoT Scanning Through Walls Using Wi-Fi”, 2018.



# Resumo

---

Por razões de segurança ou na sequência de desastres naturais, acidentes ou ainda por quaisquer outras razões, pode ser útil detetar e identificar objetos e seres vivos dentro de edifícios ou estruturas similares. Pode ainda ser útil a deteção e identificação da estrutura interna dos edifícios ou de outro tipo de construções. Neste contexto, técnicas de análise e fotografia com recurso a Wireless Fidelity (Wi-Fi) ou outro tipo de Rádio Frequência (RF) podem ser usadas como uma abordagem inovadora que permita e facilite a deteção e a identificação referidas. Desta forma, usando tecnologia sem fios Wi-Fi é proposto neste trabalho, detetar e identificar objetos através de paredes. Este objetivo foi conseguido depois da força do sinal de rádio em cada direção ser modificada por obstáculos que estavam no caminho direto entre a fonte emissora e os recetores sem fios construídos sob a forma de uma matriz de antenas.

*Palavras-chave: Antena, Atenuação, Emissor, Força de Sinal, Wi-Fi*



# Abstract

---

For security reasons or following natural disasters, accidents or even for other reasons it may be useful to identify objects or living beings within buildings or detect building internal structure. In this context photography and scanning technique using Wi-Fi or another RF (Radio Frequency), can be used as an innovative approach to facilitate referred identification. By this way, using wireless technology, it was proposed, in this work, to detect and identify objects shape through the walls. This goal was achieved after the radio signal strength (RSS) in each direction be modified by obstacles that were in the direct path between wireless emitter and the wireless receivers build with an array of antennas.

*Keywords: Antenna, Emitter, Path loss, Radio Signal Strength, Wi-Fi.*



# Lista de figuras

---

Figura 2.1	Informação relativa à interface de rede do Raspberry Pi	6
Figura 3.1	PCT/GB2007/002416 (Fonte: Burchett, 2008)	10
Figura 3.2	Deteção de batimentos cardíacos (Baseado em Cho e Park, 2018)	11
Figura 3.3	Holography of Wi-Fi Radiation (P. M. Holl, F. Reinhard, 2017)	12
Figura 3.4	Passive Bistatic WiFi Radar	13
Figura 3.5	Through-Wall Imaging with Unmanned Aerial Vehicles Using WiFi	14
Figura 3.6	Wi-Vi tracks a single person's motion (Adib 2013)	15
Figura 3.7	Radar Comercial Prism 200	16
Figura 4.1	Estrutura de Investigação em SI Sistemas de Informação (adaptado (Hevner 2004))	21
Figura 5.1	Raspberry Pi 3 versão B	25
Figura 5.2	Matriz de antenas	25
Figura 5.3	Antena direcional ou antena Yagi	25
Figura 5.4	ESP8266-01S	26
Figura 5.5	Arquitetura geral	30
Figura 5.6	Representação da matriz de 25 antenas	33
Figura 5.7	Código PHP para inserir leitura RSSI da antena 01	39
Figura 5.8	Excerto de código PHP para mostrar valor RSSI instantâneo das antenas 01 e 02	39
Figura 5.9	Controlo dos valores instantâneos medidos pelos microcontroladores nas Antenas Yagi	40
Figura 5.10	Diferença de valor entre a antena de referência e as restantes antenas	40
Figura 5.11	Trigger para cálculo da diferença do valor RSSI entre a antena de referência e a antena 01 e respetiva calibração	40
Figura 5.12	Visualização de valores instantaneamente calibrados	41
Figura 5.13	Software Arduino utilizado para programação dos ESP8266-01S	42
Figura 5.14	Lista de placas compatíveis com o software Arduino	43
Figura 5.15	Funcionalidade do ESP8266-01S de cada Antena	44
Figura 5.16	ESP8266-01S – Inicialização de variáveis	45
Figura 5.17	ESP8266-01S – Ligação ao Raspberry Pi	46
Figura 5.18	ESP8266-01S – Medição de 100 valores RSSI por segundo e cálculo do seu valor médio	46
Figura 5.19	ESP8266-01S – Registo no servidor de base de dados	47
Figura 5.20	ESP8266-01S – Ciclo de processamento	47
Figura 5.21	ESP8266-01S – Testes Preliminares	49
Figura 5.22	ESP8266-01S – Variação da atenuação em função da distância	49
Figura 5.23	ESP8266-01S (modo STA) – Vista superior da unidade recetora nos testes preliminares	50
Figura 5.24	ESP8266-01S (modo STA) – Vista lateral da unidade recetora nos testes preliminares	50
Figura 5.25	ESP8266-01S (modo AP_STA) – Vista superior da unidade nos testes preliminares	51

Figura 5.26 Testes preliminares com obstáculo (tijolo)	51
Figura 5.27 Testes preliminares com obstáculo (tijolo + pilha de livros)	52
Figura 5.28 Resultado dos testes preliminares sem e com obstáculos	53
Figura 5.29 Ambiente de testes real	54
Figura 5.30 Esquema de ambiente real de testes	54
Figura 5.31 Código para decremento da potência RF no Raspberry Pi	55
Figura 5.32 Variação RSSI	55
Figura 6.1 Móvel de Madeira com a parede livre à sua esquerda	58
Figura 6.2 Atenuação provocada pelo Móvel de Madeira	58
Figura 6.3 Móvel de Madeira com a parede livre à sua direita	59
Figura 6.4 Atenuação provocada pelo móvel de Madeira na nova posição	59
Figura 6.5 Objeto de madeira revestido a metal	60
Figura 6.6 Atenuação apenas da parede	60
Figura 6.7 Atenuação do objeto de madeira revestido a metal	61
Figura 7.1 Trabalho Futuro	65
Figura 9.1 Equation for a Sine Wave ( <a href="http://www.ni.com/tutorial/4805/en/">http://www.ni.com/tutorial/4805/en/</a> )	103
Figura 9.2 Polar Representation of a Sine Wave ( <a href="http://www.ni.com/tutorial/4805/en/">http://www.ni.com/tutorial/4805/en/</a> )	103
Figura 9.3 I and Q Represented in Polar Form ( <a href="http://www.ni.com/tutorial/4805/en/">http://www.ni.com/tutorial/4805/en/</a> )	104
Figura 9.4 Time Domain of AM,FM, and PM Signals ( <a href="http://www.ni.com/tutorial/4805/en/">http://www.ni.com/tutorial/4805/en/</a> )	105
Figura 9.5 I/Q Data in the Complex Domain ( <a href="http://www.ni.com/tutorial/4805/en/">http://www.ni.com/tutorial/4805/en/</a> )	105
Figura 9.6 Representation of Magnitude vs. Time ( <a href="http://www.ni.com/tutorial/4805/en/">http://www.ni.com/tutorial/4805/en/</a> )	106
Figura 9.7 Polar Representation of Phase vs. Time ( <a href="http://www.ni.com/tutorial/4805/en/">http://www.ni.com/tutorial/4805/en/</a> )	106
Figura 9.8 3D Representation of Phase Modulation ( <a href="http://www.ni.com/tutorial/4805/en/">http://www.ni.com/tutorial/4805/en/</a> )	107
Figura 9.9 Mathematical Background of I/Q Modulation ( <a href="http://www.ni.com/tutorial/4805/en/">http://www.ni.com/tutorial/4805/en/</a> )	108
Figura 9.10 Hardware Diagram of an I/Q Modulator	108



# Lista de tabelas

---

Tabela 4.1 Tabela Diretrizes em DSR (adaptação Hevner et al./Design Science in IS Research 2004 )	20
Tabela 5.1 Tabela Dimensões dos elementos das antenas direcionais	24
Tabela 5.2 Tabela Diferença de ganho	27
Tabela 5.3 Tabela Requisitos funcionais da unidade emissora (Raspberry Pi)	27
Tabela 5.4 Tabela Requisitos funcionais da unidade recetora (ESP8266-01S)	28
Tabela 5.5 Tabela Requisitos não funcionais da unidade emissora (Raspberry Pi)	29
Tabela 5.6 Tabela Requisitos não funcionais da unidade recetora (ESP8266-01S)	29
Tabela 5.7 Tabela Lista sequencial dos principais comandos para configuração do Raspberry Pi	35
Tabela 5.8 Tabela Lista sequencial dos principais comandos para configuração AP no Raspberry Pi	36
Tabela 5.9 Tabela Lista dos principais comandos para permissão de acesso remoto à base de dados	37
Tabela 5.10 Tabela Lista de ações de otimização do PHP	38



# Lista de Siglas

---

<b>AP</b>	<b>Access Point</b>
<b>AP_STA</b>	Access Point – Station
<b>AM</b>	Amplitude Modulation
<b>BSS</b>	Basic Service Set
<b>2D</b>	Bidimensional
<b>dBm</b>	Decibel-milliwatts
<b>DSR</b>	Design Science Research
<b>DHCP</b>	Dynamic Host Configuration Protocol
<b>FTP</b>	File Transfer Protocol
<b>FM</b>	Frequency Modulation
<b>GUI</b>	Graphic User Interface
<b>PHP</b>	Hypertext Preprocessor
<b>HTTP</b>	HyperText Transfer Protocol
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronic Engineers
<b>IQ</b>	In-phase/Quadrature phase
<b>ISM</b>	Industrial, Scientific and Medical
<b>IDE</b>	Integrated Development Environment
<b>IoT</b>	Internet Of Things
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>Mbps</b>	Megabits Per Second
<b>MIFA</b>	Meandered planar Inverted-F Antenna
<b>MIMO</b>	Multiple-input and Multiple-output
<b>MS</b>	Milissegundos
<b>NOOBS</b>	New Out Of Box Software
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency division Multiplexing

<b>OSI</b>	Open System Interconnection
<b>PM</b>	Phase Modulation
<b>P2P</b>	Peer to Peer
<b>PCB</b>	Printed Circuit Board
<b>RF</b>	Rádio Frequência
<b>RAM</b>	Read Only Memory
<b>RTOS</b>	Real Time Operating System
<b>RSSI</b>	Received Signal Strength Indication
<b>RISC</b>	Reduced Instruction Set Computer
<b>SD</b>	Secure Digital
<b>SI</b>	Sistemas de Informação
<b>SIR</b>	Signal Interference Ratio
<b>SoftAP</b>	Software enabled Access Point
<b>SSID</b>	Service Set Identifier
<b>SSD</b>	Solid State Drive
<b>STA</b>	Station
<b>STBC</b>	Space Time Block Code
<b>MySQL</b>	Strutured Query Language
<b>3D</b>	Three-dimensional
<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol
<b>TTW</b>	Through The Wall
<b>UWB</b>	Ultra Wide Band
<b>VSWR</b>	Voltage Standing Wave Ratio
<b>Wi-Fi</b>	Wireless Fidelity
<b>WECA</b>	Wireless Ethernet Compatilility Alliance
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network



# Índice

---

<b>DEDICATÓRIA</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>V</b>
<b>NOTA PRÉVIA</b>	<b>VII</b>
<b>RESUMO</b>	<b>IX</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>XVI</b>
<b>LISTA DE SIGLAS</b>	<b>XVIII</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>XXI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Definição do problema	2
1.2 Hipótese	2
1.3 Justificação e Importância	2
<b>2. TECNOLOGIA WI-FI</b>	<b>5</b>
2.1 Wi-Fi	5
2.2 Tecnologia Wi-Fi usada	6
<b>3. ESTADO DA ARTE</b>	<b>8</b>
3.1 Radar for Through Wall Detection	8

3.2	Detection of Heart Rate through a Using UWB	10
3.3	Holography of Wi-fi Radiation	12
3.4	Through-the-Wall Sensing of Personnel Using Passive Bistatic WiFi Radar at Standoff Distances	13
3.5	3D Through-Wall Imaging with Unmanned Aerial Vehicles Using WiFi	14
3.6	See Through Walls with Wi-Fi	15
3.7	Prism 200	16
<b>4.</b>	<b>METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO</b>	<b>18</b>
4.1	Principais Conceitos DSR	18
4.1.1	Investigação	18
4.1.2	Projetar	18
4.1.3	Diretrizes	20
4.1.4	Estrutura de investigação	21
<b>5.</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA</b>	<b>23</b>
5.1	Apresentação da solução	23
5.2	Requisitos	27
5.3	Desenho do sistema	30
5.3.1	Arquitetura	30
5.3.2	Matriz RSSI	31
5.4	Implementação	33
5.4.1	Implementação no Raspberry Pi (Emissor)	33
5.4.2	Implementação no ESP8266-01S (recetor)	41
5.4.3	Testes Preliminares	47
5.4.4	Potência ideal de emissão do Raspberry Pi	53
<b>6.</b>	<b>TESTES E AVALIAÇÃO</b>	<b>57</b>
6.1	Deteção de objetos	57
6.2	Avaliação	61

<b>7. CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO</b>	<b>64</b>
7.1 Conclusão	64
7.2 Trabalho futuro	64
<b>8. BIBLIOGRAFIA</b>	<b>67</b>
<b>9. ANEXOS</b>	<b>75</b>
ANEXO A: (Patente) An Assembly For The Generation of a Two or Three-Dimensional Map of Obstacles in a Surrounding Area Through Walls, System Comprising it and Associated Method and Uses	75
ANEXO B: (Artigo) IoT Scanning Through Walls Using Wi-Fi	94
ANEXO C: What is I/Q Data	102
Background on Signals	103
I/Q Data in Communication Systems	104
So Why Use I/Q Data?	107
ANEXO D: Autorização da National Instruments	110



# 1. Introdução

---

Nos últimos anos, tem-se verificado um crescente interesse na Internet das Coisas (*Internet of Things*, IoT). A evolução da tecnologia favoreceu o aparecimento de dispositivos Wi-Fi que, à medida que se tornam mais sofisticados são também menores, mais eficientes em termos de consumo de energia e mais baratos. Todos estes fatores têm atraído não apenas os departamentos de pesquisa e investigação das universidades, mas também a indústria em geral. O resultado traduz-se no surgimento de numerosos e interessantes projetos académicos e comerciais sobre este assunto que, por si só, é muito amplo.

Assim, sobre o tema “Ver Através de Paredes” (Through The Wall, TTW), existem soluções comerciais que utilizam a Rádio Frequência (RF) em aplicações de segurança e resgate. A maioria utiliza o sistema de Banda Ultra Larga (Ultra-Wide Band, UWB) como o sistema da Cambridge Consultants: Prism200. O Prism200 é um radar comercial TTW que fornece visão 3D através de paredes de tijolo ou de betão com um alcance de até 20 metros. Esta tecnologia fornece cobertura abrangente de espaços internos e tem vantagens bem conhecidas sobre soluções de banda estreita convencionais, mas o seu custo elevado e a suscetibilidade de receber interferência de sinais em faixas espectrais sobrepostas e a baixa resolução constituem importantes desvantagens que devem ser consideradas.

Por outro lado, como as redes Wi-Fi estão presentes num número crescente de edifícios em todo o mundo, existem alguns projetos TTW que usam essas fontes Wi-Fi para tentar detetar a posição de pessoas ou objetos dentro de edifícios. No entanto, se for necessário detetar pessoas ou objetos num edifício sem qualquer fonte Wi-Fi ativa, esses projetos TTW não oferecem uma resposta adequada.

Desta forma, a proposta deste trabalho é apresentar um projeto de baixo custo que possa contribuir para a deteção de objetos e seres vivos dentro de edifícios que não possuam redes Wi-Fi ativas.

Assim, no espaço livre, a potência de radio frequência varia inversamente com o quadrado da distância do recetor em relação ao transmissor o que significa que quanto mais próximo está o recetor maior é a força de sinal recebido.

Além disso, enquanto a potência do transmissor aumenta a distância que um sinal pode percorrer, a atenuação provocada pelos mais diversos fatores reduz essa mesma distância.

É do conhecimento geral, que os sinais de Rádio Frequência (RF) são influenciados não apenas pelo meio ambiente, mas também por outros fatores. Isso significa que o nevoeiro, objetos, seres humanos e paredes atenuam a potência do sinal entre os transmissores e os recetores. Além disso, é importante referir que a atenuação também depende da frequência utilizada.

Neste contexto, o Indicador de Intensidade do Sinal Recebido (Received Signal Strength Indicator, RSSI) descreve a potência total do sinal recebido e é, normalmente, expresso dBm.

Adicionalmente, (Rappaport, 2001) o modelo *Path Loss* de propagação no espaço livre e o (Crow, 1988) *Shadowing model* são métodos comuns de propagação de sinal RSSI para redes de sensores sem fio (Wireless Sensor Network, WSN).

Neste trabalho foi usado um Raspberry Pi não só como emissor, mas também como servidor Web e servidor de base de dados. Como unidade recetora foi usada uma matriz direcional de pelo menos dezasseis antenas Yagi (Antena direcionais). Estas, por sua vez, mediram individualmente os valores da força dos sinais RF emitidos pelo Raspberry Pi, depois destes, serem modificados pelos obstáculos que se encontravam no caminho entre a unidade emissora e as unidades recetoras tendo, então, transmitido de volta os dados para a base de dados ativa no Raspberry Pi.

Os dados registados foram depois tratados com o objetivo de serem produzidas imagens que refletissem a atenuação provocada pelos obstáculos que, no caso, foram em primeiro lugar, uma parede real e um móvel de madeira com livros no seu interior e em segundo lugar, a mesma parede e um objeto de madeira revestido a metal.

O número de antenas da matriz está relacionado com a resolução, uma vez que cada antena representa um pixel da imagem produzida.

## 1.1 Definição do problema

A evolução tecnológica é intrínseca à própria existência do homem. Desde tempos remotos, o homem sentiu, necessidade de criar e melhorar não só os objetos que usava, mas também as técnicas de os usar, em seu proveito. É este espírito de “querer ir mais além” que hoje o continua a motivar. A diferença é que hoje a evolução tecnológica acontece de forma vertiginosa, apresentando-se ao serviço da humanidade de forma quase invisível não só devido à miniaturização que a caracteriza, mas também porque passou a integrar ativa e impercetivelmente os espaços humanos, enriquecendo-os com serviços cada vez mais imprescindíveis.

É neste contexto que a Internet das Coisas (Internet of Things, IoT) se revela como um parceiro tecnológico importante perante a necessidade de detetar e, se possível, identificar objetos e seres vivos que se encontram dentro de edifícios nas mais diversas situações, sejam elas de segurança ou de resgate.

## 1.2 Hipótese

O estudo dos sinais de rádio frequência Wi-Fi que ao serem modificados permite detetar e identificar objetos ou seres vivos dentro de edifícios.

## 1.3 Justificação e Importância

Nos últimos anos têm ocorrido em países distintos ataques violentos dos quais resultou a morte de milhares de civis. Estes ataques desencadearam um sentimento global de insegurança. Como resposta, as entidades responsáveis, servindo-se de toda e mais

inovadora tecnologia existente, têm intensificado ações que visam garantir a segurança e o bem-estar das populações.

Por outro lado, não são raras as notícias do colapso de pontes, barragens ou de estruturas similares, assim como notícias de terremotos ou outros desastres naturais.

Já no âmbito da construção civil, nomeadamente na reconstrução ou reabilitação de edifícios antigos, há situações em que a componente estrutural é desconhecida ou mesmo casos em que a rede de abastecimento de água é antiga e construída com recurso a tubagens metálicas ou ainda casos em que a rede de saneamento tenha sido construída em condutas de cerâmica.

O tema da presente dissertação, reveste-se assim de especial importância pelo contributo que pode dar na resolução dos problemas acima identificados.



## 2. Tecnologia Wi-Fi

---

Neste capítulo é apresentado um pequeno resumo da tecnologia Wi-Fi utilizada na implementação deste trabalho.

### 2.1 Wi-Fi

Até há alguns anos a comunicação entre sistemas era essencialmente suportada com recurso ao protocolo Ethernet, assente na arquitetura 802.3, que corresponde a padrões que especificam a camada física do modelo OSI (Open System Interconnection). Nesta arquitetura, as ligações físicas são estabelecidas entre os diferentes dispositivos de rede (*switchs*, *routers*) através de cablagem em cobre ou, mais recentemente, em fibra.

Contudo, em 1999, depois de um esforço de harmonização dos padrões, foi criada a WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance) e o foco de entidades como a 3COM, Symbol Technologies, Nokia ou a Lucent foi o de trabalharem nas especificações IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) 802.11. Entretanto, em 2003, a WECA recebeu a designação Wi-Fi Alliance.

Wi-Fi (Wireless Fidelity) é, portanto, um conjunto de especificações para redes locais sem fios WLAN (Wireless Local Area Network) que se baseia no padrão 802.11 e permite a implementação de redes sem fios que interligam computadores ou impressoras a outros dispositivos que cumpram este padrão, desde *smartphones*, *tablets*, consolas de jogos até televisões e frigoríficos.

Neste tipo de rede a transmissão é realizada por RF (Rádio Frequência) e, entre outras, tem a vantagem de facilitar, a custos mais reduzidos, a comunicação entre dispositivos incluindo dispositivos utilizados em IoT (Internet of Things).

Para que uma rede sem fios funcione é necessário que, pelo menos, uma máquina cliente no modo STA (Station) se ligue a uma máquina que lhe fornece o serviço no modo AP (Access Point), criando-se então uma rede designada BSS (Basic Service Set). Cada uma destas redes identifica-se pelo seu SSID (Service Set Identifier) e é esta a característica que permite distinguir diferentes redes numa mesma área ou zona. Como alternativa, o SSID pode ser configurado para ficar oculto por questões reforço de segurança.

## 2.2 Tecnologia Wi-Fi usada

Neste projeto foram usados, como se mostra mais à frente no Capítulo 5, um Raspberry Pi 3 B no modo AP e 16 unidades ESP8266-01S no modo STA.

Em termos genéricos, o Raspberry Pi 3 B integra uma interface de rede sem fios que cumpre a norma 802.11n, ou seja, pode operar na frequência de 2,4 ou 5 GHz, transmitir dados a 300 Mbps e usar os métodos de modulação OFDM (Orthogonal Frequency division Multiplexing) ou MIMO (Multiple-input and multiple-output). No caso específico deste trabalho, a frequência foi 2,4 GHz e a largura de banda da interface de rede sem fios foi 20 MHz como se mostra na figura 2.1. Na Secção 5.4.4 do Capítulo 5 explica-se a razão pela qual a potência de transmissão desta interface foi definida para o valor 7 dBm.

Por seu lado, o ESP8266-01S cumpre as normas 802.11n, softAP (Software enabled Access Point) e Wi-Fi Direct ou P2P (Peer-to-Peer). Esta última permite que dois dispositivos estabeleçam uma ligação direta entre si sem a necessidade de um AP, enquanto que a norma softAP permite que o dispositivo atue como AP. À semelhança do Raspberry Pi o ESP8266-01S usa os métodos de modulação OFDM e MIMO

Este microcontrolador, implementa STBC (Space Time Block Code) nos modos 1x1 MIMO e 2x1 MIMO, podendo acordar e transmitir pacotes em menos de 2 ms. No modo 802.11b consegue ainda fornecer uma potência de saída de +19,5 dBm

```
pi@raspberrypi:~ $ iw wlan0 info
Interface wlan0
  ifindex 3
  wdev 0x1
  addr b8:27:eb:49:e2:49
  ssid UAV-AP
  type AP
  wiphy 0
  channel 5 (2432 MHz), width: 20 MHz, center1: 2432 MHz
  txpower 7.00 dBm
```

Figura 2.1 Informação relativa à interface de rede do Raspberry Pi



## 3. Estado da Arte

---

Este capítulo mostra os trabalhos relevantes que tenham produzidos resultados na área da investigação da detecção de objetos ou seres vivos dentro de edifícios com recurso à radio frequência.

### 3.1 Radar for Through Wall Detection

A aplicação internacional PCT/GB2007/002416 publicada a 3 de janeiro de 2008 com o número WO/2008/001092 e com o título RADAR FOR THROUGH WALL DETECTION resultou do trabalho dos inventores Michael Hugh Burchett, Per Arne Vincent Utsi, Gordon Kenneth Andrew Oswald, Edwin Christopher Carter, Jonathan Peter Edgcombe, Gary Kemp e Robert John Carter.

Esta invenção refere-se a dispositivos e sistemas de radar e aos seus métodos de operação para detetar a presença de pessoas dentro de estruturas, atrás de paredes ou debaixo de estruturas colapsadas e a fornecer informação relacionada com o desenho e conteúdo das estruturas (por exemplo edifícios) incluindo a localização de itens estáticos e móveis dentro destas. Em particular, a invenção pode ser adaptada para ser usada em operações de segurança, situações antiterroristas ou sequestro e em operações de busca e salvamento.

Em aplicações de monitorização através de paredes, os alvos analisados podem ser seres humanos com componentes flutuantes externos associados a movimentos de respiração, a movimentos dos membros ou a flutuações internas como é o caso de batimentos cardíacos. Neste tipo de aplicações, os objetos podem ser obscurecidos pelas paredes monitorizadas e se os objetos não se moverem a sua detecção é mais difícil porque não há variações (Chen, 2011) Doppler associadas ao movimento.

O movimento de um objeto em relação a um sistema de detecção dá origem a deslocamentos de frequência de Doppler, geralmente através de vários comprimentos de onda da frequência de interesse. Estes deslocamentos podem ser analisados para identificar um objeto em movimento e determinar a sua velocidade e aceleração.

De acordo com os autores há aplicações de detecção e análise através de paredes para as quais variações relativamente pequenas no movimento de um objeto ou do componente de um objeto seriam particularmente benéficas. Este tipo de detecção é, contudo, muito difícil porque o efeito de Doppler é muito reduzido. Com a invenção associada a este projeto, os autores propõem, portanto, fornecer um radar aperfeiçoado, equipado com meios para transmitir sinais através de paredes e meios para receber porções refletidas dos sinais transmitidos.

Ainda de acordo com os autores, os obstáculos podem ser de materiais de construção como betão, madeira, pedra, gesso, tijolos ou materiais similares, podendo estar na forma paredes e divisórias ou até sob a forma de entulho.

Preferencialmente os transmissores e recetores devem operar num de dois modos: em banda larga ou banda ultra larga (UWB - Ultra Wide Band) e em banda estreita. No primeiro modo devem poder transmitir e receber sinais curtos de 1 a 20 milhões de impulsos por segundo. No segundo modo devem poder realizar as operações de transmissão e receção com larguras de banda inferiores e estar preparados para operar de forma contínua com um ciclo de trabalho superior a 75%. Desta forma, fica garantida uma amplitude de operação entre 200 MHz e 4 GHz gerada por dois osciladores, interligados a 15 antenas de transmissão (um para banda larga ou ultra larga e outra para banda estreita) e a comutação entre os dois modos de funcionamento do radar.

Os meios recetores devem ser compostos por várias antenas que constituem a matriz e deve-se garantir uma distância entre antenas adjacentes na ordem de 3 comprimentos de onda da frequência central de operação.

O radar deve compreender meios para medir o ângulo de incidência dos sinais refletidos recebidos, nomeadamente os ângulos de (Conant, 1836) latitude e azimute.

O radar inclui circuitos adaptados para modular o sinal de banda estreita com um código de 32 Mbits/s e para fazer variar manual ou de forma automática a amplitude de varrimento, dependendo se um objeto é ou não detetado num modo particular de operação. Isto é, se num determinado modo de operação, por exemplo em banda larga, a análise realizada pelo radar não detetar o objeto este pode alternar automaticamente para o modo de banda estreita ou banda estreita codificado.

O radar inclui meios para realizar a transformada de Fourier dos sinais refletidos e para comparar tanto um sinal refletido como uma versão do sinal refletido em que a fase difere do primeiro. Esta diferença pode ser, por exemplo de 90 graus e pode proporcionar uma maior sensibilidade de deteção (National Instruments, 2018). Os meios de comparação podem usar métodos de amostragem de IQ (*in-phase/quadrature phase*) (anexo C) no processamento do sinal refletido, independentemente do modo de operação do radar: Modo de banda larga, banda estreita ou banda estreita codificada.

O radar está adaptado para ser posicionado contra uma parede exterior da estrutura a ser analisada e também para ser posicionado aproximadamente entre 1 e 20 metros de distância de uma parede externa e para ser transportado por um veículo terrestre ou aéreo.

