



**Filipe Manuel  
Lourenço Duarte**

**Visible Light Indoor Positioning for Mobile Robots**

**Localização em Espaços Interiores por Luz Visível  
para Robôs Móveis**







**Filipe Manuel  
Lourenço Duarte**

## **Visible Light Indoor Positioning for Mobile Robots**

### **Localização em Espaços Interiores por Luz Visível para Robôs Móveis**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica de Luís Filipe Mesquita Nero Moreira Alves, Professor Auxiliar do Departamento Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro, e do Professor Doutor Pedro Nicolau Faria da Fonseca, Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro.



**o júri / the jury**

presidente / president

**Professor Doutor Manuel Bernardo Salvador Cunha**

Professor auxiliar da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

**Professor Doutor Luís Manuel de Sousa Pessoa**

Investigador Sénior da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
(arguente)

**Professor Doutor Luís Filipe Mesquita Nero Moreira Alves**

Professor auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)



## agradecimentos

É com muito gosto que aproveito esta oportunidade para agradecer a todos os que tiveram presente de algum modo durante estes anos (fisicamente ou psicologicamente).

Esta Dissertação de Mestrado de Engenharia Eletrónica e Telecomunicações foi possível ser realizada graças à amabilidade e disponibilidade de várias pessoas, as quais manifesto os meus sinceros e reconhecidos agradecimentos, em particular ao Dr. Prof. Luís Nero e ao Dr. Prof. Pedro Fonseca, a quem devo a orientação da mesma.

Um agradecimento especial aos parceiros (amigos) de laboratório que se tornaram fatores importantes durante essa dissertação, os quais passo a citar: Pedro Rodrigues, André Nobre, Miguel Bergano, Nuno Lourenço, Pedro Vilas-Boas, Luís Duarte e Luís Rodrigues pela paciência, apoio, convívio e discussão de ideias.

Devo ainda à Universidade de Aveiro um agradecimento especial, pelo acolhimento durante estes anos, e ao Instituto de Telecomunicações pelos recursos liberados e pelo apoio financeiro na elaboração do projeto.

*Como não existe espaço nesta obra para enunciar todos os nomes dos mais próximos, agradeço-lhes do fundo do coração com um abraço.*

*E queria agradecer a um grande amigo, o José Oliveira, que esteve presente durante o meu percurso académico mas que infelizmente não o viu terminar.*



## Resumo

Esta dissertação investiga a localização em espaços interiores através da comunicação por luz visível para robôs móveis, com base nos LEDs fixos nos edifícios, dando particular atenção à simulação e desenho do sensor, com vista ao desenvolvimento de um sensor de localização.

Explica-se o crescimento da tecnologia LED e da constante necessidade de localização do homem em espaços interiores. Apresentado algumas características do LED e dos foto-detetores existentes. Com uma breve referencia a algumas das comunicações por luz visível de baixo débito possíveis de implementar.

O desenvolvimento do protótipo do sensor inicia-se, principalmente, pela simulação de alguns dispositivos essenciais e das suas características, como o emissor LED no controlo do ângulo de meia potência (HPA) e a altura a que se encontra, e no recetor foto-díodo e a sua restrição de campo de visão (FOV). Simula-se o sensor pretendido com o número de foto-díodos necessários otimizando o espaço físico disponível e fazendo não só um refinamento no FOV mas também na distribuição espacial dos foto-díodos com funções predefinidas para a redução de incertezas de decisão de localização do robô. Estes resultados permitiram a construção física do sensor, desde o suporte para os foto-díodos, tendo em conta todas as medidas durante as simulações, e terminando com o desenvolvimento dos sensores e a sua integração completa.

O tratamento de dados da leitura dos sinais recebidos do sensor são tratados por um microcontrolador, permitindo calcular parâmetros fundamentais no cálculo da posição.

No final, os resultados teóricos bem como os práticos obtidos ao longo do desenvolvimento e possíveis propostas para trabalhos futuros que beneficiam desta investigação





## Abstract

This dissertation investigates indoor localization through visible light communication for mobile robots, based on *Light Emitting Diode* (LED)s fixed on buildings, giving particular focus to sensor's design and simulation, with the goal of developing a localization sensor.

Its explains the growth of LED technology and the constant need of location of man in indoor spaces. Presenting some LED character and existent photodetector features. With a brief overview of the low debit *Visible Light Communication* (VLC) architectures.

The sensor's prototype development begins, mainly, by the simulation of some essential device and its features like the control of *Half Power Angle* (HPA) by the emitter LED and its height and also the *Field Of View* (FOV) restriction by the receiver photodiode. The target sensor is simulated with the necessary number of photodiodes optimizing the physical area available and its made a refinement not only in FOV but also in spacial distribution of the photodiodes with predefined functions to reduce localization uncertainty within robot's decision. This procedure allows the uncertainty reduction associated with the robot's positioning decision and delivers the global field of view integration of all the photodiodes. The results allowed the physical construction of the sensor, starting with the photodiodes support structure, taking into account all the measures collected during simulation, and finishing with the sensors development and its full integration.