O radar compreende ainda meios para mostrar em duas ou três dimensões os objetos detetados ou para indicar a confiança relativa da deteção de um objeto e meios para mostrar resultados do processamento ou pós processamento dos sinais recebidos, ou seja, deverá poder mostrar pelo menos um dos seguintes resultados: dados em bruto do sinal, um espectrograma, um gráfico de atividade, um gráfico de subtração de desfasamento ou um gráfico de direção.

O sistema pode ser composto por uma ou mais unidades de radar posicionadas ortogonalmente entre si e podem ser ligadas a unidades externas de processamento de dados como computadores convencionais e/ou a uma unidade central de processamento remoto.

Num caso típico de uso pode-se usar Banda Ultra Larga, preferencialmente para examinar as partes mais próximas do edifício. Em segundo lugar a Banda Estreita Codificada pode ser usada para permitir a indicação de movimento e, possivelmente, localização em partes mais distantes do edifício, alcançados através do aumento da potência média e por fim Banda Estreita para indicação de atividade através do uso de (Chen, 2011) micro-Doppler.

As aplicações que podem fazer uso desta tecnologia incluem as funcionalidades de localização, determinação de ocupação de sala, detecção de respiração e frequência cardíaca.

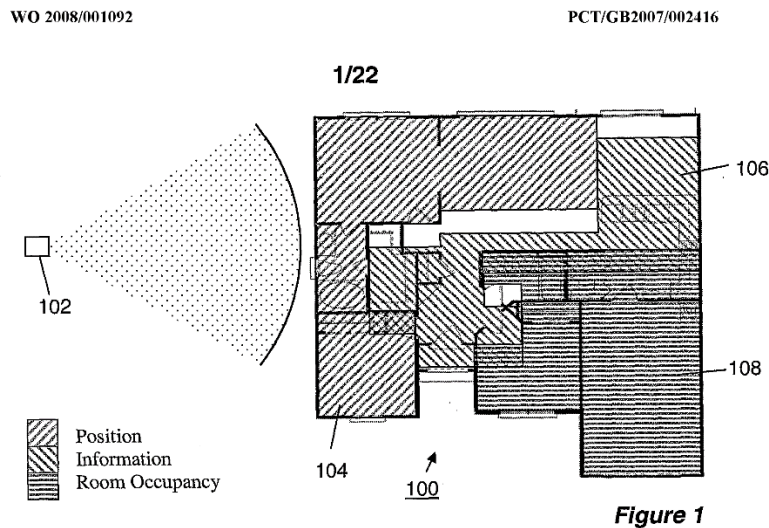


Figura 3.1 PCT/GB2007/002416 (Fonte: Burchett, 2008)

## 3.2 Detection of Heart Rate through a Using UWB

Medir, através de paredes sem necessidade de contacto direto as funções fisiológicas do corpo humano, pode ser útil em sistemas de saúde e cuidados continuados, de segurança e de vigilância. Neste contexto, o artigo de investigação “Detection of Heart Rate through a Wall Using UWB Impulse Radar” aceite a 1 de fevereiro de 2018 e publicado a 1 de abril de 2018 pela revista Hindawi, usa impulsos de radar de banda ultra larga para detetar o batimento cardíaco humano. Este trabalho tem como vantagens o baixo consumo de energia e o facto de ser inofensivo para o corpo humano. A frequência cardíaca é extraída pelo processamento do sinal de radar no domínio do tempo, usando de seguida, uma análise de componentes principais dos dados da série temporal para indicar as variações de fase causadas pelos batimentos cardíacos. Os resultados experimentais deste trabalho mostram que é possível a deteção precisa da frequência cardíaca com o referido método.

A configuração usada para medir os sinais é a da figura 3.2. Nesta vemos o emissor (TX) e o recetor (RX). Os sinais emitidos pelo *transceiver* têm uma potência média de -12,6 dBm e são amplificados pela antena para 6 dBi. O sistema de radar UWB (Ultra Wide Band) converte então os sinais recebidos para a forma digital e envia-os para o computador que executa o algoritmo proposto.

O sistema de sensores ECG (eletrocardiograma) é sincronizado com o sistema de radar UWB utilizando a mesma base de tempo e foi feita a comparação dos batimentos cardíacos entre os dois sistemas.

Neste trabalho foi utilizado um novo método para detetar o batimento cardíaco através de paredes utilizando impulsos de radar UWB e, ao contrário dos métodos convencionais, que processam o sinal de radar no domínio da frequência para extrair a informação da pulsação do sinal de radar refletido no corpo humano, neste trabalho, o sinal de radar foi processado no domínio do tempo. Para conseguir isso, foi construído um conjunto de quadros pela acumulação de sinais de radar a intervalos de tempo regulares. Este conjunto de quadros foi então convertido no formato binário e as informações de pulsação foram extraídas do conjunto de dados da série temporal que indicava a presença de batimentos cardíacos. Nos testes foram extraídas as frequências do batimento cardíaco de indivíduos a 1 metro da antena.

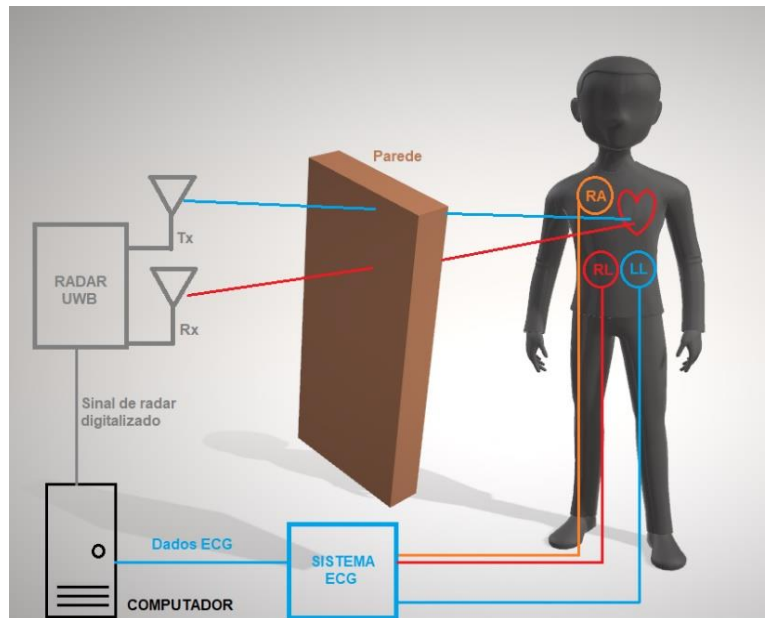


Figura 3.2 Detecção de batimentos cardíacos (Baseado em Cho e Park, 2018)

### 3.3 Holography of Wi-fi Radiation

O trabalho Holography of Wi-Fi Radiation desenvolvido pelos investigadores Philipp M. Holl e Friedemann Reinhard é um bom exemplo do uso de luz coerente emitida por sistemas Wi-Fi. Neste trabalho, a radiação que resulta da propagação no espaço de ondas eletromagnéticas forma um holograma que permite identificar objetos localizados entre uma unidade emissora e uma unidade recetora (Holl, Reinhard, 2017).

No caso concreto da figura 3.3, os autores (Holl, Reinhard, 2017) consideram a tecnologia Wi-Fi como radiação eletromagnética coerente, ou seja, ondas eletromagnéticas com amplitude e fase bem definidas. Na imagem referida, uma frente de onda bidimensional em qualquer plano do espaço representa um holograma e codifica uma vista tridimensional de todos os objetos atravessados pelo feixe de luz, podendo ser recuperada pela sua reconstrução digital. Os autores registaram os hologramas da radiação Wi-Fi varrendo um plano bidimensional com a dimensão de 1 metro com a antena mostrada na figura 3.3. Os sinais Wi-Fi foram registados no domínio do tempo com um osciloscópio que também registou os sinais de uma antena de referência. A reconstrução digital dos dados foi realizada com recurso a algoritmos específicos.

Este trabalho abre caminho para a geração de imagens tridimensionais e localização que não exigem com sinais de banda ultra larga ou emissores direcionados.

O artigo “Holography of Wi-Fi Radiation” foi publicado 5 de maio de 2017 na Physical Review Letters.

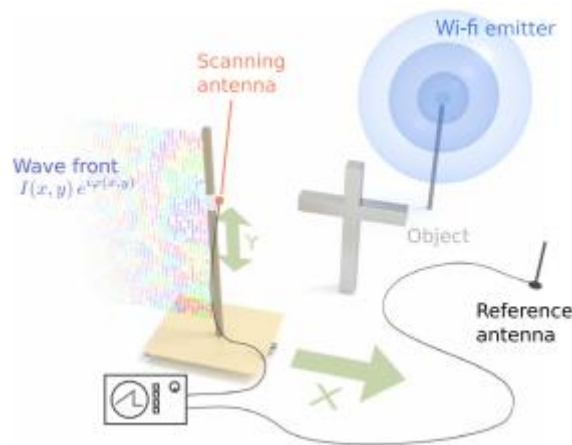


Figura 3.3 Holography of Wi-Fi Radiation (P. M. Holl, F. Reinhard, 2017)

### 3.4 Through-the-Wall Sensing of Personnel Using Passive Bistatic WiFi Radar at Standoff Distances

Os autores (Chetty, Smith, Woodbridge, 2011) do artigo “Through-the-Wall Sensing of Personnel Using Passive Bistatic WiFi Radar at Standoff Distances”, publicado na IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, investigaram a viabilidade de detetar o movimento de pessoas através de paredes.

No seu trabalho propuseram o uso de um radar Wi-Fi passivo biostático a uma determinada distância de segurança. Neste contexto, conduziram uma série de experiências com pessoas em movimento dentro de um edifício com Wi-Fi ativo.

Os alvos foram monitorizados do exterior do edifício utilizando um recetor múlti-estático passivo. Os dados foram processados *offline* para fornecer informações de alcance e de Doppler.

De acordo com os autores, os resultados apresentaram as primeiras deteções TTW (Through The Wall) de pessoas em movimento usando um radar Wi-Fi passivo.

Os autores (Chetty, Smith, Woodbridge, 2011) referem ainda o seguinte: “Os desvios Doppler medidos concordam com os previstos pela teoria biestática. Uma análise mais aprofundada dos dados revelou que o sistema é limitado pela relação sinal-interferência (SIR) e não pela relação sinal-ruído. Também mostraram que uma nova técnica de supressão de interferência baseada no algoritmo CLEAN pode melhorar o SIR em aproximadamente 19 dB. Essas descobertas iniciais encorajadoras demonstram o potencial de uso do radar WiFi passivo como um sensor de deteção TTW de baixo custo com ampla aplicabilidade.

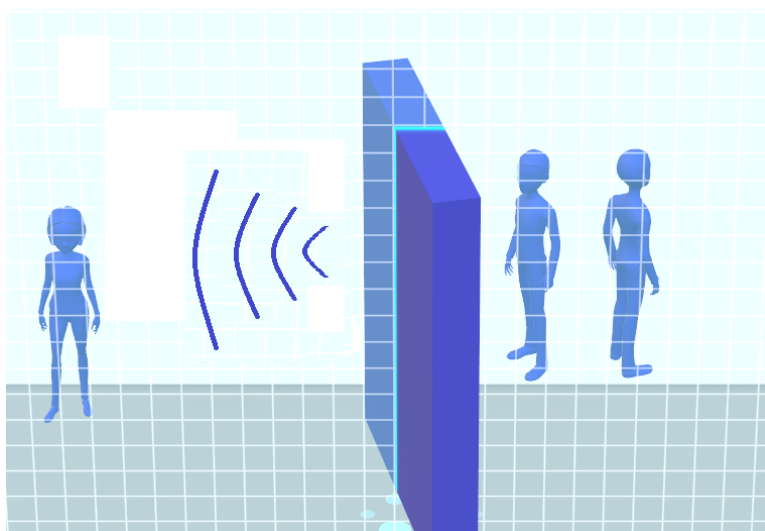


Figura 3.4 Passive Bistatic WiFi Radar

### 3.5 3D Through-Wall Imaging with Unmanned Aerial Vehicles Using WiFi

O tema “3D Through-Wall Imaging with Unmanned Aerial Vehicles Using WiFi” corresponde ao artigo publicado em 2017 na 16th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN) pelos autores Karanam e Mostofi.

Neste artigo os autores utilizaram dois veículos aéreos autónomos equipados com antenas direcionais para detetar e medir objetos através de paredes como mostrado na figura 3.5.

No caso concreto os autores propuseram uma abordagem ao tema baseada na modelação de campo aleatório de Markov e no processamento de sinal esperso para produção de imagens 3D. O processamento das imagens tridimensionais foi realizado com base na medição da potência dos sinais Wi-Fi.

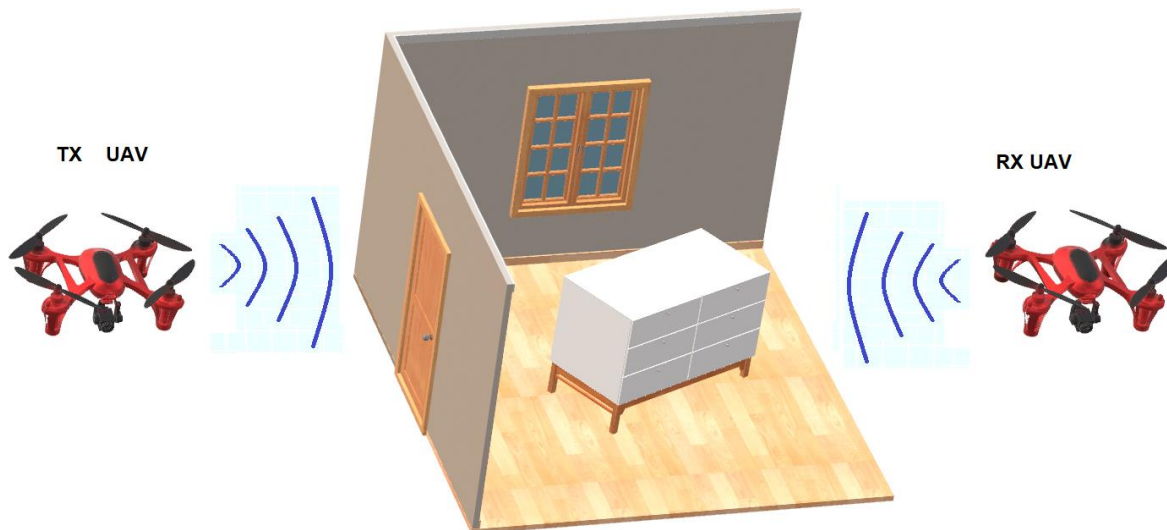


Figura 3.5 Through-Wall Imaging with Unmanned Aerial Vehicles Using WiFi

### 3.6 See Through Walls with Wi-Fi

O tema “See Through Walls with Wi-Fi” corresponde a um trabalho submetido em 2013 no Departamento de engenharia Elétrica e de Ciências de Computação do Instituto de Tecnologia de Massachusetts pelos autores F. Adib e D. Katabi.

Neste trabalho os autores propuseram detetar o movimento de objetos através de paredes com recurso a duas inovações principais como mostrado na figura 3.6.

Primeiro: usando o método MIMO (Multiple-input and Multiple-output), isto é, utilizando múltiplas antenas de emissão e receção para criar caminhos múltiplos e eliminar as reflexões de objetos estáticos focando-se apenas nos alvos em movimento.

Segundo: rastreando o movimento humano analisando o feixe produzido por uma matriz de antenas.

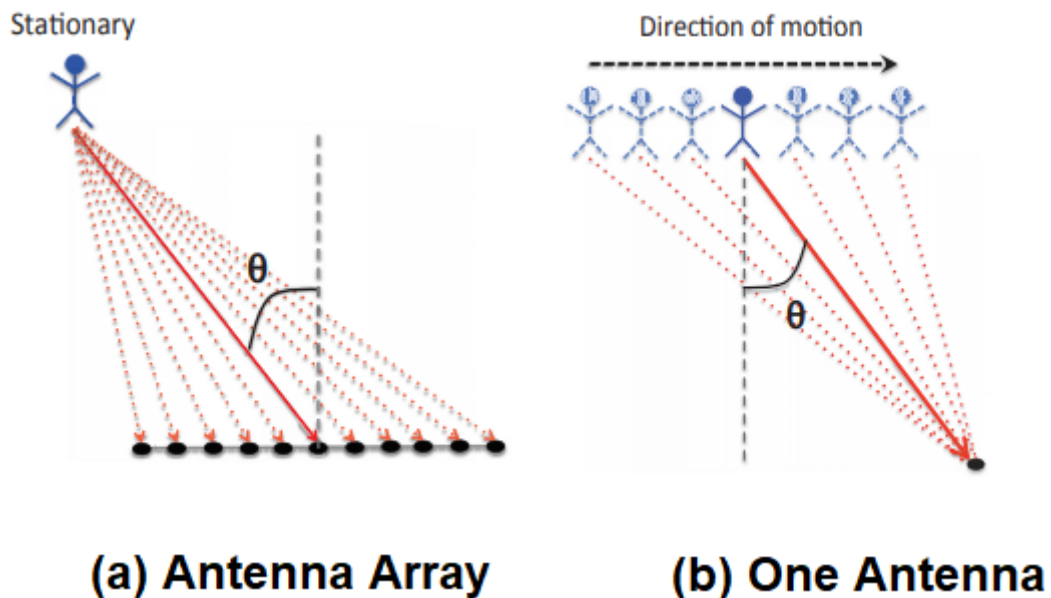


Figura 3.6 Wi-Fi tracks a single person's motion (Adib 2013)

### 3.7 Prism 200

O Prism 200 (figura 3.7) é um radar comercial desenvolvido pela Cambridge Consultants que é utilizado pelas forças de segurança e resgate de cerca de 40 países. Este radar permite a visualização de pessoas em movimento através de paredes de madeira, tijolo, betão ou outros materiais de construção civil.

O Prism 200 é um radar que funciona em UWB (Ultra Wide Band) tem um alcance de 20 metros e proporciona uma cobertura abrangente (120° na horizontal e 90° na vertical) dos espaços internos graças à disposição interna das suas antenas.



*Figura 3.7 Radar Comercial Prism 200*



## 4. Metodologia de Investigação

---

O presente capítulo incorpora a abordagem da Ciência do Projeto (*Design Science Reserarch, DSR*) e a sua importância na investigação científica conducente à resolução de problemas nas áreas de negócios, ciência e tecnologia. No caso do presente trabalho esta foi a metodologia seguida.

### 4.1 Principais Conceitos DSR

A metodologia DSR corresponde a um conjunto de técnicas e perspetivas sintéticas e analíticas para a realização de investigação em Sistemas de Informação (SI). A investigação em DSR inclui duas atividades principais. A primeira corresponde à criação de conhecimento novo através do desenho de novos artefactos inovadores, enquanto que a segunda tem a ver com a análise do uso e/ou da performance dos artefactos, incorporando-se nesta última uma abordagem de reflexão e abstração. Os artefactos criados em processos DSR podem incluir algoritmos, interfaces homem/computador e metodologias ou linguagens de projeto de sistemas, não estando, contudo, limitados a estes (Vaishnavi, 2004/17).

#### 4.1.1 Investigação

A investigação pode ser definida como uma atividade que contribui para a compreensão de um fenómeno que seja considerado interessante pelo investigador ou pela uma comunidade de investigação. Neste contexto, os métodos ou técnicas de investigação correspondem ao conjunto de atividades que o investigador considera apropriados para a produção de conhecimento (Vaishnavi, 2004/17).

Citando alguns autores, (Vaishnavi, 2004/17) refere no seu trabalho “Design Science Researching in Information Systems” o seguinte:

Para que uma contribuição em DSR seja valorizada e aceite pela comunidade de investigação através da publicação de artigos ou patentes, ela tem que ser interessante (Gregor and Hevner, 2013; Wilson, 2002).

#### 4.1.2 Projetar

Projetar significa “inventar e trazer à existência” (Vaishnavi, 2004/17). Assim projetar é criar um novo artefacto inexistente até então. Se o conhecimento necessário para criar tal artefacto já existe, então o projeto é rotineiro, caso contrário é inovador. O projeto inovador pode exigir a realização de investigação para preencher as lacunas de conhecimento e resultar em publicações ou patentes (Vaishnavi, 2004/17).

Para reforçar este tema, o autor (Vaishnavi, 2004/17), no seu trabalho, *Design Science Research in Information Systems* cita o autor Herbert A. Simon:

“Schools of architecture, business, education, law, and medicine, are all centrally concerned with the process of design” (Simon, 1996).

*“The professional schools will reassume their professional responsibilities just to the degree that they can discover a science of design [design science], a body of intellectually tough, analytic, partly formalizable, partly empirical teachable doctrine about the design process”* Simon (1996).

Referindo ainda que para colocar a atividade de projeto em foco a um nível intelectual o autor Herbert A. Simon faz uma clara distinção entre “ciência natural” e “ciência do artificial”:

*"A natural science is a body of knowledge about some class of things—objects or phenomenon—in the world (nature or society) that describes and explains how they behave and interact with each other. A science of the artificial (design science), on the other hand, is a body of knowledge about the design of artificial (man-made) objects and phenomena—artifacts—designed to meet certain desired goals."*

O autor acrescenta ainda que Simon enquadra o projeto de tais artefactos em termos de um ambiente interno, um ambiente externo e a interface entre os dois e que o comportamento do artefacto depende quer da sua organização interna quer do ambiente externo.

### 4.1.3 Diretrizes

De acordo com Hevner et al. (2004), a investigação DSR incorpora um conjunto de diretrizes que devem ser tidas em conta (Hevner, March, Park, & Ram, 2004).

*Tabela 4.1 Tabela Diretrizes em DSR (adaptação Hevner et al./Design Science in IS Research 2004 )*

<b>Diretrizes</b>	<b>Definição</b>
<b>1</b> Criação de um artefacto	O artefacto produzido pelo homem deve ser viável sob a forma de uma construção, um modelo, um método ou uma instanciação.
<b>2</b> Relevância do problema	Importância da aquisição de conhecimento que permita encontrar soluções para problemas ainda não resolvidos.
<b>3</b> Avaliação	A avaliação permite verificar com rigor se o artefacto cumpre o(s) objetivo(s) e também identificar áreas de melhoria
<b>4</b> Contribuição	A investigação deve resultar numa contribuição verificável, efetiva e clara.
<b>5</b> Rigor	Todo o processo de investigação e criação deve ser rigoroso de forma a garantir confiabilidade e consistência.
<b>6</b> Desenho como processo de procura	O artefacto é definido com base na investigação necessária do problema com vista à obtenção de uma solução.
<b>7</b> Comunicação da investigação	O investigador deve comunicar os resultados à comunidade interessada.

#### 4.1.4 Estrutura de investigação

(Hevner, 2004) apresenta também no seu documento “*Design Science in Information Systems Research*” a estrutura de investigação em sistemas de informação. Nesta destacam-se os ciclos de rigor e de relevância conforme Figura 4.1.

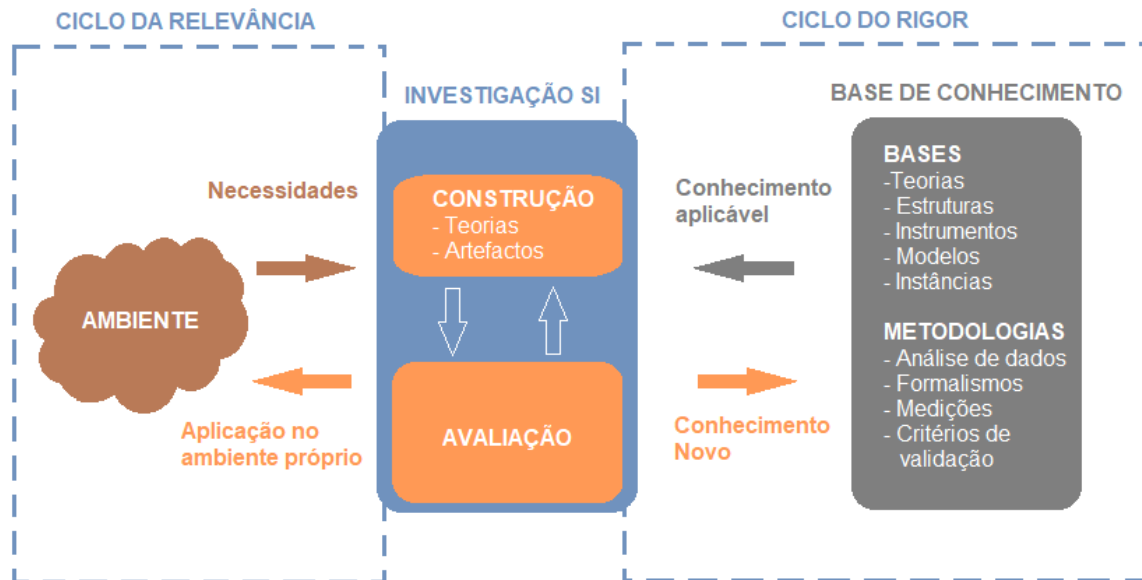


Figura 4.1 Estrutura de Investigação em SI Sistemas de Informação (adaptado (Hevner 2004))



## 5. Implementação do Sistema

---

Este capítulo constitui a fase de desenho e implementação do sistema. Neste, é apresentada a solução e respetivos requisitos, o seu desenho e implementação, testes preliminares e ainda as ferramentas utilizadas.

### 5.1 Apresentação da solução

Como referido no Capítulo 1, o propósito deste trabalho foi o de apresentar um projeto de baixo custo que possa contribuir para a deteção de objetos e seres vivos dentro de edifícios ou estruturas similares, recorrendo ao Wi-Fi.

Assim, numa altura em que se reconhece cada vez mais a importância da Internet das Coisas a fase de investigação envolveu naturalmente a tecnologia associada a este conceito.

Para o efeito, e como referido na introdução neste trabalho, a unidade emissora usada foi um (Ziemann, 2018) Raspberry Pi 3 como o da figura 5.1 que, além desta função, acumulou também as funções de servidor Web e servidor de base de dados.

O Raspberry Pi é um computador de pequenas dimensões e de baixo custo que pode ser usado não só para projetos IoT mas também para outro tipo de aplicações. Este dispositivo pode enviar e receber dados através das suas interfaces Ethernet (com cabo) e/ou Wi-Fi (sem fio) e pode trabalhar com sistemas operativos como o Raspbian, que é seu sistema operativo oficial, ou com sistemas operativos como o Windows 10 IoT ou com o Ubuntu entre outros.

Neste projeto o sistema operativo usado foi o Raspbian que forneceu suporte ao servidor HTTP (Hypertext Transfer Protocol) Apache, ao PHP (Hypertext Preprocessor), que é uma linguagem de código-fonte aberto amplamente usada em desenvolvimento Web e ainda ao motor de base de dados MariaDB, que é um substituto compatível com versões anteriores do MySQL Structured Query Language) e inclui os principais mecanismos de armazenamento de dados em código-fonte aberto.

Para a receção do sinal Wi-Fi emitido pelo Raspberry Pi foi construída a matriz da Figura 5.2 com pelo menos, 16 antenas direcionais equipadas com um microcontrolador (Kolban, 2016) ESP8266-01S. Cada antena, como a da Figura 5.3 mediu individualmente, o valor da força dos sinais RF (Rádio Frequência) emitidos pelo Raspberry Pi, depois destes serem modificados pelos obstáculos que se encontravam no caminho entre a unidade emissora (Raspberry Pi) e as unidades recetoras (Matriz de antenas) e registou os dados adquiridos na base de dados ativa no Raspberry Pi. Uma das antenas teve a função de antena de referência.

Cada antena direcional ou antena (Viezbicke, 1976) Yagi inclui um microcontrolador ESP8266-01S e foi construída como mostrado nas figuras 5.3 e 5.4 com fios de cobre de 1 mm. O comprimento de cada elemento da antena é apresentado na tabela 5.1. (Directional YAGI WLAN obtido de: <https://www.thingiverse.com/thing:19548>)

Tabela 5.1 Tabela Dimensões dos elementos das antenas direcionais

Posição	Comprimento
1 A	60 mm
2 B	53 mm
3 C	52 mm
4 D	51,5 mm
5 E	51 mm
6 F	50 mm

Os dados registados foram depois tratados com o objetivo de serem produzidas imagens que mostrassem a atenuação do sinal Wi-Fi provocada pelos obstáculos que, no caso, foram em primeiro lugar, uma parede real e um móvel de madeira com livros no seu interior e, em segundo lugar, a mesma parede e um objeto de madeira revestido a metal.

O número de antenas da matriz está relacionado com a resolução, uma vez que cada antena representa um *pixel* da imagem produzida. A matriz foi construída com 25 antenas, mas por limitações de *hardware*, como à frente se mostrará, apenas foram utilizadas 16 unidades.

Numa fase inicial o Raspberry Pi também teve ativo o protocolo DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) que é um protocolo de serviço TCP/IP (Transmission Control Protocol) que distribui automaticamente as configurações de rede aos dispositivos cliente. Nesta fase inicial, o ESP8266-01S de cada antena obtinha o endereço IP Internet Protocol) através do serviço DHCP ativo no Raspberry Pi, contudo, posteriormente optou-se pela atribuição de endereços IP fixos a cada ESP-8266-01S de modo a desativar o serviço de DHCP no Raspberry Pi por questões de desempenho do mesmo.



Figura 5.1 Raspberry Pi 3 versão B

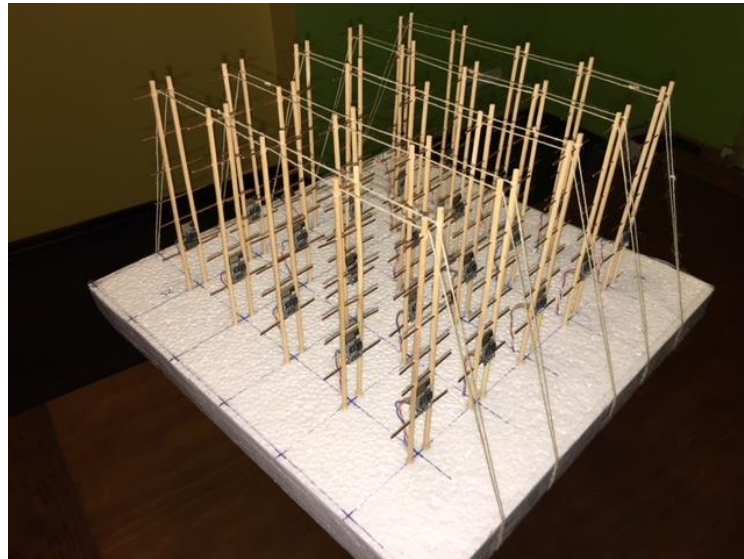


Figura 5.2 Matriz de antenas

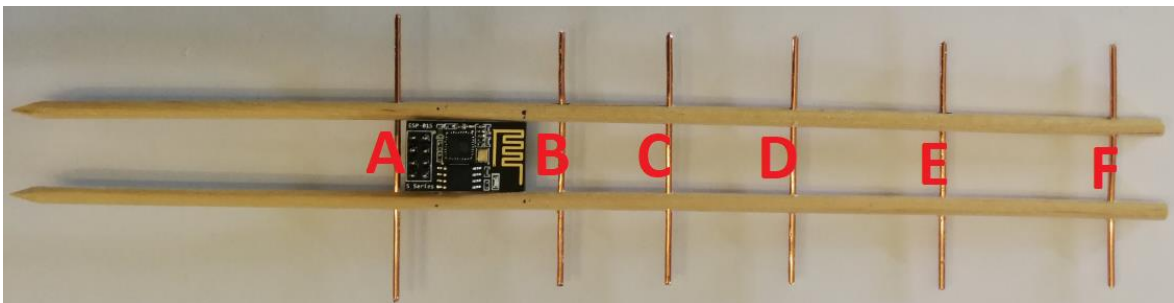


Figura 5.3 Antena direcional ou antena Yagi

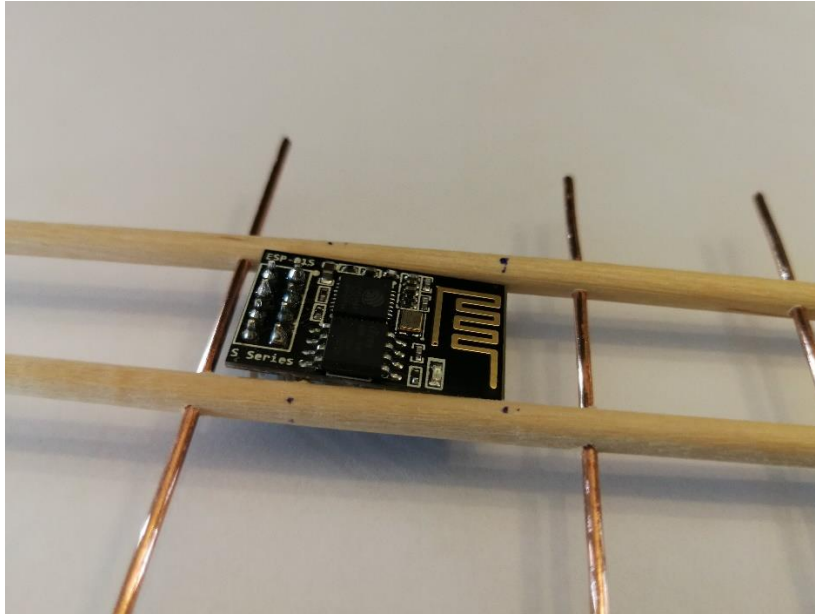


Figura 5.4 ESP8266-01S

O ESP8266-01S apresentado na figura 5.4 é um microcontrolador com tecnologia Wi-Fi de baixo custo. Este integra o processador RISC (Reduced Instruction Set Computer) Tensilica L106 de 32 bit que atinge um consumo de energia extremamente baixo e funciona a uma velocidade máxima de 160 MHz. O seu sistema operativo em tempo real (Real Time Operating System), RTOS e o seu sistema Wi-Fi permitem que cerca de 80% da capacidade de processamento esteja disponível para programação e desenvolvimento de aplicações.

O ESP8266EX está entre os chips Wi-Fi mais integrados do setor, integra os comutadores de antena, RF Balun, amplificador de potência, amplificador de receção de baixo ruído e foi projetado para ocupar uma área mínima de PCB (Printed Circuit Board). Os programadores podem controlar completamente o comportamento do ESP-01S, incluindo a energia Wi-Fi que, no caso deste projeto, foi definida com o valor 8 (*WiFi.setOutputPower* (8)) como se mostra na Secção 5.4.2 do Capítulo 5. Esta característica é muito importante para minimizar a interferência e saturação nas leituras dos valores RSSI entre as antenas.

A antena aplicada neste módulo é uma antena PCB de 3 dBi que se caracteriza por ser uma antena MIFA (Meandered planar Inverted-F Antenna). O desenho deste tipo de antena torna-a muito eficiente, quer seja em termos de espaço que seja em termos de desempenho de RF (Rádio Frequência) e, geralmente, não necessita de mais do que 15,2 x 5,7 mm de espaço para garantir uma relação VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) inferior a 2 em banda ISM (Industrial, Scientific and Medical) de 2,4 GHz.

A Antena MIFA é bastante funcional e opera num conceito bastante complexo chamado sistema de quarto de onda longa, ou seja, um quarto de 12,5 cm que é o comprimento de onda de um sinal de 2,4 GHz. É por esse motivo que as antenas da matriz da imagem 5.2 foram posicionadas de forma a garantir 7,5 cm entre si, minimizando a interferência entre elas.

Apesar das excelentes características da antena MIFA foram feitos testes para se perceber melhor a diferença de desempenho RF entre acoplar o microcontrolador ESP8266-01S a uma antena Yagi e usar este dispositivo de forma isolada. Estes testes revelaram uma diferença de cerca de 5 dB conforme se vê na tabela 5.2.

*Tabela 5.2 Tabela Diferença de ganho*

ESP8266-01S	Potência medida (dBm)
1 Montado na antena Yagi	-62
2 Isolado	-67

## 5.2 Requisitos

Nesta secção são apresentados os requisitos funcionais e não funcionais quer da unidade emissora (Raspberry Pi) quer das unidades recetoras (ESP8266-01S).

*Tabela 5.3 Tabela Requisitos funcionais da unidade emissora (Raspberry Pi)*

Requisito	Funcionalidade	Prioridade
1 Sistema Operativo	Carregamento do sistema operativo Raspbian para disponibilização de serviços.	Alta
2 Serviço http	Ativação de servidor http.	Média
3 Serviço MariaDB	Ativação de servidor de base de dados.	Alta
4 Serviço FTP (File Transfere Protocol)	Ativação de serviço FTP.	Média
5 Serviço AP (Access Point)	Ativação de serviço AP com capacidade para processar os pedidos de pelo menos 16 clientes.	Alta
6 Potência de emissão de Rádio Frequência RF	Ativação de potência de emissão Wi-Fi com um valor entre 6 e 17 pois se a potência de emissão estiver fora deste intervalo as antenas poderão não detetar suficiente variação RSSI (Received Signal Strength Indicator), conforme explicado na Secção 5.1.2.	Alta

Tabela 5.4 Tabela Requisitos funcionais da unidade recetora (ESP8266-01S)

<b>Requisito</b>	<b>Funcionalidade</b>	<b>Prioridade</b>
<b>1</b> Sistema Operativo	Carregamento do sistema operativo RTOS (Real-Time Operating System).	Alta
<b>2</b> Autenticação	O ESP8266-01S autentica-se no Raspberry Pi	Alta
<b>3</b> Leitura do valor RSSI	Leitura de 100 valores RSSI por segundo.	Alta
<b>4</b> Cálculo de valor RSSI Médio	O ESP8266-01S calcula o valor médio de cada conjunto de 100 leituras RSSI.	Alta
<b>5</b> Registo do valor RSSI Médio	O ESP8266-01S regista o valor RSSI médio na base de dados ativa no Raspberry Pi.	Alta

Tabela 5.5 Tabela Requisitos não funcionais da unidade emissora (Raspberry Pi)

Requisito	Funcionalidade
1 Sistema Operativo	O Raspberry Pi deve possuir a última versão estável do sistema operativo.
2 Interface gráfica de Utilizador	A interface gráfica de utilizador (Graphic User Interface, GUI) deve estar desativada para não consumir desnecessariamente recursos.
3 Apache	O <i>software</i> Apache deve estar atualizado com a versão estável mais recente.
4 PHP	O <i>software</i> PHP (Hypertext Preprocessor) deve estar atualizado com a versão estável mais recente.
5 MariaDB	O <i>software</i> MariaDB deve estar atualizado com a versão estável mais recente.
6 Desativação de serviços desnecessários	Os serviços desnecessários devem ser desativados para que os recursos do Raspberry Pi fiquem disponíveis para as principais funções obrigatórias.
7 Armazenamento	Deve-se libertar o máximo de espaço de armazenamento no cartão SSD (Solid State Drive) do Raspberry Pi.
8 Autenticação	O Raspberry Pi deve estar otimizado para autenticar de forma rápida todos os dispositivos cliente (ESP8266-01S).
9 Registo RSSI na base de dados	O Raspberry Pi deve estar otimizado para registar no menor tempo possível os valores RSSI recebidos dos dispositivos cliente (ESP8266-01S).

Tabela 5.6 Tabela Requisitos não funcionais da unidade recetora (ESP8266-01S)

Requisito	Funcionalidade
1 <i>Firmware</i>	O ESP8266-01S deve ter o seu <i>firmware</i> atualizado com versão estável mais recente.
2 Código	O código gravado no ESP8266-01S deve ser escrito de forma a garantir o melhor desempenho possível.
3 Alimentação elétrica	A alimentação elétrica do ESP8266-01S deve ser a adequada para garantir o seu funcionamento pleno.

## 5.3 Desenho do sistema

Nesta secção apresenta-se o projeto que, pelas suas características, constitui e materializa um artefacto novo que tira partido das vantagens da mais recente tecnologia IoT e do baixo custo que lhe está associado. Ao longo da secção e, à medida que a solução é apresentada e descrita, dá-se conta também da evolução que esta sofreu com vista à sua melhoria e otimização, indicando-se e caracterizando-se a tecnologia utilizada.

### 5.3.1 Arquitetura

A figura 5.5 representa a arquitetura geral do sistema proposto. Neste, a comunicação entre os diferentes dispositivos é realizada totalmente sem fios o que lhe confere boas características em termos de portabilidade e de adaptação ao meio a analisar.

Os elementos principais são, portanto, o Raspberry Pi e a matriz de antenas direcionais. O Raspberry Pi, depois de carregar o sistema operativo fica de imediato à espera que as unidades ESP8266-01S se autenticuem e registem, na base de dados criada para o efeito, os valores RSSI do sinal Wi-Fi emitido pelo Raspberry Pi. Este registo é feito quando no código do ESP8266-01S é feita a chamada a um ficheiro PHP que se encarrega da inserção dos dados na base de dados.

Desta forma, à medida que o Raspberry Pi assume novas posições do lado exterior da parede, cada antena, incluindo a antena de referência, mede 100 valores RSSI por segundo e, conforme referido acima, regista na base de dados ativa no Raspberry Pi a média de cada conjunto de 100 valores RSSI medidos.

Os valores registados na base de dados são então utilizados para produzir uma imagem que evidencia a atenuação produzida pelos obstáculos.

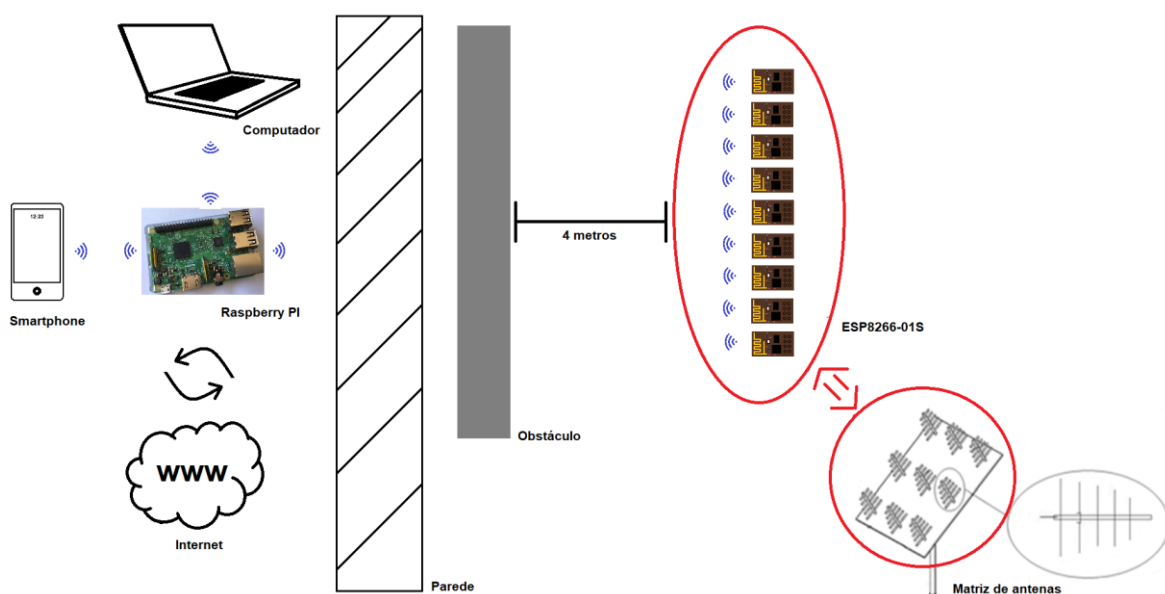


Figura 5.5 Arquitetura geral

### 5.3.2 Matriz RSSI

Nesta secção descreve-se o modelo matemático associado à medição dos valores RSSI pela matriz de antenas.

Assim, assumindo que antenas genéricas em espaço livre e separadas por uma distância  $d$  no campo distante uma da outra, a potência recebida será igual ao produto da densidade de potência da onda incidente e da área de abertura efetiva da antena recetora (R. Johnson, 1992).

$$P_r = PA_e \quad (1)$$

Considerando que  $G_t$  é o ganho da antena de transmissão em direção à antena de receção e que  $G_r$  é o ganho da antena de receção em direção à antena de transmissão. Com a fórmula de transmissão de Friis (H.T. Friis, 1946), a equação (1) pode ser reescrita na equação (2) onde  $P_t$  é a potência na unidade emissora,  $P_r$  é a potência na unidade recetora,  $d$  é a distância em metros e  $\lambda$  é o comprimento de onda (velocidade da luz/frequência).

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_t G_r P_t \quad (2)$$

O modelo de atenuação da propagação em espaço livre é um caso de transmissão ideal. Sabe-se que existe um vácuo infinito em torno da antena, além disso, a energia de transmissão do sinal está relacionada apenas com distância pelo que existe uma relação linear entre a energia de transmissão e a distância de transmissão (F. Shang, 2014). Este modelo não entra, portanto, em linha de conta com a influência de obstáculos e sinais sujeitos à reflexão.

Assim, os testes, ocorrem não no espaço livre, mas em situações reais com edifícios, nevoeiro, chuva, objetos e seres vivos, pelo que, é necessário considerar a sua interferência (múltiplas reflexões, sombra e absorção).

Desta forma, para levar em conta a atenuação provocada por objetos e paredes em situações reais, é necessário usar um expoente grande  $n > 2$  na equação (3) (F. Shang, 2014). A característica de atenuação em canais de longa distância respeita a distribuição log-normal, assim, o modelo de atenuação é o seguinte:

$$P_L(d) = P_L(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (3)$$

Nesta fórmula,  $P_L(d)$  indica a atenuação do sinal recebido quando a distância é  $d(m)$ , correspondendo ao valor da potência absoluta em dBm.  $P_L(d)$  indica a atenuação do sinal recebido quando a distância da referência é  $d_0$ . O valor  $n$  indica o índice de atenuação num ambiente específico, ou seja, indica a velocidade de atenuação que aumenta à medida que a distância também aumenta.  $X_\sigma$  é expresso em dB e é um fator de cobertura quando a faixa

de desvio padrão  $\sigma$  da sua distribuição é  $4 \sim 10$ , sendo o seu valor médio nulo.  $X_\sigma$  descreve os efeitos de obscuração aleatórios. Quanto maior for  $\sigma$  maior a incerteza do modelo (F. Shang, 2014).

A fórmula RSSI é a seguinte:

$$RSSI = P_t - P_L(d) \quad (4)$$

Nesta fórmula,  $P_t$  como referido anteriormente, é a potência no emissor enquanto que  $P_L(d)$  é a atenuação quando a distância é  $d$ .

A potência de sinal recebida no nó de referência à distância  $d_0$  é  $r_{i,j}$  como se mostra na fórmula seguinte:

$$r_{i,j} = P_t - P_L(d_{i,j}) \quad i = 1, \dots, M, \quad j = 1, \dots, N \quad (5)$$

A força de sinal recebida de uma matriz de antenas  $M \times N$  é  $r_{i,j}$  e  $d_{i,j}(m)$  é a distância real entre a unidade emissora e cada unidade recetora ( $i, j$ ). O valor  $i$  representa a linha e o valor  $j$  representa a coluna que identifiquem a localização do recetor ( $i, j$ ) dentro da matriz de antenas.

A atenuação medida à distância  $d_{i,j}$  é como se segue:

$$P(d_{i,j}) = P(d_0) - 10n \log\left(\frac{d_{i,j}}{d_0}\right) - X_\sigma \quad (6)$$

Nesta fórmula  $P(d_{i,j})$  indica a força de sinal recebida quando a distância real é  $d_{i,j}$ . O valor  $P(d_0)$  indica a força de sinal recebida quando a distância da referência é  $d_0$  e  $X_\sigma \sim N(0, \sigma^2)$  corresponde à (Crow, 1988) distribuição normal.

Na fórmula seguinte o valor  $A$  é a matriz de valores RSSI de recetores  $M \times N$  da matriz de antenas da figura 5.2 composta por  $M$  linhas e  $N$  colunas.

$$A = [\bar{r}_{i,j} - c], \quad i = 1, \dots, M, \quad j = 1, \dots, N \quad (7)$$

Nesta fórmula  $\bar{r}_{i,j}$  é o valor médio de 100 leituras RSSI (num segundo) e  $c$  é o valor médio de 100 leituras RSSI da antena de referência que pode ser, por exemplo,  $\bar{r}_{N+1, M+1}$ .

Na fórmula seguinte  $R$  é a matriz  $M \times N \times Q \times P$  de valores RSSI da matriz  $A$  utilizada para compor uma imagem de  $M \times Q$  linhas e  $N \times P$  colunas de pixéis.

$$R = [A_{r,s}], \quad r = 1, \dots, Q, \quad s = 1, \dots, P \quad (8)$$

com

$$A_{r,s} = \bar{r}_{i,j} - c, \quad r = 1, \dots, Q, \quad s = 1, \dots, P \quad (9)$$

A figura 5.6 representa a numeração das antenas na matriz.

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25

Figura 5.6 Representação da matriz de 25 antenas

## 5.4 Implementação

Nesta secção é apresentada a implementação realizada na unidade emissora e nas unidades recetoras. Como referido na Secção 5.3.1, o Raspberry Pi constituiu a unidade emissora e a matriz de, pelo menos, 16 antenas constituiu a unidade recetora.

### 5.4.1 Implementação no Raspberry Pi (Emissor)

A escolha do Raspberry Pi para unidade emissora deveu-se ao facto de este concentrar em si um conjunto de características importantes para a concretização do projeto. A sua reduzida dimensão, aliada às capacidades de processamento e armazenamento foram determinantes para a sua seleção, uma vez que se pretendia um dispositivo com boa capacidade de processamento e que pudesse comunicar sem fios.

A capacidade de processamento deste dispositivo é particularmente importante para garantir não só a autenticação do máximo de dispositivos cliente mas também o rápido processamento dos dados transmitidos por estes.

Desta forma, com um Raspberry Pi 3 do modelo 3, equipado com um processador Broadcom BCM2837 de 64 Bit, 1 Gb de memória RAM e uma interface sem fios, foi possível autenticar em simultâneo 16 dispositivos ESP8266-01S (um em cada antena da Matriz de antenas) e processar os dados por estes enviados, registando-os na base de dados criada para o efeito.

Nesta fase importa ressaltar que a matriz de antenas foi construída com 25 elementos, cada um com um ESP8266-01S, contudo verificou-se que o Raspberry Pi só conseguia autenticar e processar com sucesso os dados de 16 antenas.

Antes de se definir para a unidade emissora o Raspberry Pi, estudou-se a possibilidade de usar um ESP8266-01S para realizar as funções do Raspberry Pi, contudo, tal não foi possível porque este último, quando configurado no modo AP (Access Point) apenas permite ligação de 4 dispositivos cliente.

A preparação do Raspberry Pi consistiu nos seguintes passos:

- Instalação de cartão SD (Secure Digital) de alto desempenho;
- Instalação de Sistema Operativo Raspbian;
- Configuração da interface de rede sem fios;
- Instalação do Servidor Web Apache;
- Instalação do *software* PHP (Hypertext Preprocessor);
- Instalação do motor de base de dados MariaDB;
- Criação de base de dados e respetivo utilizador;
- Instalação de FTP (File Transfer Protocol);
- Configuração AP (Access Point);
- Configuração para acesso remoto ao motor de base de dados MariaDB;
- Otimização do PHP;

### **Instalação do Sistema Operativo Raspbian e *Software* complementar**

O sistema operativo Raspbian é o sistema operativo oficial da marca Raspberry Pi, beneficiando, portanto, do suporte desta. Para utilizadores mais experientes, que pretendam instalar uma imagem em particular, a descarga da imagem do sistema operativo Raspbian pode ser efetuada a partir do sítio oficial da marca no endereço <https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/>. Em alternativa, para utilizadores menos experientes, a instalação pode ser realizada através do sistema NOOBS (New out Of Box Software) no endereço <https://www.raspberrypi.org/documentation/installation/noobs.md>.

No caso deste trabalho optou-se pela escolha da imagem específica de 13 de Março de 2018. Para se instalar a imagem do sistema operativo foi necessária a utilização de um computador com leitor de cartões SD e com o *software* Etcher instalado.

O *software* Etcher é uma ferramenta gráfica que funciona nas plataformas Mac OS, Linux e Windows e suporta a escrita de imagens diretamente a partir de ficheiros comprimidos no formato zip sem necessidade de descompressão.

O *download* desta ferramenta foi realizado a partir do sítio <https://etcher.io/> e o processo consistiu no seguinte:

- *Download* da ferramenta;
- Ligação de um cartão SD ao computador;
- Seleção da imagem;
- Cópia da imagem para o cartão de destino.

Depois de concluída a cópia e de se colocar este novo cartão no Raspberry Pi o sistema fica acessível através do utilizador “pi” e da senha “raspberrypi” sendo necessária a sua alteração por questões de segurança.

De seguida foram desabilitados os recursos gráficos GUI (Graphical User Interface) do sistema operativo Raspbian por forma a garantir o máximo de recursos do Raspberry Pi para os objetivos do presente trabalho. Assim sendo, toda a configuração foi realizada em modo de texto de acordo com a lista da tabela 5.7:

*Tabela 5.7 Tabela Lista sequencial dos principais comandos para configuração do Raspberry Pi*

<b>Descrição</b>	<b>Comando</b>
<b>1</b> Instalação do servidor http Apache	<i>sudo apt-get install apache2 -y</i>
<b>2</b> Instalação do PHP	<i>sudo apt-get install php libapache2-mod-php -y</i>
<b>3</b> Instalação de motor de base de dados MariaDB	<i>sudo apt install mysql-server php-mysql</i>
<b>4</b> Acesso ao motor de base de dados	<i>sudo mysql -p -u root</i>
<b>5</b> Criar base de dados	<i>Create database rssi_db;</i>
<b>6</b> Criar utilizador de base de dados	<i>Create user 'dissertation_user'@'localhost' identified by 'MeiCM1617';</i>
<b>7</b> Atribuir permissões ao utilizador da base de dados	<i>Grant all privileges on rssi_db.* to 'dissertation_user'@'hostname' identified by 'MeiCM1617';</i>
<b>8</b> Refrescamento dos privilégios	<i>Flush privileges;</i>
<b>9</b> Usar base de dados criada	<i>Use rssi_db;</i>
<b>10</b> Criar tabela para registo dos dados de uma unidade recetora ESP8266-01S	<i>Create table antena01 (rssi_id INT NOT NULL AUTO_INCREMENT PRIMARY KEY,rssi VARCHAR(5),timeStamp TIMESTAMP NOT NULL DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP);</i>
<b>11</b> Instalação do servidor FTP	<i>sudo apt-get install pure-ftpd</i>
<b>12</b> Criação de grupo FTP	<i>sudo groupadd ftpgroup</i>
<b>13</b> Criação de utilizador FTP	<i>sudo useradd ftpuser -g ftpgroup -s /sbin/nologin -d /dev/null</i>
<b>14</b> Criação de pasta FTP	<i>sudo mkdir /home/pi/FTP</i>

15	Configuração de versão otimizada de servidor FTP	<pre>sudo pure-pw useradd upload -u ftpuser -g ftpgroup -d /home/pi/FTP -m pure-pw mkdb ln -s /etc/pure-ftpd/conf/PureDB /etc/pure- ftpd/auth/60puredb service pure-ftpd restart</pre>
----	--	--

O Raspberry Pi pode ser usado para criar uma rede sem fios independente. Para isso basta que seja configurado como ponto de acesso utilizando a interface de rede sem fios que foi integrada no modelo usado.

O processo da preparação do Raspberry pi para que este pudesse atuar como ponto de acesso, iniciou-se com a atualização do seu Sistema operativo Raspbian. A tabela 5.8 mostra a sequência principal dos comandos executados.