The data treatment of the received signals by the sensor is done by a microcontroller, granting the position calculation using fundamental parameters operations.

In the end, the theoretical as well as the practical results obtained are presented and also possible future projects that can bennefit from this investigation.



**Dedicatória**

Dedico esta dissertação aos meus pais, Manuel de Almeida Duarte e Maria Francelina da Rocha Lourenço pelo esforço e apoio incondicional que me dedicaram ao longo deste árduo percurso.



# Índice

<b>Índice</b>	<b>i</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>v</b>
<b>Índice de Tabelas</b>	<b>vii</b>
<b>Acrónimos</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento do trabalho . . . . .	2
1.2 Objetivos . . . . .	3
1.3 Motivação . . . . .	4
1.4 Contribuições do trabalho . . . . .	4
1.5 Estrutura do documento . . . . .	5
<b>2 Sistemas de localização no espectro visível</b>	<b>7</b>
2.1 Breve história da localização . . . . .	8
2.2 Algoritmos de localização . . . . .	10
2.2.1 Triangulação . . . . .	10
2.2.2 Trilateração . . . . .	11
2.2.3 Multilateração . . . . .	12
2.3 Sistemas de localização em espaços interiores por luz visível . . . . .	13
2.3.1 Importância e contexto atual . . . . .	14
2.3.2 Tecnologias atuais e suas limitações . . . . .	14
2.3.3 Oportunidades do uso de sistemas de iluminação . . . . .	17
2.4 Iluminação de interiores por LED . . . . .	18
2.4.1 Tendência de mercado . . . . .	18
2.4.2 Características do LED . . . . .	20
2.5 Circuitos foto-detetores . . . . .	22
2.5.1 Dispositivos de foto-deteção . . . . .	23
2.5.2 Arquitetura restritiva do campo de visão . . . . .	25
2.5.3 Modos de operação do foto-díodo . . . . .	26
2.5.4 Topologias de amplificação ótica . . . . .	28

2.6	Comunicação por luz visível de baixo débito . . . . .	30
2.6.1	Atribuição de palavras codificadas às luminárias . . . . .	30
2.6.2	Associação de frequências variadas por luminária . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Projeto do sensor de localização</b>	<b>31</b>
3.1	Características do emissor e recetor . . . . .	32
3.1.1	Emissor LED . . . . .	34
3.1.2	Recetor foto-díodo . . . . .	36
3.2	Requisitos do modelo do sensor . . . . .	36
3.3	Manipulação do campo de visão do foto-díodo . . . . .	38
3.4	Simulação do sensor . . . . .	38
3.4.1	Emissor e recetor . . . . .	39
3.4.2	Distribuição espacial dos foto-díodos . . . . .	41
3.4.3	Simulação em três dimensões do sensor . . . . .	50
3.5	Considerações sobre o planeamento e simulação do sensor . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Protótipo do sensor de localização</b>	<b>53</b>
4.1	Circuito de emissão auxiliar . . . . .	54
4.1.1	Princípio de funcionamento e esquema elétrico . . . . .	54
4.2	Circuito elétrico do sensor . . . . .	56
4.2.1	Princípio de funcionamento e esquema elétrico . . . . .	56
4.2.2	Circuito de receção . . . . .	56
4.3	Desenvolvimento da estrutura do sensor e a integração dos recetores . . . . .	59
4.4	Considerações dos protótipos finais . . . . .	61
<b>5</b>	<b>Resultados e Análise</b>	<b>63</b>
5.1	Descrição do ambiente experimental de teste . . . . .	64
5.2	Resultados . . . . .	64
5.2.1	Considerações finais . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Conclusões e trabalhos futuros</b>	<b>71</b>
6.1	Conclusões do trabalho . . . . .	72
6.2	Perspetivas de desenvolvimento futuro . . . . .	72
	<b>Bibliografia</b>	<b>73</b>
<b>A</b>	<b>Resultados da simulação do <math>FOV_a</math> e ganho <math>a</math> dos foto-díodos</b>	<b>76</b>
<b>B</b>	<b>PCBs dos circuito</b>	<b>80</b>
B.1	Emissor . . . . .	80
B.2	Recetor . . . . .	81
<b>C</b>	<b>Sensor desenvolvido</b>	<b>82</b>

<b>D</b>	<b>Código de leitura do microcontrolador</b>	<b>83</b>
D.1	<i>globalFunction.h</i> . . . . .	83
D.2	<i>globalFunction.c</i> . . . . .	84
D.3	<i>uart_control.h</i> . . . . .	93
D.4	<i>uart_control.c</i> . . . . .	94