Tabela 5.8 Tabela Lista sequencial dos principais comandos para configuração AP no Raspberry Pi

	Descrição	Comando
1	Atualização do sistema operativo Raspbian	<pre>sudo apt-get update sudo apt-get upgrade</pre>
2	Instalação do <i>software</i> necessário para configuração do ponto de acesso	<pre>sudo apt-get install dnsmasq hostapd</pre>
3	Desativação temporária do <i>software</i> instalado no ponto anterior	<pre>sudo systemctl stop dnsmasq sudo systemctl stop hostapd</pre>
4	Edição do ficheiro <i>dhcpcd.conf</i> definição de IP estático	<pre>sudo nano /etc/dhcpcd.conf</pre>
5	Definição de IP estático	<pre>interface wlan0 static ip_address=192.168.4.1/24 nohook wpa_supplicant</pre>
6	Reinicialização do serviço <i>dhcpcd</i>	<pre>Sudo service dhcpcd restart</pre>
7	Edição do ficheiro <i>dnsmasq.conf</i> para configuração do serviço DHCP	<pre>sudo mv /etc/dnsmasq.conf /etc/dnsmasq.conf.orig sudo nano /etc/dnsmasq.conf</pre>

8	Configuração de serviço DHCP	<i>interface=wlan0 dhcp- range=192.168.4.2,192.168.4.30,255.255.255.0,24h</i>
9	Edição de ficheiro hostapd.conf para configuração de ponto de acesso	<i>sudo nano /etc/hostapd/hostapd.conf</i>
10	Configuração de ponto de acesso	<i>interface=wlan0 driver=nl80211 ssid=UAV-AP hw_mode=g channel=7 wmm_enabled=0 macaddr_acl=0 auth_algs=1 ignore_broadcast_ssid=0 wpa=2 wpa_passphrase=Mvc21xT# wpa_key_mgmt=WPA-PSK wpa_pairwise=TKIP rsn_pairwise=CCMP</i>
11	Indicação da localização da configuração	<i>sudo nano /etc/default/hostapd DAEMON_CONF="/etc/hostapd/hostapd.conf"</i>
12	Arranque do serviço	<i>sudo systemctl start hostapd sudo systemctl start dnsmasq</i>

Em seguida para permitir o acesso remoto ao motor de base de dados MariaDB foram realizadas as ações da tabela 5.9:

*Tabela 5.9 Tabela Lista dos principais comandos para permissão de acesso remoto à base de dados*

	<b>Descrição</b>	<b>Comando</b>
1	Edição do ficheiro 50-server.cnf	<i>sudo nano /etc/mysql/mariadb.conf.d/50-server.cnf</i>
2	Desativação de comando skip-external-locking	<i>#skip-external-locking</i>
3	Vinculação de endereço da rede	<i>Bind-address = &lt;192.168.4.2&gt;</i>

4	Inserção do identificador da rede na tabela mysql.user	<i>insert into mysql.user (host,user) values ('192.168.4.%','root');</i>
5	Atribuição de permissões ao utilizador root para o acesso remoto à base de dados	<i>GRANT ALL PRIVILEGES ON rssi_db.* To 'root'@'192.168.4.%' IDENTIFIED BY 'MeiCM1617';</i>

No final foi realizada algum nível de otimização do PHP. Na tabela 5.10 apresentam-se as alterações realizadas.

*Tabela 5.10 Tabela Lista de ações de otimização do PHP*

	<b>Descrição</b>	<b>Comando</b>
1	Alteração da variável max_input_vars	<i>Max_input_vars = 2500</i>
2	Alteração do limite de memória	<i>Memory-limit = 128M</i>
3	Alteração do tamanho máximo dos ficheiros para a ação de Envio	<i>Upload_max_filesize = 20M</i>
4	Alteração de número máximo de envio de ficheiros	<i>Max_file_uploads = 40</i>

Como descrito na Secção 5.3.1, o Raspberry Pi, depois de carregar o sistema operativo fica de imediato à espera que as unidades ESP8266-01S se autenticarem e registem, na base de dados criada para o efeito, os valores RSSI do sinal Wi-Fi emitido pelo Raspberry Pi. Foi também referido que este registo é feito quando no código do ESP8266-01S é feita a chamada a um ficheiro PHP que se encarrega da inserção dos dados na base de dados.

Apresenta-se agora, na Figura 5.7 o código PHP que realiza a inserção das leituras RSSI de cada ESP8266-01S na base de dados ativa no Raspberry Pi. De igual forma, na figura 5.8 mostra-se um excerto do código PHP que permite monitorizar a atividade instantânea de cada antena da Matriz e na figura 5.9 o resultado do código.

Nos testes que mais à frente se mostram na Secção 5.4.5, considerou-se a antena número 13 da matriz (ver figura 5.6 da Secção 5.3.2) a antena de referência. Assim, a figura 5.10 mostra, a título de exemplo, a diferença de valor entre a antena de referência e a restantes antenas.

Esta diferença de valores foi calculada pelo *trigger* da figura 5.11 implementado na base de dados.

Adicionalmente, como a medição da potência do sinal de redes sem fios se caracteriza por permanentes oscilações, o *trigger* da figura 5.11 realiza também, em simultâneo, a calibração do sistema em tempo real, com base nos valores instantâneos de cada antena e na diferença destes com o valor da antena de referência. O resultado da calibração instantânea é o da figura 5.12.

```
<?php
$dbusername = "root";
$dbpassword = "MeiCM1617";
$server = "localhost";

$dbconnect = mysqli_connect($server, $dbusername, $dbpassword);
$dbselect = mysqli_select_db($dbconnect,"rssi_db");

if(isset($_POST['rssi'])) {
    $rssi=$_POST['rssi'];

    $sql = "INSERT INTO antena01 (rssi)VALUES ('$rssi')";

    mysqli_query($dbconnect, $sql);
}
?>
```

Figura 5.7 Código PHP para inserir leitura RSSI da antena 01

```
<?php
$url=$_SERVER['REQUEST_URI'];
header("Refresh: 1; URL=$url"); // refrescar de 1 em 1 segundos
?>
<html>
<head>
    <title>PHOTOGRAPH AND SCAN THROUGH WALLS USING WI-FI</title>
</head>
<body>
<h1 align="center">Valores instantâneos</h1>

<table border="1" cellspacing="0" cellpadding="4" align="center">
    <tr>
        <td>
            <?php
            $con=mysqli_connect("localhost","root","MeiCM1617","rssi_db");
            $result = mysqli_query($con,'SELECT rssi FROM antena01 ORDER BY rssi_id DESC LIMIT 1');
            while($row = mysqli_fetch_array($result))
            {
                echo $row['rssi'];
            }
            mysqli_close($con);
            ?>
        </td>
        <td>
            <?php
            $con=mysqli_connect("localhost","root","MeiCM1617","rssi_db");
            $result = mysqli_query($con,'SELECT rssi FROM antena02 ORDER BY rssi_id DESC LIMIT 1');
            while($row = mysqli_fetch_array($result))
            {
                echo $row['rssi'];
            }
            mysqli_close($con);
            ?>
        </td>
    </tr>
</table>
```

Figura 5.8 Excerto de código PHP para mostrar valor RSSI instantâneo das antenas 01 e 02

The screenshot shows a web browser window with the URL `http://192.168.4.2/matriz.php`. The page title is "Valores instantâneos". The table contains the following data:

-68,0	-72,3	-66,0	-61,0
-67,0	-68,0	-67,0	-61,0
-70,7	-77,0	-72,0	-65,0
-70,0	-73,0	-68,0	-60,0

Figura 5.9 Controlo dos valores instantâneos medidos pelos microcontroladores nas Antenas Yagi

The screenshot shows a web browser window with the URL `http://192.168.4.2/matriz.php`. The page title is "Diferença instantânea c/ Refª". The table contains the following data:

4,0	-0,3	6,0	11,0
5,0	4,0	5,0	11,0
1,3	-5,0	0,0	7,0
2,0	-1,0	4,0	12,0

Figura 5.10 Diferença de valor entre a antena de referência e as restantes antenas

```

delimiter |

CREATE TRIGGER triggerDAntena01 AFTER INSERT ON antena01
FOR EACH ROW

BEGIN
    DECLARE rssi01 varchar(5);
    DECLARE rssi13 varchar(5);
    DECLARE rssi_tmp varchar(5);
    DECLARE rssi_cal varchar(5);

    SET rssi01 = (SELECT rssi FROM antena01 ORDER BY rssi_id DESC LIMIT 1);
    SET rssi13 = (SELECT rssi FROM antena13 ORDER BY rssi_id DESC LIMIT 1);

    SET rssi_tmp = rssi01-rssi13;

    INSERT INTO antenaC01 (rssi) VALUES (rssi_tmp);

    SET rssi_cal = rssi01-rssi_tmp;

    INSERT INTO antenaD01 (rssi) VALUES (rssi_cal);

END;
|
delimiter ;

```

Figura 5.11 Trigger para cálculo da diferença do valor RSSI entre a antena de referência e a antena 01 e respetiva calibração

The screenshot shows a web browser window with the address bar containing 'http://192.168.4.2/matrizd.php'. The page title is 'Valores instantâneos Calibrados'. The main content is a 4x4 table with all cells containing the value '-72,0'.

Valores instantâneos Calibrados			
-72,0	-72,0	-72,0	-72,0
-72,0	-72,0	-72,0	-72,0
-72,0	-72,0	-72,0	-72,0
-72,0	-72,0	-72,0	-72,0

Figura 5.12 Visualização de valores instantaneamente calibrados

### 5.4.2 Implementação no ESP8266-01S (recetor)

Como referido na Secção 5.1, a matriz de antenas da imagem 5.2 foi construída com 25 elementos sendo cada elemento igual ao da imagem 5.3. Cada antena foi equipada com um microcontrolador ESP8266-01 cuja função foi a de medir a força do sinal de rádio frequência emitido pelo Raspberry Pi. Como descrito na Secção 5.1 a antena MIFA integrada em cada ESP8266-01S opera num conceito bastante complexo chamado sistema de quarto de onda longa, ou seja, um quarto de 12,5 cm que é o comprimento de onda de um sinal de 2,4 GHz. As antenas da matriz da imagem 5.2 foram posicionadas de forma a garantir 7,5 cm entre si, minimizando a interferência entre elas.

Para programar o código no microcontrolador ESP8266-01S de cada antena foi usada a versão 1.8.5 do *software* Arduino como se vê na figura 5.13. Este é um IDE (Integrated Development Environment) desenhado e implementado em código livre que permite criar e enviar código para ser executado em microcontroladores. Este *software* pode ser usado em Windows, Mac OS e em Linux, existindo disponíveis, centenas ou até mesmo milhares de bibliotecas que podem ser utilizadas, em função dos diferentes tipos de microcontroladores disponíveis no mercado. Na Figura 5.14 são mostrados alguns destes microcontroladores. O *site* oficial deste IDE, além de fornecer tutoriais e informação técnica detalhada também permite o acesso aos fóruns da comunidade Arduino.



Figura 5.13 Software Arduino utilizado para programação dos ESP8266-01S

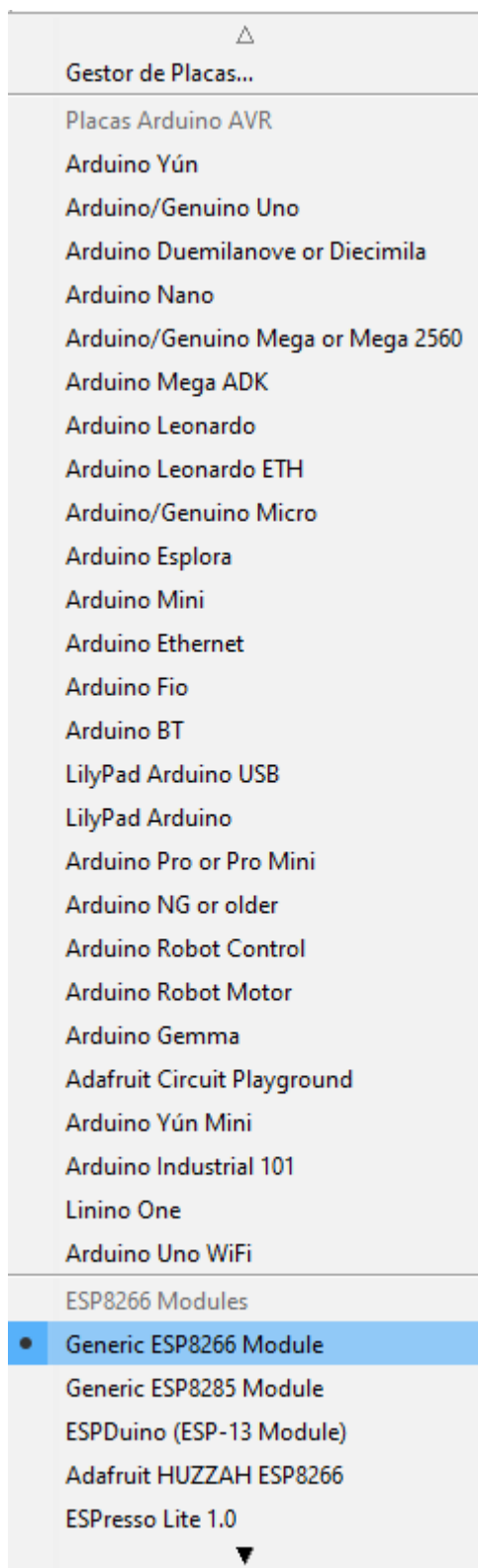


Figura 5.14 Lista de placas compatíveis com o software Arduino

No fluxograma da figura 5.15 mostra-se o processo que ocorre em cada ESP8266-01S para medir, calcular e registar na base de dados os valores RSSI depois destes serem modificados pelos obstáculos.

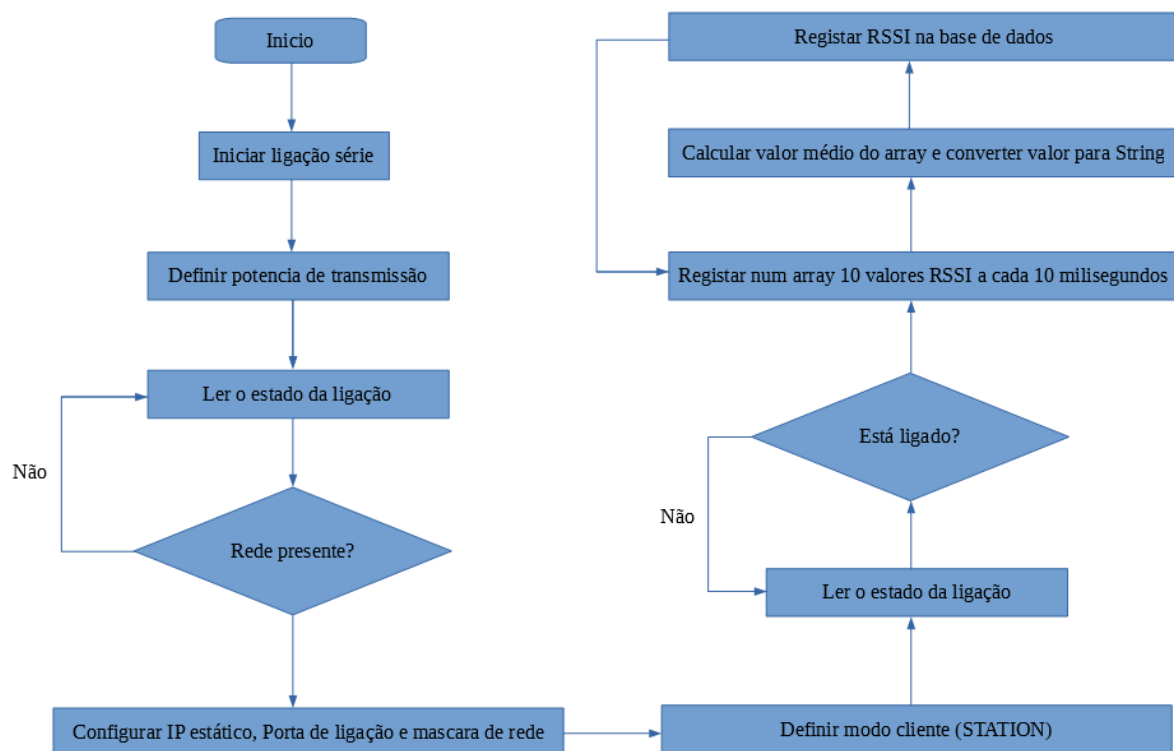


Figura 5.15 Funcionalidade do ESP8266-01S de cada Antena

O código correspondente ao fluxograma da figura 5.15 é apresentado nas figuras 5.16, 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20. Na figura 5.16 e 5.17 apresenta-se código que o ESP8266-01S processa na fase inicial em que são definidas as variáveis de autenticação e de configuração da interface de rede. Nesta fase, que é executada apenas uma vez, é feita a inicialização da interface série, a verificação do estado da rede e é estabelecida a ligação ao Raspberry Pi.

Contudo, antes da ligação ao Raspberry Pi ser estabelecida, a potência de saída da antena do ESP8266-01S é configurada para o valor 8 através da função `setOutputPower()` conforme se indica na figura 5.16. Os parâmetros desta função podem ser definidos entre o valor mínimo 0 dBm e o valor máximo 20,5 dBm (T. Mar, 2016).

Apesar das antenas da matriz terem sido dispostas a 7,5 cm umas das outras para minimizar a interferência entre si (ver Secção 5.1), optou-se por configurar a potência de saída da antena MIFA (Meandered planar Inverted-F Antenna) do ESP8266-01S de cada antena Yagi da matriz para o valor 8.

Esta configuração foi realizada porque se pretendeu, também com este controlo, contribuir para minimizar a interferência entre si das antenas. Desta forma, os testes efetuados revelaram que, para a distância definida na figura 5.5 (arquitetura do sistema) da Secção 5.3.1, este era o valor mínimo que garantia boa transmissão (para a base de dados no Raspberry Pi) dos valores RSSI lidos pelas unidades ESP8266-01S da matriz de antenas.

Depois, na figura 5.17 é feita a medição de 100 valores RSSI por segundo e calculado o seu valor médio.

O registo dos valores RSSI no servidor de base de dados remoto é realizado com a execução do código da figura 5.18.

Por fim, a medição dos valores RSSI é feita repetidamente até ao final das medições com o código da figura 5.19.

```
1 /*
2  * O ESP8266-01S instalado em cada antena Yagi autentica-se no Raspberry Pi
3  * De imediato mede, em 100 milisegundos, 10 valores RSSI da ligação, calcula a sua média e
4  * envia-a pelo método POST para a base de dados ativa.
5  */
6 #include <ESP8266WiFi.h>
7 #include <ESP8266WebServer.h>
8 /*
9  * Definição de SSID e senha para que o ESP8266-01 instalado em cada antena se ligue
10 * ao ponto de acesso (Raspberry Pi) .
11 */
12 const char* APssid = "UAV-AP";
13 const char* APpassword = "Mvc21xT#";
14
15 //IP do Servidor Web Local que regista o valor rssi na base de dados MariaDB.
16 const IPAddress webServer (192,168,4,2);
17
18 //dados para ligação com IP estático
19 const IPAddress ip (192,168,4,11);
20 const IPAddress gateway(192,168,4,2);
21 const IPAddress subnet(255,255,255,0);
22
23 int status = WL_IDLE_STATUS;
24
25 // Classe WiFiClient para criar ligações TCP
26 WiFiClient client;
27
28 int counter=0;
29
30 void setup() {
31   Serial.begin(115200);
32   delay(10);
33
34   WiFi.setOutputPower(8);
35
36   if (WiFi.status() == WL_NO_SHIELD) {
37     Serial.println("WiFi shield not present");
38     while(true); // don't continue
39   }
40
41   WiFi.config(ip, gateway, subnet);
42   WiFi.mode(WIFI_STA);
43   delay(500);
44   RaspberryConnection();
45 }
```

Figura 5.16 ESP8266-01S – Inicialização de variáveis

```

46
47  /*
48  * Função para que o ESP8266-01, no modo STA, se ligue ao Raspberry Pi
49  */
50 void RaspberryConnection(){
51   WiFi.begin(APssid, APpassword);
52   while (WiFi.status() != WL_CONNECTED){
53     if (counter > 20){
54       ESP.reset();
55     }
56     delay(500);
57     Serial.print(".");
58     counter++;
59   }
60   Serial.print("IP Address: ");
61   Serial.println(WiFi.localIP());
62 }
63

```

Figura 5.17 ESP8266-01S – Ligação ao Raspberry Pi

```

64 /*
65 * Função para enviar os valores RSSI para o servidor web utilizando o método POST
66 */
67 void rssiPost(){
68 /*
69 * FASE 1
70 * 1.1. Registo de 10 valores rssi num array: um registo a cada 10 milisegundos
71 * 1.2. Cálculo do valor médio rssi
72 * 1.3. Conversão de float para String
73 * Variáveis locais utilizadas:
74 *   ."preRssi" (float) para registo dos valores rssi
75 *   ."sum" (float) para registo do somatório dos valores rssi
76 *   ."rssi" (String) para registo do valor médio rssi
77 */
78
79 float preRssi[10];
80 float sum=0;
81 String mRssi;
82
83 //1.1. Registo de 10 valores rssi num array. Um registo a cada 10 milisegundos
84 for(int i=0; i<10; i++){
85   preRssi[i]=WiFi.RSSI();
86   //Serial.println(preRssi[i]);
87   delay(100);
88 }
89
90 //1.2. Cálculo do somatório de 10 valores rssi
91 for (int i=0; i<10; i++){
92   sum += preRssi[i];
93 }
94
95 //1.3 Cálculo da média e conversão em String com uma casa decimal
96 mRssi= String(sum/10,1);
97 //Serial.println(mRssi);
98 /*

```

Figura 5.18 ESP8266-01S – Medição de 100 valores RSSI por segundo e cálculo do seu valor médio

```

99  * FASE 2
100 * 2.1. Envio do valor rssi médio obtido na fase 1
101 */
102 String data;
103
104 //Construção da string de fluxo de dados
105 data = "rssi=" + mRssi;
106 if (client.connect(webServer,80)) {
107   client.println("POST /antena01.php HTTP/1.1");
108   client.println("Host: 192.168.4.2");
109   client.println("User-Agent: Arduino/1.8.5");
110   client.println("Connection: close");
111   client.println("Content-Type: application/x-www-form-urlencoded");
112   client.print("Content-Length: ");
113   client.println(data.length());
114   client.println();
115   client.print(data);
116   delay(20);
117   data="";
118   delay(20);
119 }
120 }
121

```

Figura 5.19 SP8266-01S – Registo no servidor de base de dados

```

121
122 void loop() {
123   if (WiFi.status() == WL_CONNECTED){
124     rssiPost();
125     delay(1000);
126   }
127   else{
128     RaspberryConnection();
129   }
130 }

```

Figura 5.20 ESP8266-01S – Ciclo de processamento

### 5.4.3 Testes Preliminares

Antes de se dar início à construção deste projeto e consequentemente ao desenho e construção da matriz de antenas direcionais, foram realizados testes preliminares com o objetivo de se estudar o comportamento do microcontrolador ESP8266-01S para os efeitos pretendidos. Assim, utilizando apenas dois microcontroladores, um no modo STA (Station) e outro no modo AP\_STA (comuta entre Access Point e Station) foram realizados os seguintes testes:

- O 1º ESP8266-01S, no modo STA, liga-se ao 2º ESP8266-01S enquanto este está no modo AP, mede o valor RSSI da ligação estabelecida e envia-lhe o valor RSSI, aguardando alguns segundos até repetir a operação.
- O 2º ESP8266-01S, no modo AP, recebe o valor RSSI do 1º ESP8266-01S no modo STA, muda em seguida o seu modo para STA e envia o valor RSSI para a plataforma online <https://thingspeak.com/>, após o que muda de imediato novamente para o modo AP-STA (subentenda-se modo AP) para receber novo valor RSSI do microcontrolador no modo STA.

Os testes preliminares foram realizados dentro de um edifício, primeiro sem e depois, com obstáculos entre os dois microcontroladores. Estes últimos encontravam-se separados por uma distância de 5 metros conforme figura 5.21.

A razão pela qual os testes foram realizados a esta distância, prende-se com o facto de no primeiro metro, a contar da unidade emissora (ESP8266-01S no modo AP-STA), ocorrer uma grande perda de potência de sinal, fazendo com que esta, seja uma zona muito instável. Contudo, à medida que a distância aumenta, a variação da potência em função da distância é menor conforme se vê na figura 5.22. Tal significa que a medição dos valores RSSI deve ser realizada entre as zonas de maior estabilidade a partir dos 3 metros.

As figuras 5.23 e 5.24 correspondem às vistas superior e lateral da unidade ESP8266-01S no modo STA, enquanto que a figura 5.25 corresponde à unidade ESP8266-01S no modo AP-STA.

Nos primeiros 5 minutos dos testes preliminares foi realizada, sem qualquer obstáculo, a medição do valor RSSI e o conseqüente registo na plataforma <https://thingspeak.com/>. Nos 5 minutos seguintes, a medição do valor RSSI e respetivo registo foi realizada com um tijolo de alvenaria como obstáculo como se mostra na figura 5.26. Por fim, nos últimos 5 minutos, utilizando o tijolo e uma pilha de livros como obstáculos (Figura 5.27), foi efetuada a medição do valor RSSI e o registo da plataforma *online*. A plataforma *thingspeak.com* permitiu, como se mostra na figura 5.28 visualizar em tempo real os valores enviados pelo ESP8266-01S no modo (AP\_STA).

Apesar dos testes preliminares terem sido realizados no interior de um edifício, num ambiente onde ocorre a reflexão das ondas RF (Rádio Frequência), foi possível, pela análise dos gráficos produzidos, perceber que os valores RSSI variaram em função dos obstáculos existentes entre os dois microcontroladores, ou seja, sem obstáculos, os valores RSSI médios foram de -45 dB, depois com o tijolo, talvez devido à reflexão provocada por este e pelo facto dos testes ocorrerem dentro de um edifício, os valores RSSI Médios foram de -43 dB e, por fim, quando se adicionou a pilha de livros ao tijolo já existente, os valores RSSI médios foram aproximadamente de -58 dB.



Figura 5.21 SP8266-01S – Testes Preliminares

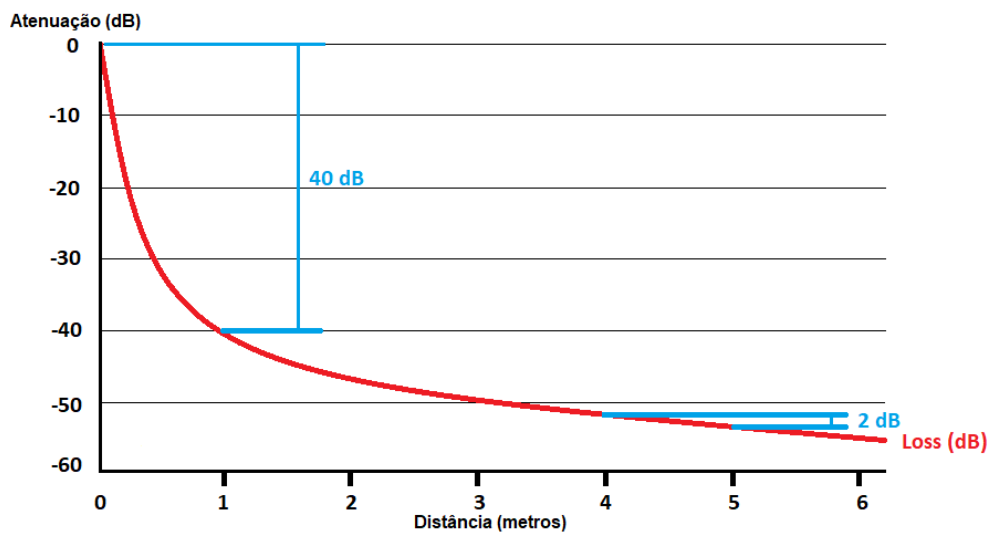


Figura 5.22 ESP8266-01S – Variação da atenuação em função da distância



Figura 5.23 SP8266-01S (modo STA) – Vista superior da unidade recetora nos testes preliminares

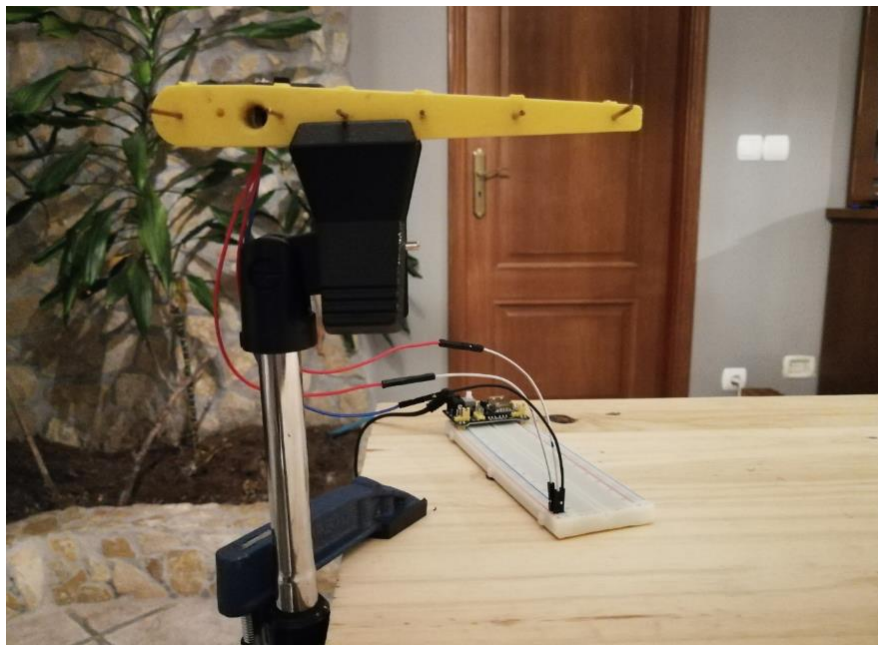


Figura 5.24 SP8266-01S (modo STA) – Vista lateral da unidade recetora nos testes preliminares



*Figura 5.25 SP8266-01S (modo AP\_STA) – Vista superior da unidade nos testes preliminares*



*Figura 5.26 Testes preliminares com obstáculo (tijolo)*



*Figura 5.27 Testes preliminares com obstáculo (tijolo + pilha de livros)*

## Força de Sinal RSSI

Channel ID: 391707  
 Author: carlosferreira  
 Access: Private

Private View Public View Channel Settings Sharing API Keys Data Import / Export

+ Add Visualizations Data Export

MATLAB Analysis MATLAB Visualization

### Channel Stats

Created: about 6 hours ago  
 Updated: 14 minutes ago  
 Last entry: 14 minutes ago  
 Entries: 75

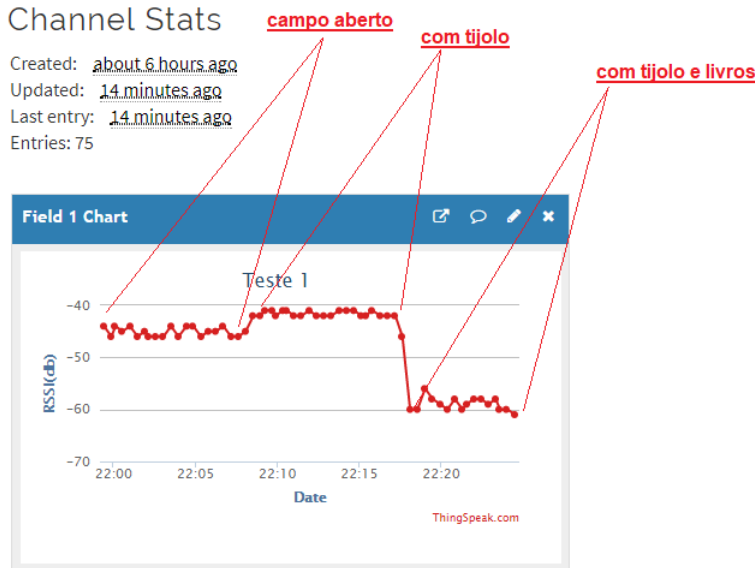


Figura 5.28 Resultado dos testes preliminares sem e com obstáculos

### 5.4.4 Potência ideal de emissão do Raspberry Pi

Os testes num ambiente real, com obstáculos entre a unidade emissora (Raspberry Pi) e as unidades recetoras (Matriz de antenas) foram precedidos de um teste para determinar qual deveria ser, no ambiente real das figuras 5.29 e 5.30, a potência de emissão ideal a aplicar no Raspberry Pi, enquanto emissor de RF. Assim, foram realizados testes que consistiram em decrementar de forma automática a potência de emissão de RF do Raspberry Pi do valor 31 até ao valor 0 (fatores de configuração da potência de emissão do Wi-Fi). Para isso o Raspberry Pi foi programado para executar o código da figura 5.31.

Realizado o teste de decremento da potência de emissão no Raspberry Pi foi possível concluir que esta deveria estar compreendida entre os valores 17 e 6. Isto significa que enquanto os valores da potência estiveram acima do valor 17 ou abaixo do valor 6, as antenas não detetaram variação RSSI suficiente conforme se mostra na figura 5.32.



Figura 5.29 Ambiente de testes real

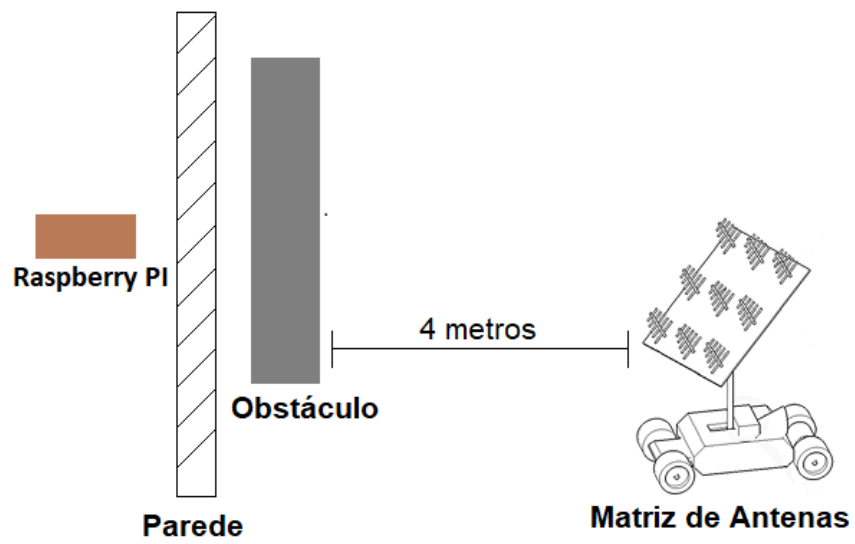


Figura 5.30 Esquema de ambiente real de testes

```
#!/bin/bash
for i in {30..0..-1}
do
    echo " "
    echo "txPower was changed to $i "
    echo " "
    echo "Actual txPower: "
    echo " "
    sudo iwconfig wlan0 txpower $i
    sudo iwconfig
    sleep 15
done
```

Figura 5.31 Código para decremento da potência RF no Raspberry Pi

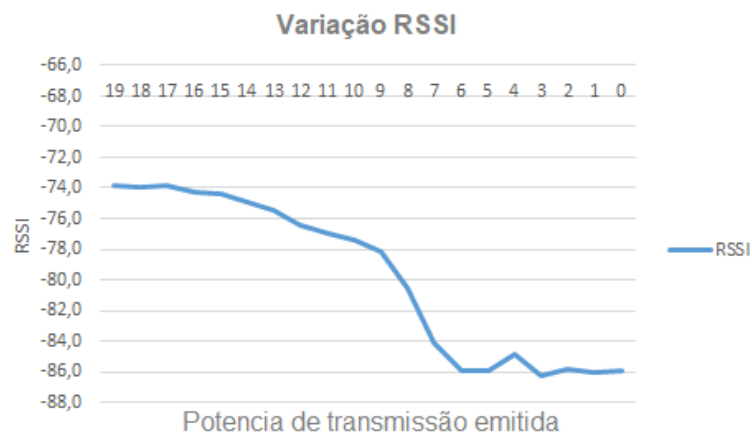


Figura 5.32 Variação RSSI



## 6. Testes e Avaliação

---

Neste capítulo apresentam-se os testes finais e a avaliação dos resultados.

### 6.1 Detecção de objetos

Depois da potência de emissão da interface de rede sem fios do Raspberry Pi ter sido definida para o valor 7, com o comando “*sudo iwconfig wlan0 txpower 7*” e, da potência de saída da antena MIFA (Meandered planar Inverted-F Antenna) de cada ESP8266-01S, ter sido ajustada para o valor 8 (como referido na Secção 5.4.2), foram realizados testes com obstáculos.

Nas figuras 5.33, 5.35 e 5.37 os números de 1 a 16 identificam as posições que o Raspberry Pi, enquanto emissor, percorreu no exterior do edifício. Ao mesmo tempo, o microcontrolador de cada antena Yagi mediu, conforme explicado na Secção 5.4.2, 100 valores RSSI por segundo tendo a média destes valores sido registados na base de dados ativa no Raspberry Pi.

O cenário de testes foi o da figura 5.30 no qual a distância entre os obstáculos e a matriz de antenas foi cerca de 4 metros. Como visto na Secção 5.4.3, à medida que a distância aumenta diminui a variação da potencia RF diminui, ou seja, as medições devem ser feitas a partir dos 3 metros porque no primeiro metro, a contar da unidade emissora, ocorre uma grande perda de potencia RF em função de distância, o que já não acontece à distância escolhida, tratando-se portanto, de uma zona mais estável para a realização das medições.

Assim na figura 6.1, vê-se o móvel de madeira com livros, o espaço livre à sua esquerda e as 16 posições que, no exterior, o Raspberry percorreu. O resultado deste varrimento é o da figura 6.2 na qual de vê que, no lado direito (lado do móvel), ocorreu uma maior atenuação dos sinais RF emitidos pelo Raspberry Pi no exterior.

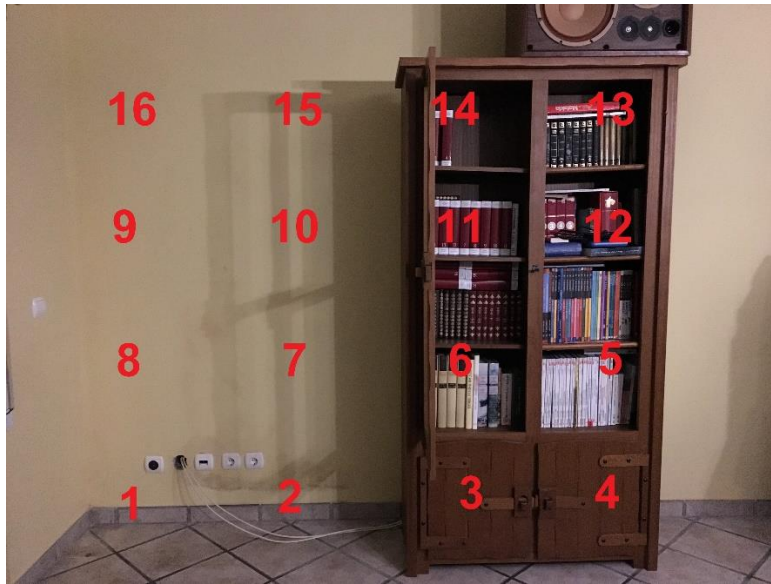


Figura 6.1 Móvel de Madeira com a parede livre à sua esquerda

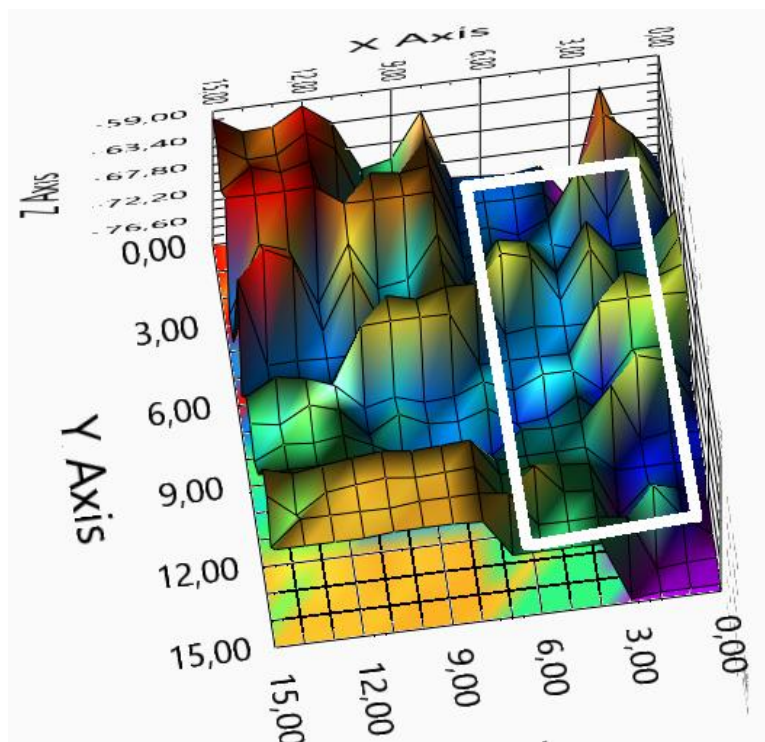


Figura 6.2 Atenuação provocada pelo Móvel de Madeira

O teste seguinte consistiu em mover o móvel para lado esquerdo libertando a parede à sua direita como se vê na figura 6.3. No resultado deste teste vê-se que a zona de maior atenuação se deslocou para o lado esquerdo correspondendo à nova posição do móvel de madeira.



Figura 6.3 Móvel de Madeira com a parede livre à sua direita

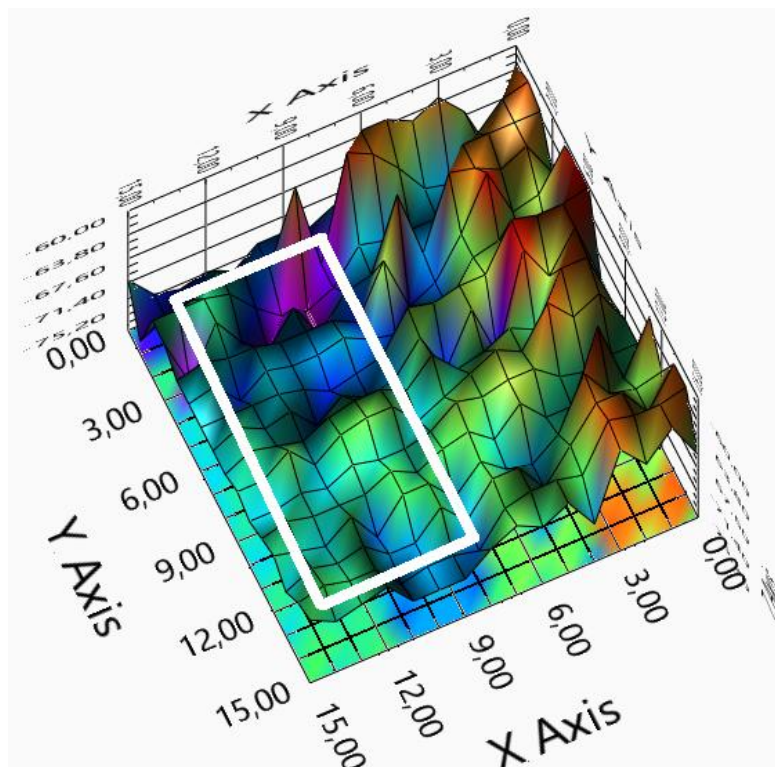


Figura 6.4 Atenuação provocada pelo móvel de Madeira na nova posição

Finalmente, no último teste foi utilizada uma estrutura composta por barras de madeira revestidas a metal. As dimensões das componentes verticais e horizontais da estrutura foram aproximadamente 1 x 0,1 x 0,1 metros.

Neste teste, a atenuação produzida apenas pela parede é a que se mostra na figura 6.6 enquanto que a atenuação produzida pela parede e pela estrutura referida é a que se vê na figura 6.7.

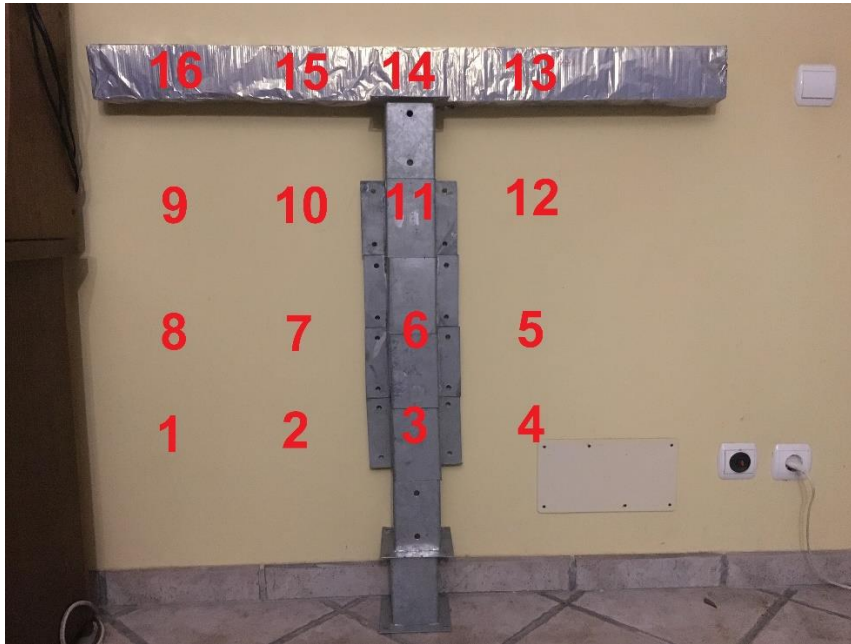


Figura 6.5 Objeto de madeira revestido a metal

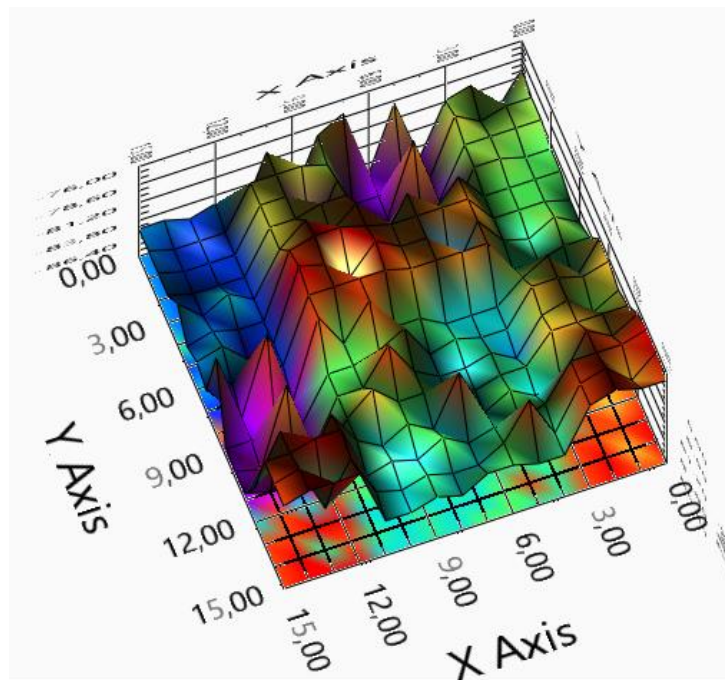


Figura 6.6 Atenuação apenas da parede

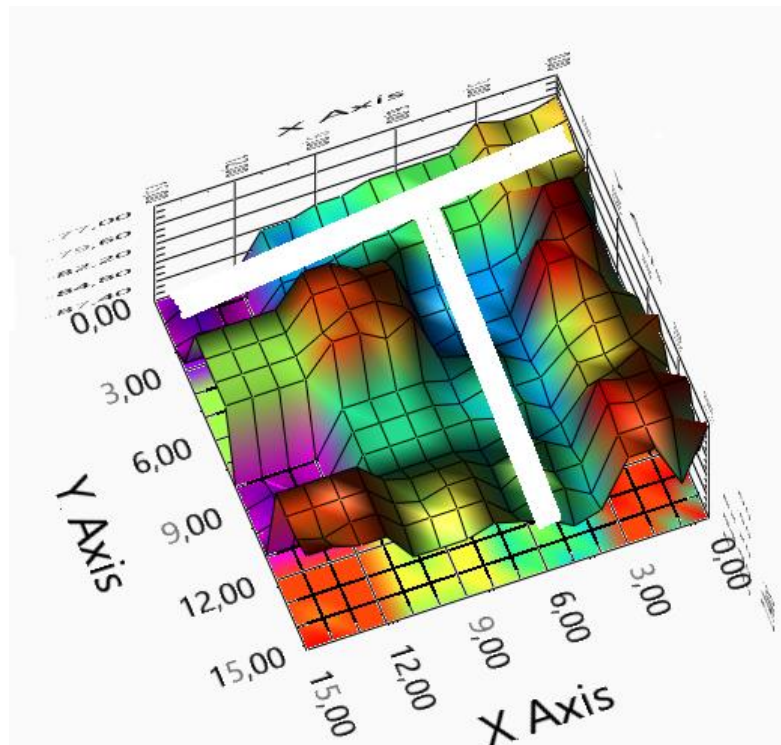


Figura 6.7 Atenuação do objeto de madeira revestido a metal

## 6.2 Avaliação

Os testes preliminares realizados com apenas duas unidades de microprocessador ESP8266-01S permitiram perceber a viabilidade da sua utilização na deteção de objetos, ou seja, a unidade ESP826601-S no modo AP-STA foi capaz de registar na plataforma IoT, disponível no endereço <https://thingspeak.com/> sinais RF que foram modificados pela presença de um tijolo e de uma pilha de livros.

Estes testes preliminares serviram de base para a construção de uma matriz de 25 antenas. Nesta matriz cada antena Yagi foi equipada com um microcontrolador IoT ESP8266-01S, cuja função foi a de detetar e registar (no Raspberry Pi) os sinais RF emitidos pela unidade emissora, sinais esses que, entretanto, foram modificados pela presença de objetos no caminho entre a unidade emissora e a unidade recetora.

Na fase de desenvolvimento da solução foram encontradas dificuldades associadas ao desconhecimento do comportamento da tecnologia IoT utilizada no âmbito deste trabalho.

No início do trabalho era objetivo que a unidade emissora fosse também um microcontrolador ESP8266-01S. Este teria como função, não só emissão dos sinais RF mas também o armazenamento dos dados ou, em alternativa, a sua retransmissão para uma plataforma ou unidade de armazenamento exterior que trataria os dados. Verificou-se, contudo, que o ESP8266-01S só permitia a autenticação de 4 dispositivos cliente em simultâneo. A sua capacidade de armazenamento é também naturalmente limitada.

Por outro lado, o armazenamento dos dados recolhidos numa plataforma *online* implicava a existência obrigatória de uma ligação à Internet para tornar possível a sua análise e a produção de resultados gráficos.

Como o objetivo era desenvolver um sistema autónomo, simples e barato optou-se por eleger para a unidade emissora um Raspberry Pi. As suas capacidades de processamento e armazenamento permitiram, conforme referido nos capítulos anteriores, que este dispositivo IoT pudesse ter, em simultâneo, as funções de emissor, de servidor de base de dados e servidor Web. Estes dois últimos para registo e visualização dos dados recebidos dos ESP8266-01S de cada antena Yagi da Matriz de 25 antenas.

A matriz de antenas originalmente foi construída com 25 antenas, contudo, para que fosse possível ao Raspberry Pi receber e registar sem perda de informação, os valores RSSI lidos pelos ESP8266-01S das antenas foi necessário desativar 9 antenas, passando a matriz de 25 para 16 antenas.

Apesar de todas as dificuldades encontradas foi possível levar a cabo os testes que permitiram registar a atenuação do sinal RF provocada pelo móvel de madeira com livros dentro e também pelo objeto de madeira revestido a metal conforme se mostra na Secção 6.1.



## 7. Conclusão e Trabalho Futuro

---

### 7.1 Conclusão

Refletindo o crescente interesse na tecnologia IoT, há atualmente, um crescente número de projetos neste campo do conhecimento. Esta tecnologia permite controlar, enviar e receber dados de dispositivos à distância que, de uma forma discreta, quase invisível, produzem benefícios que se estendem a todas as áreas da vida humana, desde a saúde e educação até à produção de bens e serviços. Assim, este trabalho é o resultado direto da motivação em obter resultados associados à área específica de TTW (Through The Wall) utilizando a tecnologia IoT.

Nesta abordagem foram usados dispositivos IoT de baixo custo nomeadamente, foram utilizados 16 microcontroladores ESP8266-01S acoplados em antenas direcionais, dispostas numa matriz de antenas Yagi com o objetivo de melhorar a resolução e a capacidade de deteção e transmissão de sinais RF e foi também utilizado um Raspberry Pi que acumulou as funcionalidades de emissor de sinais RF, de servidor Web para controlo do comportamento dos ESP8266-01S e ainda de servidor de base de dados para guardar o resultados dos testes.

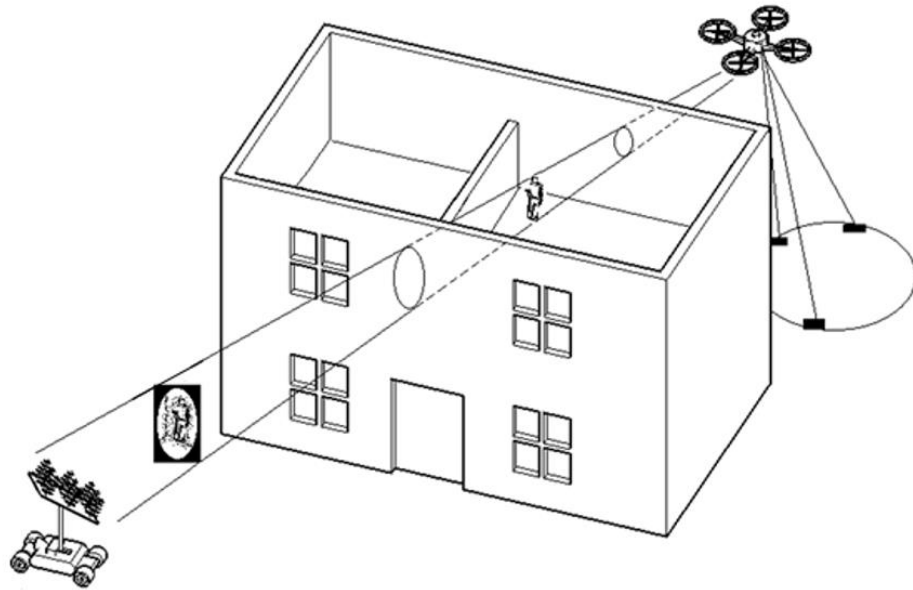
A tecnologia de baixo custo usada permitiu levar a cabo testes que podem contribuir para a deteção de objetos dentro de edifícios em diversos contextos, incluindo situações de segurança ou de catástrofe. O artefacto desenvolvido permitiu ainda perceber a viabilidade da utilização de tecnologia de baixo custo em projetos deste tipo.

### 7.2 Trabalho futuro

Como trabalho futuro propõe-se o aproveitamento da constante evolução da tecnologia IoT para melhorar o controlo do ganho dos dispositivos emissores e recetores e, eventualmente, substituir o Raspberry Pi por dispositivos de menores dimensões, com grande capacidade de processamento que permitam tratar os dados de um número crescente de dispositivos cliente.

É ainda proposto que a matriz de antenas possa ser acoplada a um veículo autónomo e que o Raspberry Pi ou um dispositivo de menores dimensões com, equivalente ou superior capacidade de processamento, possa ser acoplado a um veículo aéreo autónomo por forma a evoluir o sistema para um sistema como o da imagem 7.1

**Emissor (Veículo Aéreo Autônomo)**



**Recetor (Veículo terrestre autônomo)**

*Figura 7.1 Trabalho Futuro*



## 8. Bibliografia

---

Chen, V., C., (2011). The Micro-Doppler Effect in Radar, Artech House, pp. 2-3

CONANT, M., (1836). The Year Book: Astronomical and Philosophical Annual. Munroe&francis. pp. 64-66

Prasad, R, (2004), OFDM for Wireless Communications Systems, Universal Personal Communications, pp. 11-16.

Rappaport, T., (2001). Wireless Communications: Principles and Praticce 2nd. Prentice Hall PTR Upper Saddle River, NJ, USA ©2001.

Crow, E., L., Shimizu, K., (1988). LogNormal Distributions Theory and Application. Taylor&Francis Group. V88.