# Índice de Figuras

1.1	Princípio de funcionamento geral do agregado dos projetos . . . . .	3
2.1	Orientação pelas estrelas. . . . .	9
2.2	Mapa náutico . . . . .	10
2.3	Teorema de Pitágoras. . . . .	11
2.4	Trilateração. . . . .	12
2.5	Multilateração. . . . .	13
2.6	Eficiência das luminárias. . . . .	14
2.7	Redes de <i>Bluetooth</i> . . . . .	16
2.8	Sistema RFID. . . . .	16
2.9	Gama espectral. . . . .	17
2.10	História da evolução da eficiência das luminárias. . . . .	19
2.11	Lei de Roland Haitz. . . . .	20
2.12	Distribuição espectral relativa. . . . .	21
2.13	Princípio de funcionamento do LED. . . . .	22
2.14	Curva característica da corrente tensão do foto-detetor e díodo. . . . .	23
2.15	Símbolo foto-díodo. . . . .	23
2.16	Símbolo foto-transístor. . . . .	24
2.17	Sensor de abertura de porta . . . . .	25
2.18	Foto-detetor. . . . .	26
2.19	Modelo físico do foto-díodo. . . . .	26
2.20	Modo de operação fotovoltaico. . . . .	27
2.21	Modo de operação fotocondutivo. . . . .	28
2.22	Amplificador ótico de transimpedância. . . . .	29
2.23	Filtragem da componente DC. . . . .	29
3.1	Esquema do planeamento da execução do sensor de localização. . . . .	32
3.2	Sistema representativo das coordenadas cartesianas e esféricas. . . . .	33
3.3	Superfície de intensidade de radiação <i>Lambertiana</i> de um emissor. . . . .	35
3.4	Diagrama de radiação <i>Lambertiana</i> para várias ordens de diretividade $n$ . . . . .	35
3.5	Superfície cônica que delimita o campo de visão do recetor. . . . .	36
3.6	Configurações possíveis para o sensor. . . . .	36
3.7	Controlo do FOV <sub>r</sub> restritivo do foto-díodo. . . . .	38

3.8	Cenário de simulação do $FOV_a$ e HPA. . . . .	40
3.9	Variação do $FOV_a$ do foto-díodo. . . . .	40
3.10	Variação do HPA do LED. . . . .	41
3.11	Disposição do último foto-díodo. . . . .	42
3.12	Perfil lateral do sensor. . . . .	43
3.13	Potência normalizada da integração dos foto-díodos. . . . .	44
3.14	Cenário de simulação do número de foto-díodos $N_f$ . . . . .	45
3.15	Ângulo calculado e teórico, $FOV = 9^\circ$ $N_f = 10$ . . . . .	46
3.16	Incerteza entre ângulo calculado e o teórico. . . . .	46
3.17	Erro provocado pela incerteza do ângulo calculado. . . . .	47
3.18	Distribuição da progressão dos foto-díodos. . . . .	48
3.19	Distribuição da progressão do foto-díodos. . . . .	49
3.20	Campo de visão e alcance do sensor em três dimensões. . . . .	50
3.21	Simulação do erro espacial do sensor. . . . .	51
3.22	Gráfico do erro da posição provocado pela incerteza do ângulo calculado. . . . .	52
4.1	Circuito emissor de teste. . . . .	54
4.2	Aspeto físico do circuito emissor de teste. . . . .	55
4.3	Esquema geral do circuito recetor do sensor de localização. . . . .	56
4.4	Circuito de receção de um foto-díodo. . . . .	57
4.5	Aspeto físico do circuito recetor do foto-díodo. . . . .	59
4.6	Protótipo da estrutura do sensor. . . . .	59
4.7	Fragmentação da estrutura do arco. . . . .	60
4.8	Sensor de localização em espaços interiores desenvolvido. . . . .	61
5.1	Cenário de teste do sensor no mundo real. . . . .	64
5.2	Curva de sinal recebido pelos foto-díodos do sensor. . . . .	65
5.3	Resultado comparativo entre ângulo teórico e calculado. . . . .	66
5.4	Sinal recebido dos 8 foto-díodos. . . . .	67
5.5	Fluxo grama do cálculo da frequência. . . . .	68
A.1	Simulação da distribuição Linear crescente dos foto-díodos. . . . .	76
A.2	Simulação da distribuição Linear decrescente dos foto-díodos. . . . .	77
A.3	Simulação da distribuição Inversa crescente dos foto-díodos. . . . .	77
A.4	Simulação da distribuição Inversa decrescente dos foto-díodos. . . . .	78
A.5	Simulação da distribuição Neperiana crescente dos foto-díodos. . . . .	78
A.6	Simulação da distribuição Neperiana decrescente dos foto-díodos. . . . .	79
B.1	PCB do emissor. . . . .	80
B.2	PCB do recetor. . . . .	81
C.1	Perspetivas do sensor desenvolvido. . . . .	82

# Índice de Tabelas

2.1	Classes de alcance por <i>Bluetooth</i> . . . . .	15
2.2	Comparação das tecnologias. . . . .	18
2.3	Tabela comparativa dos foto-díodos. . . . .	24
2.4	Tabela comparativa dos foto-transístores. . . . .	24
3.1	Características do sensores. . . . .	37
3.2	Parâmetros de simulação. . . . .	39
3.3	Parâmetros de simulação na determinação do ângulo calculado e teórico. . . . .	45
3.4	Resultados obtidos das funções usadas nas varias progressões simuladas. . . . .	48
3.5	Resultados da melhor configuração dos foto-díodos. . . . .	49
4.1	Componentes usados na construção do emissor. . . . .	55
4.2	Componentes usados no circuito recetor de um foto-díodo. . . . .	58
4.3	Ângulos teóricos e práticos do arco. . . . .	60