National Instruments (2018). What is I/Q Data?, Obtido de: <http://www.ni.com/tutorial/4805/en/#reviews>

Burchett, M.H., Utsi, P. A. V., Oswald, G.K.A., Carter, E. C., Jonathan Peter Edgcombe, J. P., Kemp, G., Carter, R. J., (2008). (WO2008001092) RADAR FOR THROUGH WALL DETECTION, obtido de: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2008001092&recNum=50&docAn=DE2014100299&queryString=&maxRec=2801215>.

Cho, H.-S., Park, Y.-J., (2018). Detection of Heart Rate through a Wall Using UWB Impulse Radar, Journal of Healthcare Engineering. Obtido de: <https://www.hindawi.com/journals/jhe/2018/4832605/>.

Holl, P. M., Reinhard, F., (2017). Holography of Wi-fi Radiation, Physical Review Letters, PRL 118, 183901. Obtido de: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.118.183901>.

Chetty, K., Smith, G. E., Woodbridge, K., (2012). Through-the-Wall Sensing of Personnel Using Passive Bistatic WiFi Radar at Standoff Distances, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 50, n. 4, pp. 1218–1226.

Karanam, C. R., Mostofi, Y. (2017), 3D Through-Wall Imaging with Unmanned Aerial Vehicles Using WiFi, em 2017 16th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), 2017, pp. 131–142.

Adib, F., Katabi, D. (2013). See Through Walls with Wi-Fi. Obtido de: <https://dspace.mit.edu/openaccess-disseminate/1721.1/87086>.

Vaishnavi, V., Kuechler, W., and Petter, S. (Eds.) (2004/17). Design Science Research in Information Systems, January 20, 2004 (created in 2004 and updated until 2015 by Vaishnavi, V. and Kuechler, W.); last updated (by Vaishnavi, V. and Petter, S.), December 20, 2017. Obtido de: <http://www.desrist.org/design-research-in-information-systems/>.

Orlikowski, W. J. and Iacono, C. S. (2001). Research Commentary: Desperately Seeking the IT in IT Research—A Call to Theorizing the IT Artifact. Information Systems Research 12(2): 121-134.

Gregor, S. and Hevner, A. (2013). Positioning and Presenting Design Science Research for Maximum Impact. MIS Quarterly 37(2): 337-355.

Wilson, J.R. (2002). Responsible Authorship and Peer Review. Science and Engineering Ethics 8(2): 155–174.

Simon, H. (1996). *The Sciences of the Artificial*, Third Edition. Cambridge, MA: MIT Press.

Hevner, A., March, S., Park, J., & Ram, S. (2004). Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, 26(1), 75-105.

Tsichritzis, D. (1997). The dynamics of innovation. In *Beyond calculation*. Springer, pp. 259-265.

Venable, J. R. Design Science Research Post Hevner et al. (2010). Criteria, standards, guidelines, and expectations. In *International Conference on Design Science Research in Information Systems*, Springer, pp. 109-123.

Through-wall radar PRISM200 - Obtido de:  
<https://www.cambridgeconsultants.com/expertise/signal-processing>.

Kolios, P., Wireless Environment and Mobility Issues, Dept. of Computer Science, University of Cyprus.

Jiuqiang, X., Liu, W., Lang, F., Zhang, Y., Wang, C., (2010). Distance measurement model based on RSSI in WSN, Obtido de:  
[https://www.researchgate.net/publication/220279158\\_Distance\\_measurement\\_model\\_based\\_on\\_RSSI\\_in\\_WSN](https://www.researchgate.net/publication/220279158_Distance_measurement_model_based_on_RSSI_in_WSN).

Shang, F., Su, W., Wang, Q., Gao, H., Fu, Q., (2014). A Location Estimation Algorithm Based on RSSI Vector Similarity Degree, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2014, pp. 1–22.

Johnson, R., (1992). Antenna Engineering Handbook (3rd ed.), New York, NY: McGraw-Hill, Inc. p. 1-12. ISBN 0-07-032381-X.

Friis, H.T., (1946). A Note on a Simple Transmission Formula, IRE Proc.: 254–256.

Mar, T. (2016). ESP8266\_RTOS\_SDK, Generated by Doxygen 1.8.10, p. 180, Mar. Obtido de: [https://www.espressif.com/sites/default/files/20b-esp8266\\_rtos\\_sdk\\_api\\_reference\\_v1.4.0\\_0.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/20b-esp8266_rtos_sdk_api_reference_v1.4.0_0.pdf)

Doppler Effect, United States Naval Academy. Obtido de: <https://www.usna.edu/Users/physics/ejtuchol/documents/SP411/Chapter19.pdf>

Ziemann, V., (2018). A Hands-On Course in Sensors Using the Arduino and Raspberry Pi, CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN 9781351188319.

Aulds, Charles, (2002). Apache Web Server Administration (2nd ed.). Donna Crossman, ISBN 0-7821-4137-4.

Tatroe, K., MacIntyre, P., Lerdorf, R., (2013). Programming PHP, O'Reilly Media, Sebastopol, ISBN 978-1-449-39277-2.

Kenler, E. Razzoli, F., (2015). MariaDB Essentials, Packt Publishing Ltd. Birmingham, ISBN 978-1-78398-286-8.

Directional YAGI WLAN Antenna EXTENSION for 2.4 GHz by photonix – Obtido de: Thingiverse, <https://www.thingiverse.com/thing:19548>.

Kolban, N., (2016). Kolban's Book on ESP8266. Obtido de: <http://neilkolban.com/tech/esp8266/>.

Viezbicke, P., P, 1976. Yagi Antenna Design. U.S. Department Of Commerce. National Bureau of Standards. Obtido de: <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/GOVPUB-C13-abad4b77cb9f7a5c73277d0d4b8b1f7d/pdf/GOVPUB-C13-abad4b77cb9f7a5c73277d0d4b8b1f7d.pdf>

Schwartz, M., (2016). Internet of Things with ESP8266, Packt Publishing , ISBN 978-1786468024.

Calculating Wavelengths - Just Incase You Wondered! DigitalAir Wireless. Obtido de: <https://www.digitalairwireless.com/articles/blog/calculating-wavelengths-just-incase-you-wondered>.

Bowden, N., (2015). Wi-Fi Planning, Walls and dB's – Measuring Obstruction Losses For WLAN Predictive Modelling. Obtido de: <https://www.ekahau.com/blog/2015/09/07/wi-fi-planning-walls-and-dbs-measuring-obstruction-losses-for-wlan-predictive-modelling/>.

Mayes, P., (1994). Proceedings of the 1993 antenna applications symposium. Obtido de: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a277202.pdf>.

Goldoni, E., Savioli, A., Risi, M., Gamba, P., (2010). Experimental analysis of RSSI-based indoor localization with IEEE 802.15.4, European Wireless Conference (EW), Italy, April 12-15.

- .Kuruoglu, G. S, Erol, M., Oktug, S., (2009). Localization in Wireless Sensor Networks with Range Measurement Errors, Advanced International Conference on Telecommunications AICT'09, Venice, Italy, May 24–28.
- Kumar, P., Reddy, L., Varma, S., (2009). Distance measurement and error estimation scheme for RSSI based localization in wireless sensor network, IEEE conference on WCSN, Allahabad, India.
- Zheng, J. Wu, C., Chu, H., Xu, Y., (2011). An Improved RSSI Measurement In Wireless Sensor Networks, Procedia Engineering, vol. 15.
- Bengherbia, B., Bachene, Y., Kebir, S. T., Chadli, S.,Hentabli, H., (2014). Experimental Analysis of Rssi-Based Outdoor Localization in Wireless Sensor Networks.
- Maduskar, D., Tapaswi, S., (2017). RSSI based adaptive indoor location tracker, Sci Phone Appl Mob Devices.
- Paul, A. S., Wan, E. A., (2009). RSSI-Based Indoor Localization and Tracking Using Sigma-Point Kalman Smoothers, IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing.
- Wang, Y., Zhao, B., Jiang, Z., (2014). RSSI-Based Smooth Localization for Indoor Environment, The Scientific World Journal, Volume 2014, Article ID 639142.
- Lawson, J. L., (1986). YAGI ANTENNA DESIGN, American Radio Relay League, Incorporated, ISBN 9780872590410.
- Fang, Z., Zhao, Z., Guo, P., Zhang, Y.-G., (2007). Analysis of distance measurement based on RSSI, Chinese Journal of Sensors and Actuators.

Sauter, M. (2011). From GSM to LTE An Introduction to mobile Networks and Mobile Broadband, John Wiley & Sons, Lda, ISBN 978-0-470-66711-8.



## 9. Anexos

---

**ANEXO A: (Patente) An Assembly For The Generation of a Two or Three-Dimensional Map of Obstacles in a Surrounding Area Through Walls, System Comprising it and Associated Method and Uses**

## **DESCRIPTION**

**AN ASSEMBLY FOR THE GENERATION OF A TWO OR THREE-DIMENSIONAL MAP OF OBSTACLES IN A SURROUNDING AREA THROUGH WALLS, SYSTEM COMPRISING IT AND ASSOCIATED METHOD AND USES**

### **FIELD OF THE INVENTION**

The present invention is enclosed in the area of the identification of obstacles – in particular objects or living beings – through walls, based on electromagnetic signals, particularly radiofrequency or microwave signals. Typically, it is of interest to provide a two or three-dimensional map of obstacles in an area on the inside of a building.

### **PRIOR ART**

For security reasons or following natural disasters, accidents or even for other reasons it may be useful to identify objects or living beings within buildings or other type of structures.

In this context photography and scanning techniques have been used as an innovative approach to facilitate such identification.

The concept of seeing “Through the Wall (TTW)” using radio-frequency (RF) in security and rescue applications has been previously disclosed, as is the case of PCT application with publication number WO 2008/001092.

It discloses a Through Wall Radar that provides a 3D view through brick or concrete walls over a range of up to 20 metres.

This technology provides comprehensive coverage of internal spaces and has well known advantages over conventional narrow band solutions but its high cost and the susceptibility to interference from signals in overlapping spectral bands are important disadvantages that must be considered. This solution presents a very low resolution of the objects detected inside the walls.

The present solution intends to innovatively overcome such issues.

### **SUMMARY OF THE INVENTION**

It is therefore an object of the present invention an assembly (1) for the generation of a two or three-dimensional map of obstacles in a surrounding area through walls comprising a receiving device in turn comprising a plurality of antennas (2) and being configured to:

- on receipt of a first electromagnetic signal emitted from a first position and an at least one subsequent electromagnetic signal emitted from at least one subsequent position, detect the power level of the first electromagnetic signal and of each subsequent electromagnetic signal as received in each of said antennas (2), resulting in a plurality of power level values corresponding to each received signal and each corresponding position of the emitted signals, and

the assembly (1) being configured to generate a map of a surrounding area of the receiving device, based on:

- said pluralities of power level values corresponding to each emitted electromagnetic signal and
- the positions corresponding to the emitted electromagnetic signals.

The detection of the pluralities of power level values associated with signals emitted from several positions, in a plurality of antennas (2), enables a reliable representation of through wall 2D/3D models, particularly of obstacles such as objects or living bodies, as the power level from several directions is modified by obstacles that are in the direct

path between an emitter and a receiver (in the present case, several receivers – each antenna) with a plurality of antennas (2) which is comprised in the assembly (1) of the present invention. The antennas (2) are identical.

In an inventive aspect of the assembly (1) of the present invention, said plurality of antennas (2) consists of a directional antenna array. Thus, it provides for higher reliability, as the antennas (2) in an array are uniformly distributed.

In another advantageous mode of the assembly (1) of the present invention, the receiving device further comprises means for uniformly moving the plurality of antennas (3). Thus, the orientation of the plurality of antennas (2) is easily configurable, thereby providing for a higher capability for receiving electromagnetic signals emitted from different positions.

In another inventive aspect of the assembly (1) of the present invention, the plurality of antennas (2) comprises a reference antenna (6) centrally displaced with regard to the remaining antennas (2), and the generation of a map of obstacles in a surrounding area comprises the comparison of the power level value as received in each of the remaining antennas (2) with the power level values as received in the reference antenna (6). It therefore provides a reference antenna (6) providing a reference power level value, comparable with the power level values of the remaining antennas (2). These values are used to generate maps of the obstacles, be it object or persons, inside a closed area, such as a building, where such closed area is between the position of the receiving device and the first and subsequent positions, where the electromagnetic signals are emitted. Preferably, the reference antenna (6) is separated of a minimum distance from any of the remaining antennas (2), such minimum distance being related with the wavelength of the electromagnetic signals, preferably consisting of five times such wavelength. Thus, it provides for a reduction of a harmful effect of near field radiation of each of the remaining antennas (2).

It is also an object of the present invention a system for the generation of a two or three-dimensional map of obstacles in a surrounding area through walls comprising at least one mobile emitting device (8) comprising an emitting antenna, and one assembly (1) of any of the preceding claims, the emitting device being configured to emit said first electromagnetic signal from a first position and said at least one subsequent electromagnetic signal from at least one subsequent position. The emitter thus provides an active solution in which electromagnetic signals, in particular compatible with the Wi-Fi protocol, are generated on the outside of a closed space.

In an inventive aspect of the system of the present invention, the mobile emitting device (8) and the receiving device are configured to, prior to the emission of an electromagnetic signal from a position, align the emitting antenna with the plurality of antennas (2) and subsequently synchronise, thereby maximising the power level values. Thus, emitting and receiving devices are so arranged that, when an electromagnetic signal is received at the receiving device, the received power levels are maximum. Further, synchronisation occurs so that emission occurs only after alignment is performed.

In yet another inventive aspect of the system of the present invention, the mobile emitting device (8) comprises an unmanned aerial vehicle, thereby providing mobility in a three-dimensional physical area. It is particularly suitable for surrounding a closed space such as a building, in the three Cartesian axis.

In another advantageous embodiment of the described system, it further comprises a ground mobile platform in turn comprising:

- wireless communication means configured to communicate with the mobile emitting device (8), and
  - wired power means adapted to provide power to the mobile emitting device (8),
- the mobile emitting device (8) comprising a plurality of coils (9), preferably three coils (9) triangularly displaced, so displaced that in a normal position of the mobile emitting

device (8) such coils (9) face the ground mobile platform, thereby providing power to the mobile emitting device (8). Thus providing for power supply and position anchoring of the mobile emitting device (8), particularly relevant in cases where it consists of unmanned aerial vehicle. This ground mobile platform can be built with motorized wheels that could move the platform to another location. The 3 coils (9), fixed to the platform, control with great precision (millimetres) the position of the unmanned aerial vehicle and can also provide its electrical power. The ground mobile platform that supports the bobbin platform communicates through a Wi-Fi network connection with the mobile vehicle that supports the array of antennas (2).

It is also an object of the present invention a method for the generation of a two or three-dimensional map of obstacles in a surrounding area through walls comprising the following steps:

- emission of a first electromagnetic signal from a first position and an at least one subsequent electromagnetic signal emitted from at least one subsequent position,
- reception of the first electromagnetic signal and of each subsequent electromagnetic signal in a plurality of antennas (2),
- detection of the power level of the received signal in each of the antennas (2), and
- generate a map of a surrounding area of the receiving device, based on:
  - said pluralities of power level values corresponding to each emitted electromagnetic signal, and
  - the positions corresponding to the emitted electromagnetic signals.

It thus also provides for the referred reliable representation of through wall 2D/3D models, particularly of obstacles such as objects or living bodies, as the power level from several directions is modified by obstacles that are in the direct path between an emitter and a receiver (in the present case, several receivers – each antenna) with a plurality of antennas (2), thereby constructing the 2D/3D model.

Furthermore, it is an object of present invention the use of the assembly (1) of the present invention – as of any of the described embodiments – to generate a two or three-dimensional map of a surrounding area of the receiving device, such area being inside a closed space such as a building, the map comprising the shape of objects or living beings inside the closed space. Typically, such area is between the receiving device and the first and subsequent positions where the electromagnetic signals are emitted.

Finally, it is an object of present invention the use of the system of the present invention – as of any of the described embodiments – to generate a two or three-dimensional map of a surrounding area of the receiving device, such area being inside a closed space such as a building, the map comprising the shape of objects or living beings

inside the closed space, and such closed space being between the receiving device and the first and subsequent positions from which the mobile emitting device (8) emits the electromagnetic signals.

### **DESCRIPTION OF FIGURES**

Figure 1 – representation of an embodiment of the assembly (1) of the present invention, particularly with a receiving device in which the plurality of antennas (2) consist of Yagi antennas (2), displaced in a movable frame (4) which in turn is connected to a remotely controlled vehicle, such vehicle consisting of the means for moving the receiving device on the ground (5).

Figure 2 – representation of an embodiment of the system of the present invention, specifically of the mobile emitting device (8), in such case consisting of an unmanned aerial vehicle. The mobile emitting device (8) comprises three coils (9) associated with step motors for stretching such coils (9), thereby providing a momentary immobilization to the ground. The emitting antenna is displaced on top of the unmanned aerial vehicle.

Figure 3 – representation of an embodiment of the system of the present invention, where a mobile emitting device (8) is on one side of the outside of a building and a receiving device is on an opposite side of the outside of that building. By means of the assembly (1) and system of the present invention, a map of the inside of such building is obtained.

### **DETAILED DESCRIPTION**

The more general and advantageous configurations of the present invention are described in the Summary of the invention. Such configurations are detailed below in accordance with other advantageous and/or preferred embodiments of implementation of the present invention.

In a preferred embodiment of the assembly (1) of the present invention, the means for uniformly moving the plurality of antennas (3) consist of i) a movable frame (4) in which the plurality of antennas (2) is mounted, ii) means for moving the receiving device on the ground (5) or, preferably, iii) both. It thereby consists of an enhancement of the capability of receiving signals emitted from a higher number of different positions, allowing for movement of the antennas (2), the receiving device as a whole or both. The means for moving the receiving device on the ground (5) preferably comprise four wheels.

In another preferred embodiment of the assembly (1) of the present invention in which the antennas (2) are uniformly movable through specific means, such embodiment being combinable with any above described, each antenna being individually able to be activated, preferably by means of a corresponding switch, such switch preferably consisting of an electronic relay. Thus, it provides for ease of installation and operation in case the antennas (2) are installed in a mounted frame.

In a preferred embodiment of the assembly (1), the electromagnetic signal consists of a radiofrequency (RF) signal or of a microwave signal, being especially advantageous where it complies with the Wi-Fi communication protocol.

In another embodiment of the assembly (1) of the present invention, each of said antennas (2) consists of a Yagi antenna, optionally the plurality of antennas (2) consisting of 9 Yagi antennas (2), with a reference antenna (6) surrounded by 8 remaining antennas (2). Preferably, the minimum distance between two of the directors of any antenna is of  $\frac{1}{4}$  of the wavelength of the electromagnetic signal and/or the base of the boom (7) of each antenna is mounted on the movable frame (4).

In a preferred embodiment of the system of the present invention, where it comprises the referred coils (9), such coils (9) consist of stretched electrical wires (10), each mobile emitting device (8) comprising a step motor associated with each of the stretched electrical wires (10), each of such step motors being adapted to stretch the corresponding electrical wire. Such motors ensure for the stretching of the wires.

In a preferred embodiment of the method of the present invention, the plurality of antennas (2) comprises a reference antenna (6) centrally displaced with regard to the remaining antennas (2), and the generation of a map of obstacles in a surrounding area comprises the comparison of the power level value as received in each of the remaining antennas (2) with the power level values as received in the reference antenna (6). As referred for the assembly (1), it provides a reference antenna (6) providing a reference power level value, comparable with the power level values of the remaining antennas (2). These values are used to generate maps of the obstacles, be it object or persons, inside a closed area, such as a building, in which the receiving device is positioned. Preferably, the reference antenna (6) is separated of a minimum distance from any of the remaining antennas (2), such minimum distance being related with the wavelength of the electromagnetic signals, preferably consisting of five times such wavelength. Thus, it provides for a reduction of a harmful effect of near field radiation of each of the remaining antennas (2).

In another preferred embodiment of the described method, electromagnetic signals are sent from an emitting antenna and, prior to the emission of any electromagnetic signal, the emitting antenna and the plurality of antennas (2) are aligned, thereby maximising the power level values of the received signals. Thus, the emitting antenna and the plurality of antennas (2) are so arranged that, when an electromagnetic signal is received at the plurality of antennas (2), the received power levels are maximum. Further, synchronisation occurs so that emission occurs only after alignment is performed.

A specific embodiment of the assembly (1) of the present invention is subsequently described.

The assembly (1) comprises an antenna array (plurality of antennas (2)), which is mounted on a fixed structure (the movable frame (4)) and it will be used as a directional antenna system reference. An antenna array is mounted on a moving frame (the means for moving the receiving device on the ground (5)), it will be necessary to individually activate each antenna through an optional switch that can be an electronic relay. Close to the array of mobile antennas (2), a central fixed antenna (reference antenna (6)) exists as

a reference one and it must be placed out of the near field radiation of each antenna, to minimise harmful effect. For example, all the other antennas (2) must be placed at five times the radio frequency wavelength. Each directional antenna must point and synchronize to the emitter (the mobile emitting device (8)) in real time.

Each directional antenna can be built with a grade of metallic wires (Yagi antenna, as of Figure 1). Each metallic wire has a specific length and all wires are parallel and separated by a distance of approximately  $1/4$  wavelength of the used radio frequency. For example, when the wireless frequency is 2.4 GHz this value is approximately 3 cm. When an emitter frequency uses 5 GHz this value (the distance between the metallic grade pattern) is approximately 1.5 cm. If a much higher frequency is used, then the metallic grade pattern would not be visible to the human eye. Since radio wave travel at a speed of 299,792,458 meters per second, the approximated distance between the metallic grade pattern can be calculated as  $\text{distance} = 299792458 / (4 \times \text{frequency})$ , in meters.

The emitting device is mounted on an autonomous UAV whose movement is synchronized with the movement of the antennas (2) of the receiving device and assumes dynamic positions. The 3D location of the emitting device/UAV is anchored with 3 tiny electrical wires that retains the UAV to a mobile platform on the ground. The position and length of the 3 tiny electrical wires provide power and a precise 3D location of the autonomous UAV. The motors of the UAV will ensures that the 3 tiny wires are always stretched.

The assembly (1), specifically the receiving device, has an application that detects the power level of the emitter. One of the directional antennas (2) of the array is the reference antenna (6). All Received Signal Strength (RSS) signals of the antennas (2) "i" will be collected regarded the reference antenna (6) signal level ( $\text{Measurement}_i = \text{RSS}_i - \text{RSS}_{\text{ref}}$ ), for each new location of the UAV. The UAV will make a full plan movement that will permit to obtain all measurements. These values are used to generate photos of any objects or persons inside a building. The mobile platform of the UAV is positioned in a new location and all previous measurements are performed. A new photo of any objects or

persons inside a building is generated. Combining all previous photos, a 3D model is constructed of the objects or persons inside a building.

With reference to Figure 1, a graphical representation of the array of antennas (2) in a receiving device is presented, as well as technical details of the structure of a directional Yagi antenna. The Yagi antenna is a directional antenna that can be used to capture radio frequency or simply Wi-Fi waves. It consists of an active element (dipole) and passive elements. The passive elements are: one reflecting element and several directing elements. The reflector is generally 10% longer than the directing elements. One of the directional antennas (2) of the array is the reference antenna (6). All RSS signals of the antennas (2) “i” will be collected with regard to the reference signal level ( $\text{Measurement}_i = \text{RSS}_i - \text{RSS}_{\text{ref}}$ ), for each new location of the UAV.

With reference to Figure 2, a graphical representation of the mobile emitting device (8) with the autonomous UAV is presented. The emitting device sends electromagnetic/wireless signal to be captured by the receiving device. Three coils (9) of tiny electrical wires with step motors are used to anchor the autonomous UAV to the ground. The position and length of the 3 stretched tiny electrical wires provide power and a precise 3D location of the autonomous UAV, based on a simple triangulation method of calculations. The motors of the UAV will ensure that the 3 tiny wires are always stretched. The 3 coils (9) are fixed on a mobile platform.

The position and length of the 3 stretched tiny electrical wires provide power and a precise 3D location of the autonomous UAV, based on a simple triangulation method of calculations.

Figure 3 contains a possible application, in which a 2D/3D model object or a graphic scheme within a building may be obtained after differential radio signal strength (RSS), in each direction, is modified by obstacles that are in the path between emitting and receiving devices.

As will be clear to one skilled in the art, the present invention should not be limited to the embodiments described herein, and a number of changes are possible which remain within the scope of the present invention.

Of course, the preferred embodiments shown above are combinable, in the different possible forms, being herein avoided the repetition all such combinations.

## CLAIMS

1. An assembly (1) for the generation of obstacles in a two or three-dimensional map of obstacles in a surrounding area through walls **characterised in that** it comprises a receiving device in turn comprising a plurality of antennas (2) and being configured to:

- on receipt of a first electromagnetic signal emitted from a first position and an at least one subsequent electromagnetic signal emitted from at least one subsequent position, detect the power level of the first electromagnetic signal and of each subsequent electromagnetic signal as received in each of said antennas (2), resulting in a plurality of power level values corresponding to each received signal and each corresponding position of the emitted signals, and

the assembly (1) being configured to generate a map of obstacles in a surrounding area of the receiving device, based on:

- said pluralities of power level values corresponding to each emitted electromagnetic signal and
- the positions corresponding to the emitted electromagnetic signals.

2. Assembly (1) according to the previous claim wherein said plurality of antennas (2) consists of a directional antenna array.

3. Assembly (1) according to any of the preceding claims wherein the receiving device further comprises means for uniformly moving the plurality of antennas (3).

4. Assembly (1) according to the previous claim wherein the means for uniformly moving the plurality of antennas (3) consist of i) a movable frame (4) in which the plurality of antennas (2) is mounted, ii) means for moving the receiving device on the ground (5) or, preferably, iii) both.

5. Assembly (1) according to any of the claims 3-4 wherein each antenna is individually able to be activated, preferably by means of a corresponding switch, such switch preferably consisting of an electronic relay.

6. Assembly (1) according to any of the preceding claims wherein the plurality of antennas (2) comprises a reference antenna (6) centrally displaced with regard to the remaining antennas (2), and the generation of a map of obstacles in a surrounding area comprises the comparison of the power level value as received in each of the remaining antennas (2) with the power level values as received in the reference antenna (6).

7. Assembly (1) according to the previous claim wherein the reference antenna (6) is separated of a minimum distance from any of the remaining antennas (2), such minimum distance being related with the wavelength of the electromagnetic signals, preferably consisting of five times such wavelength.

8. Assembly (1) according to any of the preceding claims wherein said electromagnetic signal consists of a radiofrequency (RF) signal or of a microwave signal.

9. Assembly (1) according to the previous claim wherein said electromagnetic signal complies with the Wi-Fi communication protocol.

10. Assembly (1) according to any of the preceding claims wherein each of said antennas (2) consists of a Yagi antenna, optionally the plurality of antennas (2) consisting of 9 Yagi antennas (2), with a reference antenna (6) surrounded by 8 remaining antennas (2).

11. Assembly (1) according to the previous claim wherein the minimum distance between two of the directors of any antenna is of  $\frac{1}{4}$  of the wavelength of the electromagnetic signal.

12. Assembly (1) according to claims 4 and 10 or 11, the base of the boom (7) of each antenna being mounted on the movable frame (4).

13. A system for the generation of a two or three-dimensional map of obstacles in a surrounding area through walls **characterised in that** it comprises at least one mobile emitting device (8) comprising an emitting antenna, and one assembly (1) of any of the preceding claims, the emitting device being configured to emit said first electromagnetic signal from a first position and said at least one subsequent electromagnetic signal from at least one subsequent position.

14. System according to any of the preceding claims wherein the mobile emitting device (8) and the receiving device are configured to, prior to the emission of an electromagnetic signal from a position, align the emitting antenna with the plurality of antennas (2) and subsequently synchronise, thereby maximising the power level values.

15. System according to any of the preceding claims wherein the mobile emitting device (8) comprises an unmanned aerial vehicle, thereby providing mobility in a three-dimensional physical area.

16. System according to the previous claim wherein it further comprises a ground mobile platform in turn comprising: wireless communication means configured to communicate with the mobile emitting device (8), and wired power means adapted to provide power to the mobile emitting device (8), the mobile emitting device (8) comprising a plurality of coils (9), preferably three coils (9) triangularly displaced, so displaced that in a normal position of the mobile emitting device (8) such coils (9) face the ground mobile platform, thereby providing power to the mobile emitting device (8).

17. System according to the previous claim wherein said coils (9) consist of stretched electrical wires (10), each mobile emitting device (8) comprising a step motor associated with each of the stretched electrical wires (10), each of such step motors being adapted to stretch the corresponding electrical wire.

18. A method for the generation of a two or three-dimensional map of obstacles in a surrounding area through walls **characterised in that** it comprises the following steps:

- emission of a first electromagnetic signal from a first position and an at least one subsequent electromagnetic signal emitted from at least one subsequent position,
- reception of the first electromagnetic signal and of each subsequent electromagnetic signal in a plurality of antennas (2),
- detection of the power level of the received signal in each of the antennas (2), and
- generate a map of obstacles in a surrounding area of the receiving device, based on:
  - said pluralities of power level values corresponding to each emitted electromagnetic signal, and
  - the positions corresponding to the emitted electromagnetic signals.

19. Method according to the previous claim wherein the plurality of antennas (2) comprises a reference antenna (6) centrally displaced with regard to the remaining antennas (2), and the generation of a map of obstacles in a surrounding area comprises the comparison of the power level value as received in each of the remaining antennas (2) with the power level values as received in the reference antenna (6).

20. Method according to any of the claims 18-19 wherein the reference antenna (6) is separated of a minimum distance from any of the remaining antennas (2), such minimum distance being related with the wavelength of the electromagnetic signals, preferably consisting of five times such wavelength.

21. Method according to any of the claims 18-20 wherein electromagnetic signals are sent from an emitting antenna and, prior to the emission of

any electromagnetic signal, the emitting antenna and the plurality of antennas (2) are aligned, thereby maximising the power level values of the received signals.

22. Use of the assembly (1) of any of the claims 1-12 to generate a two or three-dimensional map of obstacles in a surrounding area of the receiving device, such area being inside a closed space such as a building, the map comprising the shape of objects or living beings inside the closed space.

Use of the system of any of the claims 13-17 to generate a two or three-dimensional map of obstacles in a surrounding area of the receiving device, such area being inside a closed space such as a building, the map comprising the shape of objects or living beings inside the closed space, and such closed space being between the receiving device and the first and subsequent positions from which the mobile emitting device (8) emits the electromagnetic signals.

## **ABSTRACT**

### **AN ASSEMBLY FOR THE GENERATION OF A TWO OR THREE-DIMENSIONAL MAP OF OBSTACLES IN A SURROUNDING AREA THROUGH WALLS, SYSTEM COMPRISING IT AND ASSOCIATED METHOD AND USES**

The present invention is in the area of the identification of obstacles – particularly objects or living beings – through walls, based on electromagnetic signals, such as radiofrequency or microwave signals. It consists of an assembly (1) for such purpose comprising a receiving device with a plurality of antennas (2), configured to, on receipt of a first signal emitted from a first position and at least a subsequent signal emitted from another position, detect the power level of such signals as received in each antenna, resulting in several power level values corresponding to emitted signals and positions, the assembly (1) being configured to generate a map of obstacles in a surrounding area of the receiving device based on said power level values and positions. Such assembly (1) provides reliably generation of a map of obstacles, particularly with obstacles such as objects or living bodies. A system comprising such assembly (1) and associated method and uses are also part of the present invention.

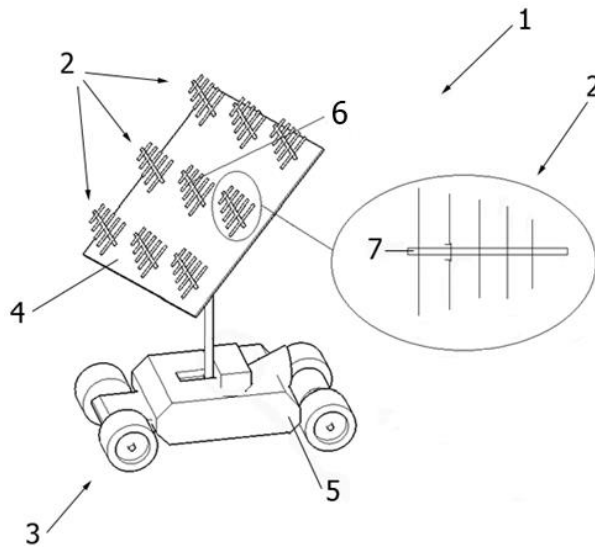


Figure 1

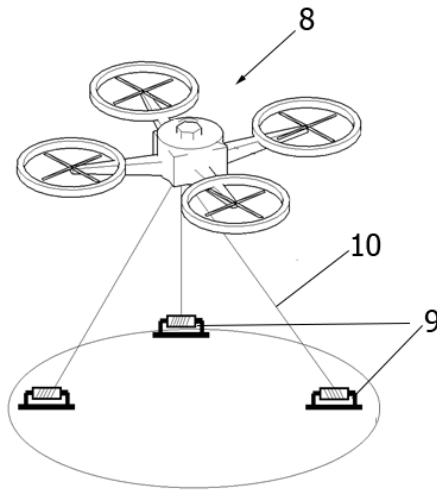


Figure 2

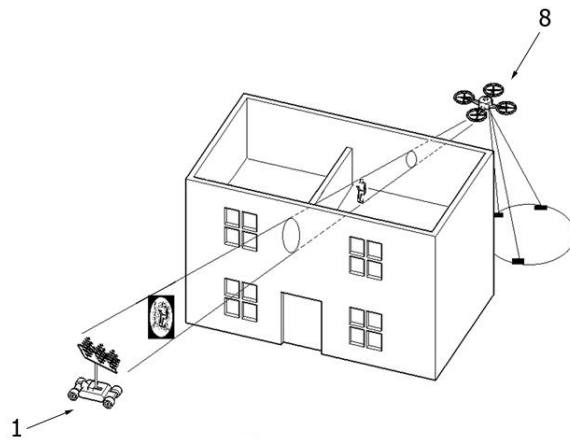


Figure 3

## **ANEXO B: (Artigo) IoT Scanning Through Walls Using Wi-Fi**

# IoT SCANNING THROUGH WALLS USING Wi-Fi

C. M. S. Ferreira<sup>1</sup>, J. S. Pereira<sup>1,2,3</sup>, S. P. Mendes<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Polytechnic Institute of Leiria, School of Technology and Management, Leiria, Portugal

<sup>2</sup>Center for research in Informatics and Communications, Polytechnic Institute of Leiria, Portugal

<sup>3</sup>Instituto de Telecomunicações, Leiria Branch, Portugal

**Abstract**—For security reasons, afterwards natural disasters, accidents or many other reasons, it may be useful to identify objects or living beings within buildings or detect building internal structure. In this context the usage of photography and scanning techniques employing Wi-Fi allow an innovative approach to facilitate referred identification. By using wireless technology, this work presents a proposal for the detection and identification of object shapes through walls. This goal was achieved reading the radio signal strength (RSS) with an array of antennas.

**Index Terms**—Antenna, Emitter, Path loss, Radio Signal Strength (RSS), and Wi-Fi

## I. INTRODUCTION

In recent years there has been a growing interest in IoT (Internet of Things) technologies. The evolution of technology has favored usage of Wi-Fi (Wireless Fidelity) devices that as they become more sophisticated are also smaller, more energy-efficient, and cheaper. The gathering of these factors has attracted not only the research departments of the universities but also the industry in general and the result is the appearance of numerous academic and commercial projects on this subject which in itself is very broad.

The work "Holography of Wi-Fi Radiation" [1] is a good example of the use of a coherent light (electromagnetic waves with precisely known amplitude and phase) emitted by Wi-Fi systems. In this work, the radiation that results from the propagation of electromagnetic waves, forms a hologram that allows to identify objects located between the emitter and the receiver.

At the same time, there are commercial solutions about the TTW (Through the Wall) subject using RF (Radio-frequency) in security and rescue applications. The majority are Ultra-Wide Band like Cambridge Consultants' system Prism200 [2]. This is a commercial *Through Wall Radar* that provides a 3D view through brick or concrete walls over a range of up to 20 meters. This technology provides comprehensive coverage of indoor spaces and has well known advantages over conventional narrow band solutions, but its high cost and the susceptibility to receive interference from signals in overlapping spectral bands and low resolution are major disadvantages that must be considered. On the other hand, as Wi-Fi signals are present in a growing number of buildings all over the world, there are some TTW projects that use Wi-Fi sources to try to detect the position of people or objects inside of buildings. Nevertheless, if it is necessary to detect such targets in a building without a Wi-Fi source this TTW project doesn't offer an adequate solution.

Thus, the propose of this work is to present a low cost project which can contribute to the detection of objects and living beings within buildings that do not have Wi-Fi Networks.

This way, in Free Space, Radio Frequency power varies inversely with the square of the distance between receiver and transmitter. The stronger the power, the higher the signal

strength [3] [4]. Additionally, while transmitter power increases the distance in which a wireless signal can travel, the path loss reduces it.

It is well known that RF signals are influenced by the environment but by other factors too [5]. This means that the fog, objects, human beings or walls, attenuate signal power between the transmitters and receivers. In addition, it is important to note that the attenuation also depends on the frequency used [3]. RSSI (Received Signal Strength Indicator), describes the total signal power received and is usually expressed in dBm. Additionally, free space path loss model of propagation and Shadowing model are common methods of RSSI signal propagation for WSN (Wireless Sensor Network) [4] [5].

In this work a Raspberry PI was used as emitter and as a web and database server. The receiver, a directional array of, at least, sixteen antennas (fig. 1) was prepared to measure RSSI values trough the wall and transmit it to the database on Raspberry PI. After that, images were computed showing the attenuation of objects like a wooden furniture with books or a metal-coated wood object, both near a real wall. The number of antennas on the array is related to the resolution, since each antenna represents a pixel in the image that will represent an object detected behind a wall.

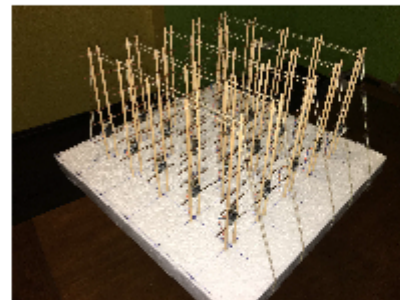


Fig. 1. Antennas Matrix

Section II presents the RSSI Matrix theory while section III presents the hardware implementation. Section IV presents the ideal transmission power on a Raspberry PI and section V presents object detection tests. Finally, section VI presents the conclusion and section VII presents future work.

## II. RSSI MATRIX

Assuming that antennas are in free space and are separated by a large distance  $d$  in the far field of each other, the received power  $P_r$  will be equal to the product of the power density  $P$  of the incident wave and the effective aperture area  $A_e$  of the receiving antenna (1) [6].

$$P_r = PA_e \quad (1)$$

Considering that  $G_t$  is the gain of the transmitting antenna in the direction of the receiving antenna and that  $G_r$  is the gain of the receiving antenna in the direction of transmitting antenna. With the Friss transmission formula [7], the equation (1) can be overwritten in equation (2) where  $P_t$  is the power at the transmitter,  $P_r$  is the power at the receiver,  $d$  is the distance in meters and  $\lambda$  is the wavelength (speed of light/frequency):

$$P_r = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_t G_r P_t \quad (2)$$

The path loss model of free space propagation is an ideal transmission case. It is known that there is an infinite vacuum around antenna and the signal transmission energy is only related to transmission distance. There is a linear relationship between the signal transmission energy and transmission distance [5]. Thus, this model has no effect on obstacles and scattered reflection.

However, as tests occur not in free space but in the real world with buildings, fog, rain, objects and living beings, it is necessary to consider their interference (scattered reflection, shade, and absorbance) in the process.

This way, to take into account attenuation caused by objects, living beings and walls in real situations, it is necessary to use a larger exponent  $n > 2$ , in (3) [5]. The attenuation characteristic in the long distance is following the log-normal distribution, thus the path loss model is shown as follows:

$$P_r(d) = P_r(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (3)$$

Equation (3) indicates the path loss of receiving signal when the measuring distance is  $d(m)$ , and the absolute power value is expressed in dBm;  $P_r(d_0)$  indicates the path loss of receiving signal when the reference distance is  $d_0$ ;  $n$  indicates the path loss index in a specific environment, which is increased along with increasing distance;  $X_\sigma$  is in dB and it is a cover factor when the range of standard deviation  $\sigma$  is 4~10 and the mean

value is 0.  $X_\sigma$  describes the random shadowing effects. The larger the  $\sigma$ , the greater the uncertainty of the model [5].

RSSI equation is as follows:

$$RSSI = P_t - P_l(d) \quad (4)$$

In equation (4)  $P_t$  is the power at the transmitter,  $P_l(d)$  is the path loss when the distance is  $d$ .

The signal strength received from a reference node at the distance  $d_0$  is  $r_{i,j}$  as follows:

$$r_{i,j} = P_t - P_l(d_{i,j}) \quad i=1,\dots,M, j=1,\dots,N \quad (5)$$

The signal strength received of an array of  $M \times N$  antennas is  $r_{i,j}$  and  $d_{i,j}(m)$  is the real distance between the emitter and each receiver  $(i,j)$  in the antennae matrix.

The path loss model measured at distance  $d_{i,j}$  is as follows:

$$P(d_{i,j}) = P(d_0) - 10n \log\left(\frac{d_{i,j}}{d_0}\right) - X_\sigma \quad (6)$$

Equation (6) indicates the received signal strength when the measured real distance is  $d_{i,j}$  and  $P(d_0)$  indicates the received signal strength when the reference distance is  $d_0$  and  $(X_\sigma \sim N(0, \sigma^2))$  is normal distribution with zero mean and  $\sigma^2$  variance. The reference distance is considered as  $d_0$  and has been set to 1 meter.

The value  $A$  is the matrix of the RSSI values of the  $M \times N$  receivers of our matrix antenna (Fig. 1) composed with  $M$  rows and  $N$  columns.

$$A = [\bar{r}_{i,j} - c], \quad i=1,\dots,M, j=1,\dots,N \quad (7)$$

The  $\bar{r}_{i,j}$  is the average value of 100 RSSI readings (in one second). The  $c$  is also the average value of 100 RSSI readings of an extra antenna in a position out of the matrix antenna. For example, it can be equal to  $\bar{r}_{N+1,1} + \dots$ .

$R$  is the matrix of  $M \times N \times Q \times P$  RSSI values of the  $A$  Matrix that is used to compose an image of  $M \times Q$  rows of pixels and  $N \times P$  columns of pixels.

$$R = [A_{r,s}], \quad r=1,\dots,Q, s=1,\dots,P \quad (8)$$

with

$$A_{r,s} = \bar{r}_{i,j} - c, \quad r=1,\dots,Q, s=1,\dots,P \quad (9)$$

### III. HARWARE IMPLEMENTATION

#### A. Raspberry PI

Raspberry PI is a small and affordable computer that can be used for general purposes. This device can send and receive data through Ethernet and/or Wi-Fi interfaces and can run, among others, operating systems like Raspbian, Windows 10 IoT (Internet of Things) or Ubuntu. Raspbian is the Foundation's official support operating system [8]. In this project Raspbian operating system was used which provided support for apache as webserver [9], for php (Hypertext Preprocessor) that is a widely-used open source general-purpose scripting language used for web development [10] and for MariaDB that is a backward compatible, drop-in replacement of the MySQL® (Structured Query Language) Database Server and includes all major open source storage engines [11].

#### B. Antennas Array

To receive wireless signal from the emitter (Raspberry PI) a directional array of, at least, sixteen Yagi antennas was used. In this array, each antenna read RSSI signal and save it on a specific database created on Raspberry PI. One of the antennas is the reference used for the RSSI value  $c$  of (7). An example of this antenna array is presented in fig. 1.

Each Yagi antenna includes an ESP8266-01S chip and was constructed as shown in fig. 2 and fig. 3 with 1 mm diameter Copper Rods. Copper Rods length are presented on table 1 [12].

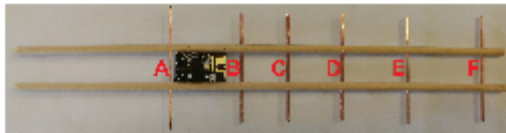


Fig. 2. Yagi Antenna

TABLE I. YAGI ANTENNA DIMENSIONS

Position	Length
A	60 mm
B	53mm
C	52 mm
D	51.5 mm
E	51 mm
F	50 mm

The ESP-01S presented in fig. 3 is a low-cost Wi-Fi microchip. Its ESP8266EX microcontroller integrates a Tensilica L106 32-bit RISC processor which achieves extra-low power consumption and reaches a maximum clock speed of 160 MHz. The Real-Time Operating System (RTOS) and Wi-Fi stack allow about 80% of the processing power to be available for user application programming and development [13] [14].

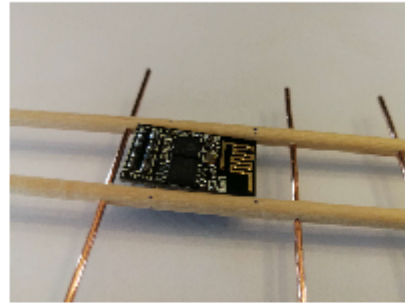


Fig. 3. ESP-01S

ESP8266EX is among the most integrated Wi-Fi chip in the industry, it integrates the antenna switches, RF Balun, power amplifier, low noise receive amplifier and is designed to occupy minimal PCB (Printed Circuit Board) area [13] [14]. Developers can completely control ESP-01S behavior including its Wi-Fi power that, in this case, was set to 8 (`WiFi.setOutputPower(8)`). This characteristic is very important to minimize neighbor device interference and saturation RSSI readings.

The antenna applied on this module is a 3 dBi PCB-on-board antenna which is a Meandered Planar Inverted-F Antenna (MIFA). The MIFA design is space efficient where the RF performance is predictable and usually requires no more than 15.2 x 5.7 mm of space to ensure a Voltage Standing Wave Ratio (VSWR) ratio of less than 2 across a 2.4 GHz ISM band.

The MIFA Antenna is quite functional and operates on a rather complex concept called quarter wave long system, which is to say, a quarter of 12.5 cm that is the wave length of a 2.4 GHz signal [15]. It is for this reason that the antennas on the array were placed in order to guarantee 7.5 cm between each other, minimizing the interference between them.

Tests were performed to determine the benefit of using this Yagi antenna configuration. Thus, the performance of the ESP-01S mounted on a Yagi antenna was compared with performance of an ESP-01S without Yagi antenna and a difference of about 5 dB was obtained as seen on table II.

TABLE II. GAIN DIFFERENCE

ESP-01	Power measured (dBm)
Mounted on Yagi Antenna	-62
Standalone	-67

#### IV. IDEAL TX POWER ON RASPBERRY PI

To determine the ideal transmission power on the Raspberry PI a test was made in which the transmission power on Raspberry PI was automatically decremented from the default value 31 to 0. To do this, the following script was executed on Raspberry PI:

```
#!/bin/bash
for i in {30..0..-1}
do
echo ""
echo "txPower was changed to $i "
echo ""
echo "Actual txPower: "
echo ""
sudo iwconfig wlan0 txpower $i
sudo iwconfig
sleep 15
done
```

After the transmission power decrement, it was possible to conclude that the Raspberry PI transmission power should be between the 17 and 6 value. This means that when Tx Power was above 17 or Tx Power was below 6, antennas could not detect enough RSSI variation as seen on fig. 4.

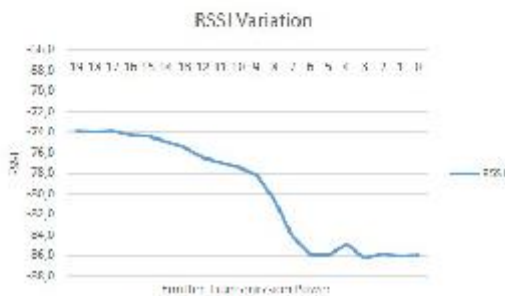


Fig. 4. RSSI Variation Detection

#### V. OBJECT DETECTION

After TX Power on Raspberry PI has been set to the level 7 and the Output Power of all antennas has been set to 8, RSSI tests were made on a real wall with obstacles fig. 5, fig. 7, fig. 9 and fig. 11. The numbers from 1 to 16 identify the positions that Raspberry PI traveled on the outer side of the wall as a Wi-Fi emitter. At same time each static Yagi antenna measured 100 RSSI values per second and its ESP 01S recorded the average values in the Raspberry PI database.

The test scenario was like shown in fig. 5 where distance between obstacles and the array of antennas was about 4 meters.

This is the preferable distance because as seen in fig. 6 in first meter occurs a great loss of power which is to say that this is an unstable zone. Then as the distance increases the power variation decreases which means more stability from the first meter [16].

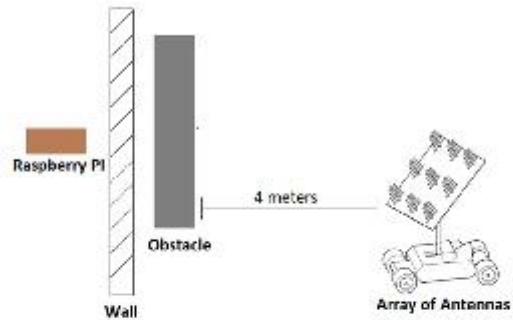


Fig. 5. Scenario tests

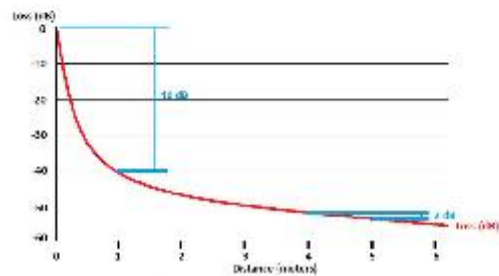


Fig. 6. Loss variation as a function of distance

In fig. 7 it is seen the furniture, the free wall to its left and the 16 positions that, outside, the Raspberry PI has crossed. The result of this scan is seen in fig. 8 where it is noticed that in the right side, corresponding to the position of the furniture, there was more intense attenuation.



Fig. 7. Wooden furniture with free wall on the left

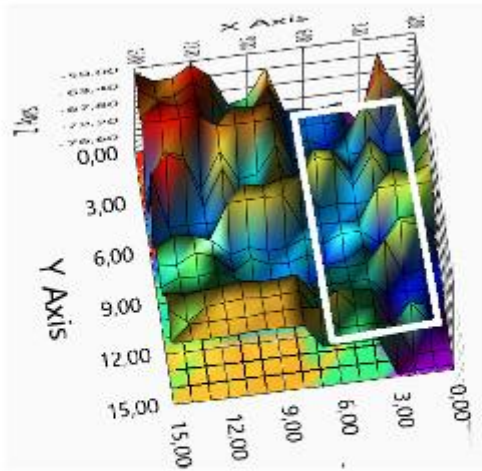


Fig. 8. Attenuation of the wooden furniture with free wall on the left

The next test consisted of moving the wooden furniture to the left to free the wall from its right side as seen in fig. 9. In this way, fig. 10 shows that the side of greater attenuation moved to the left side corresponding to the new position of the wooden furniture.



Fig. 9. Wooden furniture with free wall on the right

Finally, in the last test a metal-coated wood object was used as seen in fig. 11. In this test, the attenuation produced only by the wall without obstacles is shown in fig. 12 while in the fig. 13 it is shown the wall and object attenuation. This time, the obstacle was a metal-coated wood object and in this case the white line represents its attenuation. The dimensions of the vertical and horizontal components of the metal-coated wood object were approximately  $1 \times 0.1 \times 0.1$  meters.

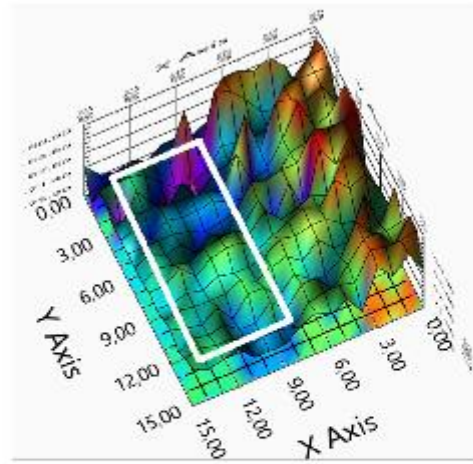


Fig. 10. Attenuation of the wooden furniture with free wall on the right



Fig. 11. Raspberry Pi sixteen outdoor positions

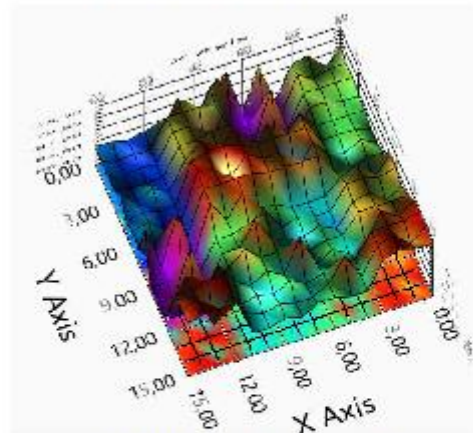


Fig. 12. Wall without object attenuation

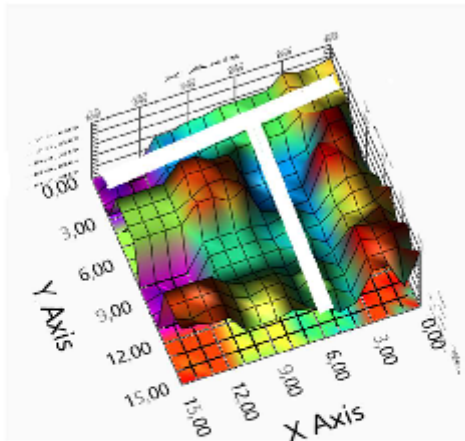


Fig. 13. Wall with metal-coated wood object attenuation

## VI. CONCLUSION

This work is a direct result of the motivation to obtain results in the TTW (Through the Wall) specific area, using affordable IoT technologies.

In this TTW approach, sixteen ESP8266-01S microprocessors were used. Additionally, they were coupled in directional antennas that were assembled in the form of an array to improve resolution and transmission power.

With a Raspberry PI as an emitter and, at same time, as a database and web server, this technique allowed to carry out tests that can contribute to the detection of objects within buildings in the most diverse contexts, including security and catastrophic situations.

## VII. FUTURE WORK

As future work it is proposed that taking advantage of the constant evolution of IoT technologies will better control the gain of the devices and replace Raspberry PI with a smaller device that allows the Wi-Fi authentication of an increasing number of client devices.

It is further proposed, that the array of antennas can be installed in an autonomous vehicle and that the Raspberry PI or a smaller device can be coupled to an unmanned aerial vehicle.

On the other hand, as a final result, it is desirable to reproduce in 2D and 3D the objects detected.

## REFERENCES

- [1] P. M. Holl, F. Reinhard, "Holography of Wi-fi Radiation", *Physical Review Letters*, PRL 118, 183901, May 2017.
- [2] "Through-wall radar PRISM200 - Through-wall radar - CAMBRIDGE RADAR-TECH INTERNATIONAL LIMITED", <http://cambrate.com/product.php?id=16>.
- [3] P. Kolios, "Wireless Environment and Mobility Issues", Dept. of Computer Science, University of Cyprus.