# Acrónimos

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> <b>Conversor Analógico Digital</b>
CFL	<i>Compact Fluorescent Lamps</i> <b>Lâmpadas Fluorescentes Compactas</b>
DC	<i>Direct Current</i> <b>Corrente Contínua</b>
DETI	<i>Department of Electronics, Telecommunications and Informatics</i> <b>Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática</b>
EM	<i>Electromagnetic</i> <b>Eletromagnetismo</b>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> <b>Transformada rápida de Fourier</b>
FOV	<i>Field Of View</i> <b>Campo de Visão</b>
GND	<i>Ground</i> <b>Terra</b>
GPS	<i>Global Positioning System</i> <b>Sistema de Posicionamento Global</b>
HPA	<i>Half Power Angle</i> <b>Ângulo de Média Potência</b>
I/O	<i>Input/Output</i> <b>Entrada/Saída</b>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> <b>Instituto de Engenheiros Eletrotécnicos e Eletrónicos</b>
IPS	<i>Indoor Positioning System</i> <b>Sistema em Espaços Interiores</b>
ISM	<i>Industrial, Scientific, Medical</i> <b>Industrial, Científico, Médico</b>

<b>LED</b>	<i>Light Emitting Diode</i> <b>Díodo Emissor de Luz</b>
<b>MOSFET</b>	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> <b>Transístor de Efeito de Campo Metal Óxido Semicondutor</b>
<b>OPA</b>	<i>Operational Amplifier</i> <b>Amplificador Operacional</b>
<b>PC</b>	<i>Personal Computer</i> <b>Computador Pessoal</b>
<b>PCB</b>	<i>Printed Circuit Board</i> <b>Circuito Impresso</b>
<b>PIC32</b>	<i>Programmable Interface Controller 32 bits</i> <b>Controlador de Interface Programável de 32 bits</b>
<b>RF</b>	<i>Radio Frequency</i> <b>Frequência de Rádio</b>
<b>RFID</b>	<i>Radio Frequency IDentification</i> <b>Identificação por Rádio Frequência</b>
<b>RGB</b>	<i>Red Green Blue</i> <b>Vermelho Verde Azul</b>
<b>SSL</b>	<i>Solid State Lighting</i> <b>Iluminação em Estado Sólido</b>
<b>TED</b>	<i>Technology, Entertainment, Design</i> <b>Tecnologia, Entretenimento, Projetos</b>
<b>UART</b>	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> <b>Recetor/Transmissor Assíncrono Universal</b>
<b>VLC</b>	<i>Visible Light Communication</i> <b>Comunicação por Luz Visível</b>
<b>Wi-Fi</b>	<i>Wireless Fidelity</i> <b>Fidelidade Sem Fio</b>
<b>WLAN</b>	<i>Wireless Local Area Network</i> <b>Rede Local Sem Fio</b>

# Capítulo 1

## Introdução

*”Em toda a obra de criação há um fio condutor, nem sempre facilmente discernível, que lhe dá unidade - um fio discreto ou evidente, da maior importância, pois é um dos sinais da sua autenticidade.” - Eugénio de Andrade*

### *Sumário*

*A procura de formas de localização é um problema antigo, com configurações diferentes no mundo contemporâneo. As soluções para este problema continuam ainda um tópico de investigação. Nesta dissertação, expõe-se uma solução possível para o problema de localização em espaços interiores. Neste capítulo é feita a introdução do tema que será abordado ao longo desta dissertação e os objetivos pretendidos com este trabalho. Por fim, apresentam-se as contribuições e a estrutura do documento.*

A deslocação, que é a ação de se mover de um ponto geográfico para outro, é proveniente da natureza de qualquer ser vivo. Desde a sua existência que o Homem precisou sempre de se mover e, agora mais que nunca, existe a necessidade de saber a sua posição geográfica, não só para conhecer a sua localização mas também para diminuir o seu tempo de deslocamento. Estas premissas têm sido alvo de um crescente interesse por parte de vários investigadores.

Pode-se igualmente afirmar que o ser vivo tem necessidade da luz para sobreviver. Tornou-se inconcebível na rotina diária de todos nós a ausência de iluminação artificial. Os avanços nesta área de investigação revolucionaram por completo o modo de vida humano em todos os aspetos, melhorando a qualidade de vida, com implicações em várias áreas.

Das necessidades mencionadas anteriormente, o uso intensivo de luminárias cresceu exponencialmente, com consequências o consumo energético. Contudo, a procura por soluções de melhor rendimento energético e a qualidade das luminárias impulsionaram o aparecimento de novas tecnologias, o LED.