- [4] X. Jiuqiang, W. Liu, F. Lang, Y. Zhang, C. Wang, "Distance measurement model based on RSSI in WSN", [https://www.researchgate.net/publication/220279158\\_Distance\\_measurement\\_model\\_based\\_on\\_RSSI\\_in\\_WSN](https://www.researchgate.net/publication/220279158_Distance_measurement_model_based_on_RSSI_in_WSN), 2010.
- [5] F. Shang, W. Su, Q. Wang, H. Gao, e Q. Fu, "A Location Estimation Algorithm Based on RSSI Vector Similarity Degree", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2014, pp. 1–22, Ago. 2014.
- [6] R. Johnson, "Antenna Engineering Handbook" (3rd ed.), New York, NY: McGraw-Hill, Inc. p. 1-12. ISBN 0-07-032381-X, 1992.
- [7] H.T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula", *IRE Proc.*: 254–256, May 1946.
- [8] V. Ziemann, "A Hands-On Course in Sensors Using the Arduino and Raspberry Pi", CRC Press, Taylor & Francis Group, ISBN 9781351188319, 2018.
- [9] Aulds, Charles, "Apache Web Server Administration" (2nd ed.). Donna Crossman, ISBN 0-7821-4137-4, 2002.
- [10] K. Tatooe, P. MacIntyre, R. Lerdorf, "Programming PHP", O'Reilly Media, Sebastopol, ISBN 978-1-449-39277-2, 2013.
- [11] E. Kenler, F. Razzoli, "MariaDB Essentials", Packt Publishing Ltd. Birmingham, ISBN 978-1-78398-286-8, 2015.
- [12] "directional YAGI WLAN Antenna EXTENSION for 2.4 GHz by photonix - Thingiverse", <https://www.thingiverse.com/thing:19548>, 2012.
- [13] N. Kolban, "Kolban's Book on ESP8266", <http://neilkolban.com/tech/esp8266/>, 2016
- [14] M. Schwartz, "Internet of Things with ESP8266", Packt Publishing, ISBN 978-1-786468024 2016
- [15] "Calculating Wavelengths - Just Incase You Wondered! DigitalAir Wireless", <https://www.digitalairwireless.com/articles/blog/calculating-wavelengths-just-incase-you-wondered>.
- [16] N. Bowden, "Wi-Fi Planning, Walls and dB's - Measuring Obstruction Losses For WLAN Predictive Modelling", <https://www.ekahau.com/blog/2015/09/07/wi-fi-planning-walls-and-dbs-measuring-obstruction-losses-for-wlan-predictive-modelling/>, Feb. 2015.
- [17] P. Mayes, "Proceedings of the 1993 antenna applications symposium", <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a277202.pdf>, Feb. 1994.
- [18] E. Goldoni, A. Savioli, M. Risi, P. Gamba, "Experimental analysis of RSSI-based indoor localization with IEEE 802.15.4," *European Wireless Conference (EW)*, Italy, April 12-15, 2010.
- [19] G. S. Kuruoglu, M. Erol, S. Oktug, "Localization in Wireless Sensor Networks with Range Measurement Errors," *Advanced International Conference on Telecommunications AICT'09*, Venice, Italy, May 24–28, 2009.
- [20] P. Kumar, L. Reddy, S. Varma, "Distance measurement and error estimation scheme for RSSI based localization in wireless sensor network," *IEEE conference on WCSN*, Allahabad, India., 2009.
- [21] J. Zheng, C. Wu, H. Chu, Y. Xu, "An Improved RSSI Measurement In Wireless Sensor Networks", *Procedia Engineering*, vol. 15, Jan. 2011.
- [22] B. Bengherbia, Y. Bachene, S. T. Kebir, S. Chadli, H. Hentabli, "Experimental Analysis of Rssi-Based Outdoor Localization in Wireless Sensor Networks", 2014.
- [23] D. Maduskar, S. Tapaswi, "RSSI based adaptive indoor location tracker", *Sci Phone Appl Mob Devices*, 2017.

- [24] A. S. Paul, E. A. Wan, "RSSI-Based Indoor Localization and Tracking Using Sigma-Point Kalman Smoothers", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, Oct. 2009.
- [25] Y. Wang, B. Zhao, Z. Jiang, "RSSI-Based Smooth Localization for Indoor Environment", *The Scientific World Journal*, Volume 2014, Article ID 639142, 2014.
- [26] F. Adib, "See Through Wall With Wi-Fi". Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, 2013.
- [27] J. L. Lawson, "YAGI ANTENNA DESIGN", American Radio Relay League, Incorporated, ISBN 9780872590410, 1986.
- [28] Z. Fang, Z. Zhao, P. Gao, Y.-G. Zhang, "Analysis of distance measurement based on RSSI", *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007.
- [29] M. Sauter, "From GSM to LTE An Introduction to mobile Networks and Mobile Broadband", John Wiley & Sons, Ltd, ISBN 978-0-470-66711-8, 2011.

## **ANEXO C: What is I/Q Data**

O texto do Anexo C corresponde à transcrição do *white paper* “What is I/Q Data” da National Instruments de acordo com a autorização de utilização emitida pela National Instruments (ver anexo D).

## Background on Signals

«Signal modulation changes a sine wave to encode information. The equation representing a sine wave is as follows:

$$A_c \cos(2\pi f_c t + \phi)$$

The diagram shows the equation  $A_c \cos(2\pi f_c t + \phi)$  with three red arrows pointing to its components: 'Amplitude' points to  $A_c$ , 'Frequency' points to  $2\pi f_c$ , and 'Phase' points to  $\phi$ . A black bracket groups 'Frequency' and 'Phase', with the label 'Angle' and the note '(Frequency = Rate of Change of Angle)' below it.

Figura 9.1 Equation for a Sine Wave (<http://www.ni.com/tutorial/4805/en/>)

The equation above shows that you are limited to making changes to the amplitude, frequency, and phase of a sine wave to encode information. Frequency is simply the rate of change of the phase of a sine wave (frequency is the first derivative of phase), so frequency and phase of the sine wave equation can be collectively referred to as the phase angle. Therefore, we can represent the instantaneous state of a sine wave with a vector in the complex plane using amplitude (magnitude) and phase coordinates in a polar coordinate system.

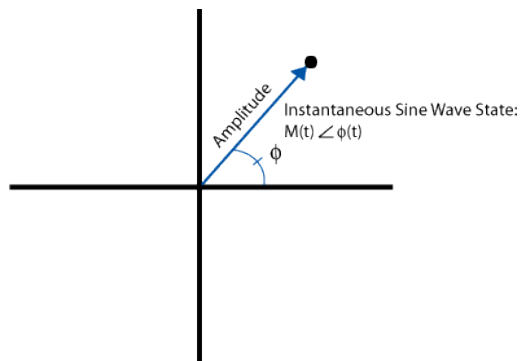


Figura 9.2 Polar Representation of a Sine Wave (<http://www.ni.com/tutorial/4805/en/>)

In the graphic above, the distance from the origin to the black point represents the amplitude (magnitude) of the sine wave, and the angle from the horizontal axis to the line represents the phase. Thus, the distance from the origin to the point remains the same as long as the amplitude of the sine wave is not changing (modulating). The phase of the point changes according to the current state of the sine wave. For example, a sine wave with a frequency of 1 Hz ( $2\pi$  radians/second) rotates counter-clockwise around the origin at a rate of one revolution per second. If the amplitude doesn't change during one revolution, the dot maps out a circle around the origin with radius equal to the amplitude along which the point travels at a rate of one cycle per second.

Because phase is a relative measurement, imagine that the phase reference used is a sine wave of frequency equal to the sine wave represented by the amplitude and phase points. If the reference sine wave frequency and the plotted sine wave frequency are the same, the rate of change of the two signals' phase is the same, and the rotation of the sine wave around the origin becomes stationary. In this case, a single amplitude/phase point can represent a sine wave of frequency equal to the reference frequency. Any phase rotation around the origin indicates a frequency difference between the reference sine wave and the sine wave being plotted.

Up to this point, this white paper has described amplitude and phase data in a polar coordinate system. All the concepts discussed above apply to I/Q data. In fact, I/Q data is merely a translation of amplitude and phase data from a polar coordinate system to a Cartesian (X,Y) coordinate system. Using trigonometry, you can convert the polar coordinate sine wave information into Cartesian I/Q sine wave data. These two representations are equivalent and contain the same information, just in different forms. This equivalence is shown in Figure 9.3.

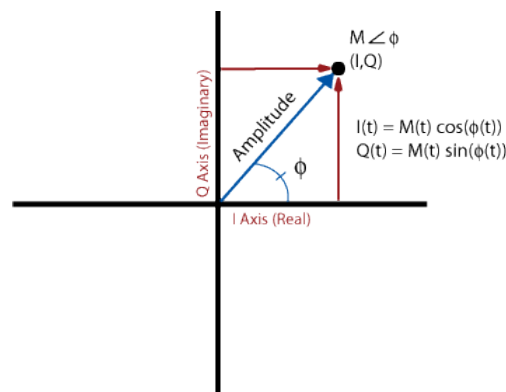


Figura 9.3 I and Q Represented in Polar Form (<http://www.ni.com/tutorial/4805/en/>)

## I/Q Data in Communication Systems

To explain why I/Q data is used in communications systems, you must understand modulation basics.

RF communication systems use advanced forms of modulation to increase the amount of data that can be transmitted in a given amount of frequency spectrum. Signal modulation can be divided into two broad categories: analog modulation and digital modulation. Analog or digital refers to how the data is modulated. If analog audio data is modulated onto a carrier sine wave, this technology is referred to as analog modulation. If analog audio data is sampled by an analog-to-digital converter (ADC) with the resulting digital bits modulated onto a carrier sine wave, this technology is defined as digital modulation because digital data is encoded. Both analog modulation and digital modulation involve changing the carrier wave amplitude, frequency, or phase (or combination of amplitude and phase simultaneously) according to the message data.

Amplitude modulation (AM), frequency modulation (FM), or phase modulation (PM) are all examples of analog modulation. With amplitude modulation, the carrier sine wave amplitude is modulated according to the message signal. The same idea holds true for frequency and phase modulation.

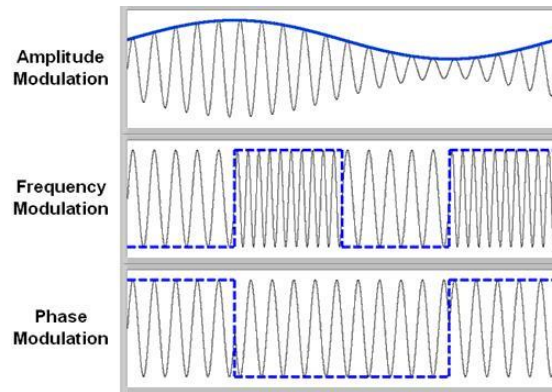


Figura 9.4 Time Domain of AM, FM, and PM Signals (<http://www.ni.com/tutorial/4805/en/>)

Figure 9.4 represents various analog techniques—AM, FM, and PM—applied to a carrier signal. For AM, the message signal is the blue sine wave that forms the "envelope" of the higher frequency carrier sine wave. For FM, the message data is the dashed square wave. As the figure illustrates, the resulting carrier signal changes between two distinct frequency states. Each frequency state represents the high and low state of the message signal. If the message signal were a sine wave in this case, there would be a more gradual change in frequency, which would be more difficult to see. For PM, notice the distinct phase change at the edges of the dashed square wave message signal.

As mentioned earlier, if only the carrier sine wave amplitude changes with respect to time (proportional to the message signal), as is the case with AM modulation, the I/Q plane graph changes only with respect to the distance from the origin to the I/Q points, as shown in the following image:

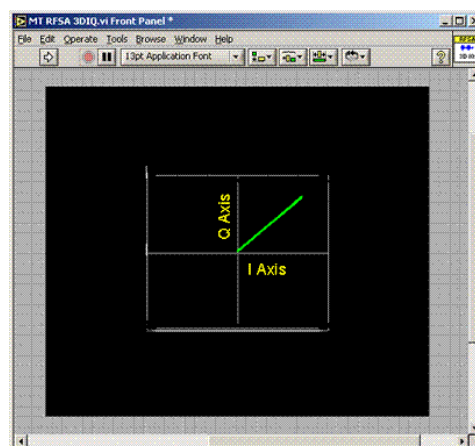


Figura 9.5 I/Q Data in the Complex Domain (<http://www.ni.com/tutorial/4805/en/>)

The preceding figure shows the I/Q data points vary in amplitude only, with the phase fixed at 45 degrees. You cannot tell much about the message signal, only that it is amplitude

modulated. However, if you watch how the I/Q data points vary in magnitude with respect to time, you can essentially see a representation of the message signal. Using LabVIEW's 3D graph control, we can show the third axis of time to illustrate the message signal.

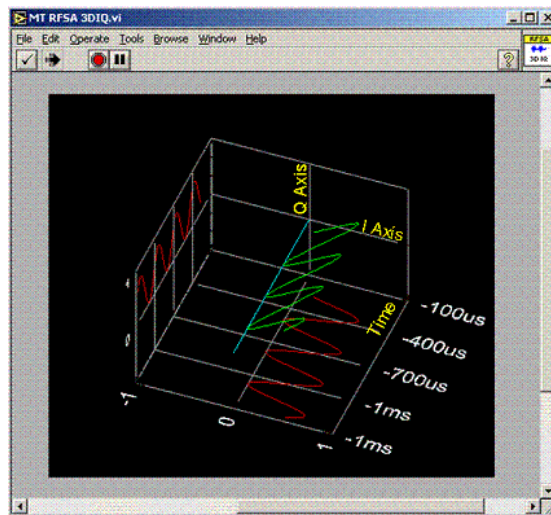


Figura 9.6 Representation of Magnitude vs. Time (<http://www.ni.com/tutorial/4805/en/>)

Figure 9.6 shows the same data as the 2D I vs. Q plot in Figure 9.5. The magnitude of the signal trace modulates in a sinusoidal pattern, indicating that the message signal is a sine wave. The green trace represents the amplitude and phase data in a polar coordinate system, while the red traces represent the projections of this waveform onto the I and Q axes, representing the individual I and Q waveforms.

We can show the same type of example using PM, as shown in the following figure:

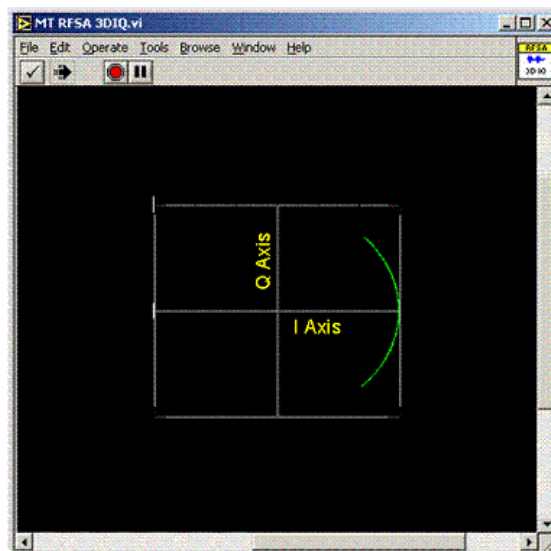


Figura 9.7 Polar Representation of Phase vs. Time (<http://www.ni.com/tutorial/4805/en/>)

You can tell that the message signal is phase modulated, as the amplitude is constant but the phase is changing (modulating). You cannot see the shape of the message signal with respect to time, but you can see the minimum and maximum signal levels of the message signal are represented by phase deviations of  $-45$  degrees and  $+45$  degrees respectively.

The time axis can be used to better understand this concept, as shown in the following figure:

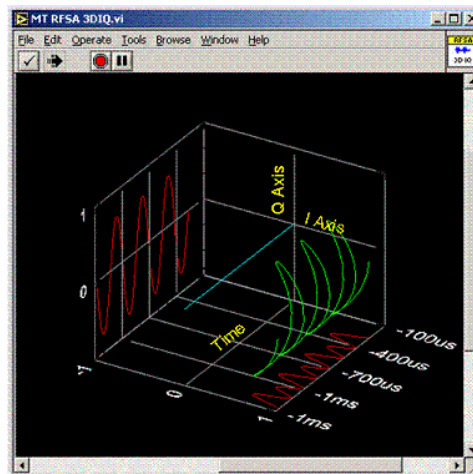


Figure 9.8 3D Representation of Phase Modulation (<http://www.ni.com/tutorial/4805/en/>)

Figure 9.8, shown in the LabVIEW 3D graph, shows the green trace varying in a sinusoidal fashion with respect to time. The projections onto the I and Q axes represent the individual I and Q waveforms corresponding to the PM sine wave with fixed magnitude and oscillating phase.

In essence, the I/Q data represents the message signal. Because the I/Q data waveforms are Cartesian translations of the polar amplitude and phase waveforms, you may have trouble determining the nature of the message signal. For example, compare the red I and Q traces on the 3D I vs. Q plots in Figure 9.8 to the green trace in Figure 9.8. If you plot amplitude vs. time for the AM sine wave, you would see the message signal. If you plot the phase data vs. time for the AM sine wave, you would have a straight line. You would see sine waves for the I vs. time and Q vs. time waveforms as well, but the scale would be off, and this would not necessarily be the case for more complex digital modulation schemes where both amplitude and phase are modulated simultaneously.

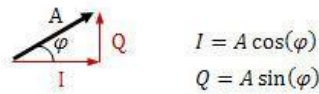
## So Why Use I/Q Data?

Because amplitude and phase data seem more intuitive, you might assume you should use polar amplitude and phase data instead of Cartesian I and Q data. However, practical hardware design concerns make I and Q data the better choice.

Precisely varying the phase of a high-frequency carrier sine wave in a hardware circuit according to an input message signal is difficult. A hardware signal modulator that manipulates the amplitude and phase of a carrier sine wave would therefore be expensive and difficult to design and build, and, as it turns out, not as flexible as a circuit that uses I and Q waveforms. To understand how to avoid manipulating the phase of an RF carrier directly, refer to the following I/Q modulation equations:

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos(\alpha) \cos(\beta) - \sin(\alpha) \sin(\beta)$$

$$A \cos(2\pi f_c t + \varphi) = A \cos(2\pi f_c t) \cos(\varphi) - A \sin(2\pi f_c t) \sin(\varphi)$$



$$A \cos(2\pi f_c t + \varphi) = I \cos(2\pi f_c t) - Q \sin(2\pi f_c t)$$

where  $I$  is the amplitude of the in-phase carrier  
 $Q$  is the amplitude of the quadrature-phase carrier

Figura 9.9 Mathematical Background of I/Q Modulation (<http://www.ni.com/tutorial/4805/en/>)

According to the trigonometric identity shown in the first line of Figure 9.9, multiply both sides of the equation by  $A$  and substitute  $2\pi f_c t$  in place of  $\alpha$  and  $\varphi$  in place of  $\beta$  to arrive at the equation shown in line 2. Then substitute  $I$  for  $A \cos(\varphi)$  and  $Q$  for  $A \sin(\varphi)$  to represent a sine wave with the equation shown on line 3.

Remember that the difference between a sine wave and a cosine wave of the same frequency is a 90-degree phase offset between them. Essentially, what this fact means is that you can control the amplitude, frequency, and phase of a modulating carrier sine wave by simply manipulating the amplitudes of separate  $I$  and  $Q$  input signals. With this method, you do not need to directly vary the phase of an RF carrier sine wave. You can achieve the same effect by manipulating the amplitudes of input  $I$  and  $Q$  signals. Of course, the second half of the equation is a sine wave and the first half is a cosine wave, so you must include a device in the hardware circuit to induce a 90-degree phase shift between the carrier signals used for the  $I$  and  $Q$  mixers, but this addition is a simpler design issue than the aforementioned direct phase manipulation.

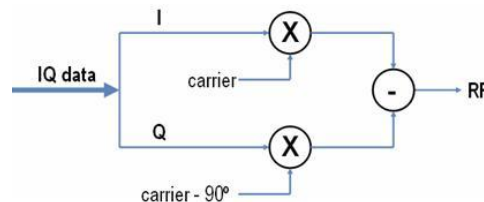


Figura 9.10 Hardware Diagram of an I/Q Modulator

Figure 9.10 shows a block diagram of an I/Q modulator. The circles with an 'X' represent mixers—devices that perform frequency multiplication and either upconvert or downconvert signals (upconverting here). The I/Q modulator mixes the  $I$  waveform with the RF carrier sine wave, and it mixes the  $Q$  signal with the same RF carrier sine wave at a 90-degree phase offset. The  $Q$  signal is subtracted from the  $I$  signal (just as in the equation shown in line 3 in Figure 9.9) producing the final RF modulated waveform. In fact, the 90-degree shift of the carrier is the source of the names for the  $I$  and  $Q$  data— $I$  refers to in-phase data (because the carrier is in phase) and  $Q$  refers to quadrature data (because the carrier is offset by 90 degrees). This technique is known as quadrature upconversion, and you can use the same I/Q modulator for any modulation scheme. The I/Q modulator is merely reacting to changes in  $I$  and  $Q$  waveform amplitudes, and  $I$  and  $Q$  data can represent any changes in

*magnitude and phase of a message signal. The flexibility and simplicity (relative to other options) of the design of an I/Q modulator is why it is so widely used and popular.»*

## **ANEXO D: Autorização da National Instruments**

Via email: 2162070@my.ipleiria.pt

Carlos Miguel da Silva Ferreira  
Rua do Lagar Velho, nº 4  
Cadavais  
3100-732 São Simão de Litém  
Portugal

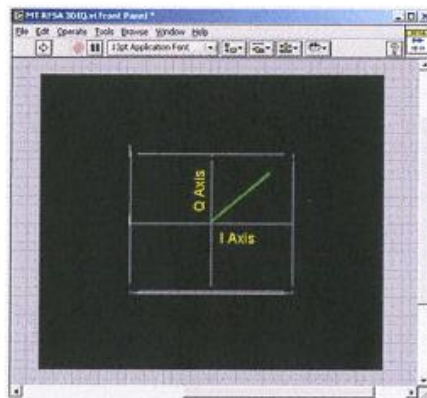
Re: Permission to Use Certain Copyrighted Materials of National Instruments Corporation ("NI")

Dear Mr. Ferreira:

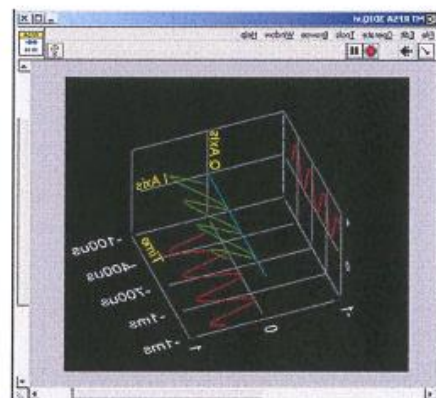
In response to your request to use certain copyrighted material of National Instruments Corporation ("NI"), by this letter, NI grants Carlos Miguel da Silva Ferreira ("Ferreira"), specifically as an individual, as a student of a master's degree in computer engineering at the School of Technology and Management of the Polytechnic Institute of Leiria, not as a representative of Polytechnic Institute of Leiria, or any other capacity thereof, the limited right to use and transcribe both certain NI product images and text contained in NI's White Paper entitled "What is I/Q Data?" (URL: <http://www.ni.com/tutorial/4805/en>), specifically Table of Contents items 1-3 (i.e., Table of Contents: 1. Background on Signals; 2. I/Q Data in Communication Systems; 3. So Why Use I/Q Data?) for incorporation into your dissertation entitled "Photograph and Scan Through Walls Using Wi-Fi."

The dissertation that will incorporate NI content that will be published in both, electronic and paper form. The dissertation in paper form will be available in the library *José Saramago* of the School of Technology and Management of the Polytechnic Institute of Leiria. The dissertation in electronic form will be available online at the following URL: <https://iconline.ipleiria.pt/>.

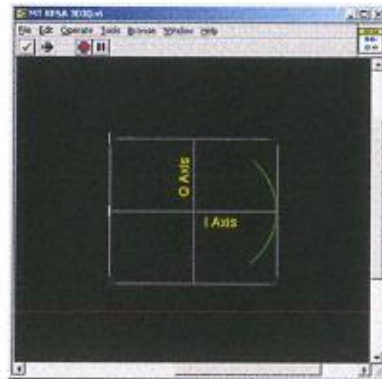
The images provided to Ferreira, appear below along with the respective file names:



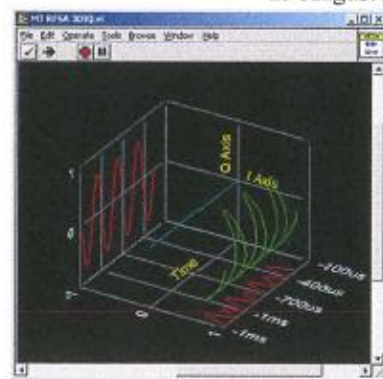
d1c38d1a1109.gif



d1c38d1a1110.gif



d1c38d1a1111.gif

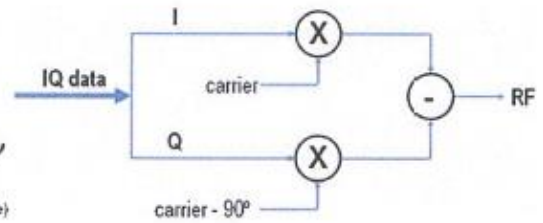


d1c38d1a1112.gif

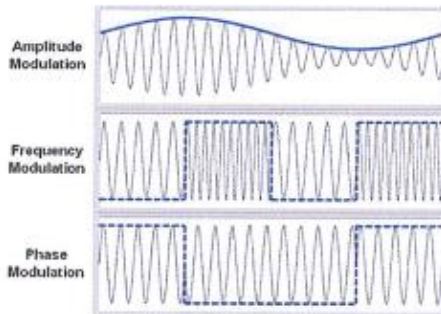
$$A_c \cos(2\pi f_c t + \phi)$$

Amplitude:  $A_c$   
 Frequency:  $f_c$   
 Phase:  $\phi$   
 Angle:  $(\text{Frequency} = \text{Rate of Change of Angle})$

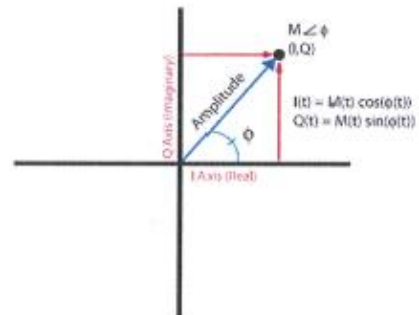
dhall\_2\_equation.JPG



dhall\_2\_modulator.JPG



dhall\_analog\_modulation.JPG



iq\_polarrep.gif



sine\_polarrep.gif

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos(\alpha) \cos(\beta) - \sin(\alpha) \sin(\beta)$$

$$A \cos(2\pi f_c t + \varphi) = A \cos(2\pi f_c t) \cos(\varphi) - A \sin(2\pi f_c t) \sin(\varphi)$$

$$I = A \cos(\varphi)$$

$$Q = A \sin(\varphi)$$

$$A \cos(2\pi f_c t + \varphi) = I \cos(2\pi f_c t) - Q \sin(2\pi f_c t)$$

where  $I$  is the amplitude of the in-phase carrier  
 $Q$  is the amplitude of the quadrature-phase carrier

trig\_equations.jpg

29 August 2018

1. You may use the NI Materials only for the purpose(s) described above (the "Purpose"). Please note that (unless expressly stated above in the Purpose) this is a one-time use right, and any additional uses by you will require the separate prior written authorization of NI.
2. Other than resizing the NI Materials as necessary for the Purpose, you may not revise, modify, or otherwise change the NI Materials in any manner without the prior written authorization of NI.
3. In no event may you use the NI Materials in a defamatory, libelous, or unlawful manner or in any manner that disparages NI.
4. You must retain all copyright and other proprietary notices of NI in the NI Materials.

Please note that your use right is non-exclusive and non-transferable. NI reserves all rights and licenses not expressly granted you in this letter.

**THE NI MATERIALS ARE PROVIDED "AS IS" WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND, AND NO WARRANTIES (EITHER EXPRESS OR IMPLIED) ARE MADE WITH RESPECT TO THE NI MATERIALS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, TITLE OR NON-INFRINGEMENT, OR ANY OTHER WARRANTIES THAT MAY ARISE FROM USAGE OF TRADE OR COURSE OF DEALING. YOU AGREE AND ACKNOWLEDGE THAT NI SHALL NOT BE LIABLE FOR ANY CLAIMS RESULTING FROM OR IN CONNECTION WITH ITS USE OF THE NI MATERIALS, AND YOU AGREE TO INDEMNIFY AND HOLD NI HARMLESS FROM ANY CLAIMS AGAINST OR EXPENSES OF NI ARISING OUT OF OR IN CONNECTION WITH ITS USE OF THE NI MATERIALS.**

Sincerely,  
Pete Smits



Sr. Intellectual Property Counsel  
National Instruments Corporation