Face às vantagens do LED: a eficiência; o fácil controlo luminoso; a nível de custos mais económico, a durabilidade e baixo custo de manutenção nas áreas em uso. Devido ao seu uso intensivo neste últimos anos, lançou o aparecimento de novas oportunidades. Esta possibilidade assenta em características diferenciadoras dos dispositivos tradicionais, como a luz fluorescente e a incandescente, traduzindo-se numa fácil modulação e envio de informação. Tornando adequado o envio de informação relativa a localização de cada fonte luminosa, e com ajuda de algoritmos de triangulação, abre-se a possibilidade de localizar a posição em espaços interiores.

Desta forma, irá ser estudado e demonstrado o conceito pretendido de localização em espaços interiores por luz visível.

## 1.1 Enquadramento do trabalho

Esta dissertação enquadra-se num projeto de localização em espaços interiores para robôs móveis a partir da luz visível presente nos edifícios e envolve dois alunos da Universidade de Aveiro de Engenharia Eletrónica e Telecomunicações. Estes dois elementos procuraram estudar e desenvolver este projeto, um na parte do desenvolvimento do emissor e outro no desenvolvimento do sensor de localização em espaços interiores para robôs móveis.

A figura 1.1 apresenta o princípio de funcionamento geral que se pretende no final e também uma visualização do que consiste o agregado dos projetos.



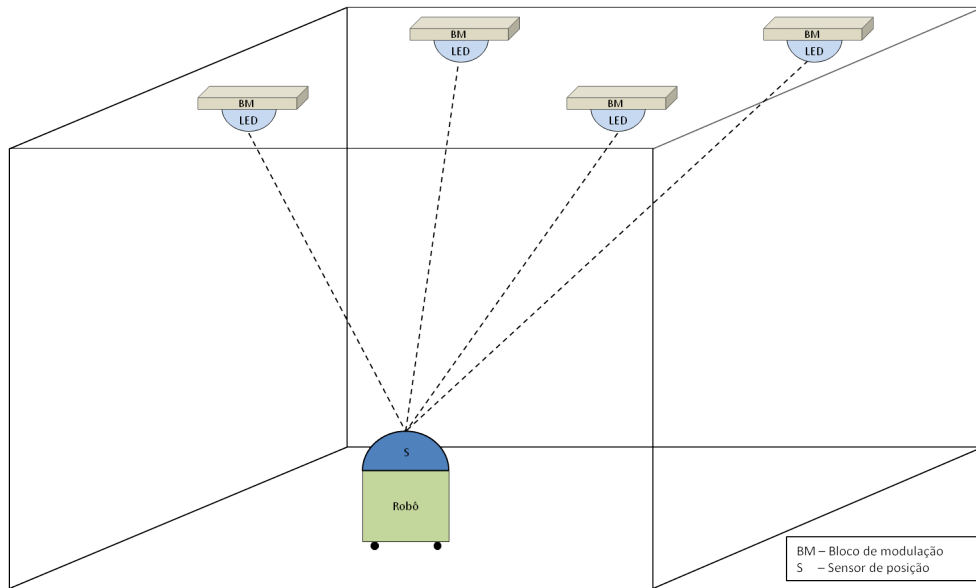


Figura 1.1: Princípio de funcionamento geral do agregado dos projetos.

Portanto, o projeto abrange duas vertentes nas quais, o desenvolvimento de um bloco emissor adaptável a luminárias já existentes nos edifícios e o estudo e criação de um sensor adaptável para robôs móveis para localização de interiores. No entanto, esta dissertação focar-se-á essencialmente na parte do recetor mas com alguns conceitos auxiliares do emissor para a sua realização.

## 1.2 Objetivos

Os objetivos principais desta dissertação determinam-se pelo estudo e simulação do sensor a desenvolver para localização em espaços interiores para robôs móveis. De forma mais detalhada e resumida, o trabalho realizado nessa proposta focar-se-á nos seguintes pontos:

- Estudo de soluções para a navegação em espaços interiores de robôs móveis baseado em VLC iluminação domésticas/escritórios;
- Estudo da obtenção de dados de localização (medição da potência/energia do sinal recebido, medição do ângulo de receção de feixe de luz), codificação da fonte, identificação e localização;
- Estudo da construção do sensor a desenvolver para melhor obtenção de informação necessária para localização;
- Desenvolvimento do sensor elétrico de receção e o respetivo suporte para o sensor;

- Testes comparativos ao estudo/simulação elaborado na obtenção dos dados de localização;
- Testes de recolha de informação (medição da força do sinal recebido, medição do ângulo de receção de feixe de luz);

## 1.3 Motivação

Desde 2008 que se registam investigações na Universidade de Aveiro e o Instituto de Telecomunicações, uma parceria que envolve alunos e investigadores em projetos sobre VLC[1]. Ao longo destes anos, o estudo aprofundado sobre VLC ajudou na criação de protótipos, unidirecionais e bidirecionais<sup>1</sup>. Esta possibilidade veio ao encontro da necessidade humana de localização, surgindo este projeto como forma de elaboração de um sensor de localização em espaços interiores.

O vasto crescimento do uso de LEDs tornou-se cada vez mais popular em inúmeras áreas, sendo indispensável em residências, em espaços urbanos, em supermercados, na indústria e no setor automóvel. Esta popularidade deve-se sobretudo à eficiência energética e com adição de transmissão de dados na modulação da luz sem a perceção do olho humano.

Numa altura em que se considerava que o *Global Positioning System* (GPS) como a tecnologia padrão de localização e navegação, concluiu-se que não era suficiente quando se tratava de localização em espaços interiores, uma vez que o sinal não conseguia transpor a barreira das paredes.

Tirando partido da dupla funcionalidade dos LEDs e com desvantagem do GPS para localização de interiores, surgiu a oportunidade de se fazer comunicação por luz visível para localização em espaços interiores, com a colocação de faróis de identificação nas fontes luminárias, para envio de dados úteis na orientação dos robôs móveis.

## 1.4 Contribuições do trabalho

A pesquisa e simulação do sensor a desenvolver para esta dissertação contribuiu-se na apresentação de um poster.

Foi feita a apresentação dos protótipos, convidando alunos, professores e comunidade empresarial envolvente, enquadrada no evento *Students Day*, do *Department of Electronics, Telecommunications and Informatics* (DETI)[2]. Esta apresentação incluiu ainda duas dissertações do mesmo âmbito.

Para alguns mais curiosos e interessados foi feita uma explicação mais detalhada do projeto.

---

<sup>1</sup>Broadcast, Multicast e Unicast.

## 1.5 Estrutura do documento

O presente documento encontra-se fragmentado nos seguintes capítulos:

- O capítulo 2 apresenta uma breve história sobre a localização, a iluminação e dos seus intervenientes. Em que são descritos alguns sistemas de localização em espaços interiores. Como algumas configurações de circuitos foto-detetores e um registo sobre comunicações por luz visível.
- O capítulo 3 apresenta os requisitos necessários para simulação dos emissores (LEDs) e recetores (foto-díodos) e também o dimensionamento do sensor e sua configuração final. Incluindo o estudo sobre a disposição e controlo do FOV dos foto-díodos.
- O capítulo 4 enuncia os passos necessários para o desenvolvimento do sensor de localização em espaços interiores.
- O capítulo 5 mostra os resultados obtidos do sensor desenvolvido e a sua comparação com os resultados simulados no capítulo 3.
- O capítulo 6 tiram-se algumas conclusões do trabalho realizado durante a dissertação e traçam-se alguns linhas de orientação para trabalhos futuros.



## Capítulo 2

# Sistemas de localização no espectro visível

*”As pessoas não serão capazes de olhar para a posteridade, se não tiverem em consideração a experiência dos seus antepassados.” - Edmund Burke*

### *Sumário*

*Neste capítulo será abordada de uma forma breve, a história sobre a localização, a iluminação e dos seus intervenientes. Seguidamente, serão descritos alguns sistemas de localização em espaços interiores, como a de iluminação e a sua tendência. Focar-se-ão alguns circuitos de foto-deteção, os seus modos de operação e restrições do seu campo de visão. No final, fica um registo sobre comunicação por luz visível.*

Desde os tempos mais antigos, os sinais luminosos eram representativos de perigo, mas também se referiam a informação e a localização. Exemplo disto são os sinais de fumo que se estabeleciam entre membros de uma tribo ou reflexos luminosos através de espelhos de cobre, em outras culturas[3]. Em paralelo, no nosso quotidiano, o uso de luzes de presença nos automóveis permitem aos outros automobilistas a identificação e percepção da distância entre veículos.

Apesar da abordagem de tópicos ser distinta, a agregação destes sistemas é agora possível através da localização e comunicação por luz visível.

Nestes últimos anos, os sistemas de localização e os sistemas comunicação por luz visível tornaram-se áreas de grande interesse de investigação. Tal interesse deve-se à constante evolução da tecnologia e da crescente exigência da sociedade ao acesso à informação mais rápida e fiável, abrindo portas para uma nova categoria dentro dos sistemas de localização em espaços interiores. Sistemas de localização no espectro visível visam resolver, de um modo qualitativo, rápido e preciso, a determinação de locais num certo espaço geográfico bem definido. Esse envio da informação necessária da localização de objetos e/ou até mesmo pessoas, é feito através do controlo luminoso das fontes luminárias presentes no local.

De uma forma mais específica, no que toca à localização em espaços interiores pretende-se conhecer, monitorizar e alcançar locais remotos. No processamento dessa informação métodos de algoritmos matemáticos são usados. Algumas das metodologias mais usadas são a triangulação, a trilateração e multilateração que serão posteriormente faladas.

Esta informação pode ser retirada dos LEDs usados para iluminação, presente nos edifícios. A sua crescente utilização, em detrimento das tecnologias mais tradicionais, deriva das suas elevadas potencialidades. A sua eficiência, durabilidade e controlabilidade são alguns dos mais importantes desenvolvimentos. O LED pertence à categoria de dispositivos *Solid State Lighting* (SSL). O facto de se basear em ligações semicondutores, com manipulação controlada do fluxo luminoso, permite o envio de informação a uma elevada frequência, sem ser perceptível ao olho humano.

## 2.1 Breve história da localização

Desde sempre que o Homem sentiu necessidade de se localizar, definir um caminho e seguir uma orientação. Tal orientação começou por ser feita através de vários mecanismos de auxílio, tendo em conta pontos intermediários de referência: a rosa dos ventos, com indicação dos pontos cardeais; as estrelas, para indicar um ponto de referência numa noite de céu limpo, como se ilustra na figura 2.1, entre outros exemplos.



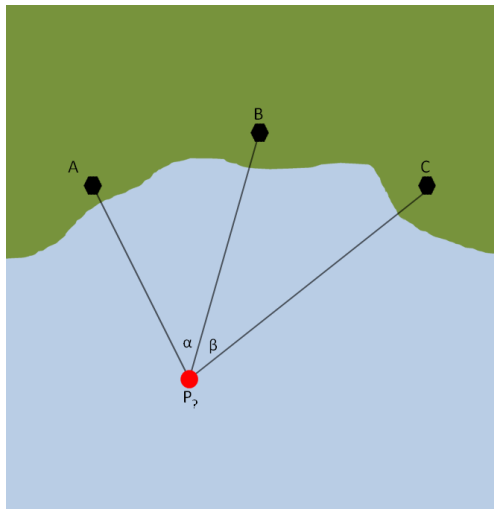
Figura 2.1: Orientação pelas estrelas[4].

No século XVI, duas grandes mentes surgiram para fazer história na área da Topografia<sup>1</sup> e da Navegação<sup>2</sup>. Separados por alguns anos, o holandês Willebrord Snellius (1581-1626) e o francês Laurent Pothenot (1650-1732) foram os primeiros a formular e resolver o problema conhecido pelo *problema de Pothenot*: a partir de três pontos A, B, e C conhecidos e suas orientações, determinar o ponto P desconhecido. A resolução deste problema, contribuiu para o desenvolvimento na área da topografia e navegação costeira[5].

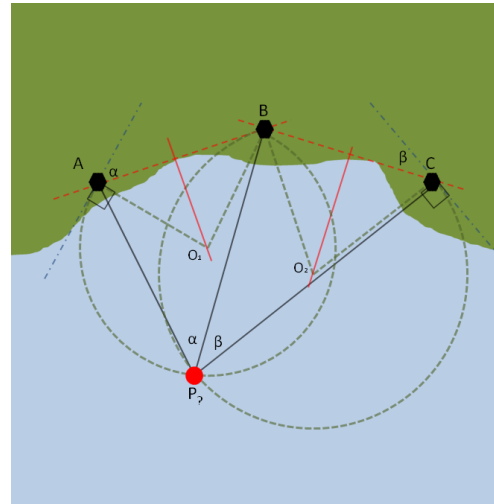
O problema consiste na recolha de dois ângulos calculados a partir do ponto P. Cada ângulo é formado pelo encontro de duas semi-retas, onde  $\alpha$  e  $\beta$  são formados respectivamente pelo conjunto  $(\overline{AP}, \overline{BP})$  e  $(\overline{BP}, \overline{CP})$  de retas (figura 2.2(a)). Ângulos que permitem traçar duas circunferências numa carta náutica, como se visualiza na figura 2.2(b), com o recurso de cálculos trigonométricos. A interseção dessas circunferências é determinada pelos pontos B e P que pertencem a ambas curvas.

<sup>1</sup>Área que pretende representar a configuração de um terreno.

<sup>2</sup>Ciência de planejar e executar uma viagem de um ponto para outro.



(a) Mapa náutico dos ângulos necessários para a determinação da posição.



(b) Mapa náutico dos cálculos trigonométricos necessários para a determinação da posição

Figura 2.2: Mapa náutico

## 2.2 Algoritmos de localização

Nesta secção serão apresentados alguns dos algoritmos matemáticos (triangulação, trilateração e multilateração) na obtenção de pontos, com recurso a ângulos, a distâncias e tempos conhecidos.

### 2.2.1 Triangulação

É um algoritmo matemático que pretende determinar pontos desconhecidos com o recurso a ângulos e distâncias conhecidas. Este algoritmo foi beneficiado por uma das grandes relações provadas pelo filósofo e matemático grego Pitágoras (570 a.C a 496 a.C ou 497 a.C): a relação matemática entre os comprimentos dos lados de qualquer triângulo retângulo é dada pelo quadrado do comprimento da hipotenusa que é igual à soma dos quadrados dos comprimentos dos catetos, equacionada pela equação 2.2,

$$A^2 = B^2 + C^2 \tag{2.1}$$

visível na figura 2.3.



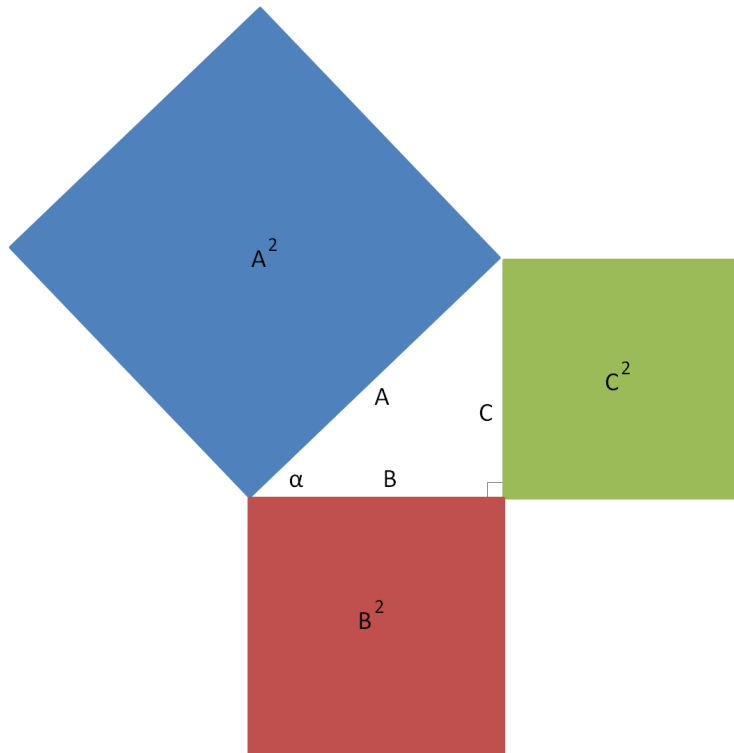


Figura 2.3: Teorema de Pitágoras.

Onde:  $A$  representa o comprimento da hipotenusa,  $B$  e  $C$  os comprimentos dos lados do triângulo e  $\alpha$  o ângulo entre a hipotenusa  $A$  e o cateto  $B$ . Face ao teorema provado, foi possível determinar distâncias/posições relativamente a essa propriedade que pode estender-se para qualquer tipo de triângulo, expressa pela seguinte equação.

$$C^2 = B^2 + A^2 - 2BA \cos(\alpha) \quad (2.2)$$

### 2.2.2 Trilateração

Trilateração é um método utilizado para determinar a posição de alguns objetos/pessoas baseado em distâncias de três pontos conhecidos. É usado frequentemente em vastas áreas de localização, designadamente na robótica, na aeronáutica, na cristalografia e na computação gráfica. Pode ser determinada pela intersecção das esferas  $L_1$ ,  $L_2$  e  $L_3$ , identificadas por três pontos. A solução da intersecção das três esferas são dois pontos sobre uma linha reta, embora não seja uma referência para todos os casos. Por exemplo na localização em espaços interiores existindo pelo menos três emissores no teto fixo e um recetor no solo, partindo-se do princípio que só existe uma solução. Pode-se, no entanto, transformar as esferas para circunferências como se ilustra na figura 2.4[6, 7, 8].

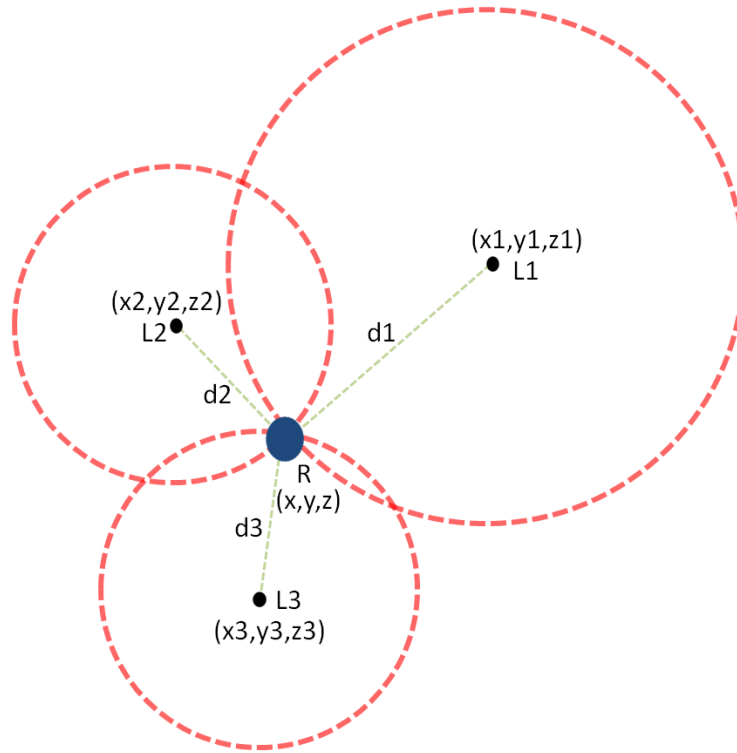


Figura 2.4: Trilateração.

O sistema pode ser expresso pelas equações 2.3. Onde cada ponto pode ser identificado por três coordenadas, abscissa  $x_i$ , ordenada  $y_i$  e cota  $z_i$ . Sendo o  $i$  a referência de cada circunferência. O raio de cada circunferência é identificado por  $d_i$ . Resolvendo o sistema em ordem a  $x$ ,  $y$  e  $z$  é possível calcular a posição  $R$ .

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = d_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = d_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = d_3^2 \end{cases} \quad (2.3)$$

Assim, pretende-se conhecer as coordenadas do ponto  $R$  ( $x, y, z$ ) como se ilustra na figura acima.

### 2.2.3 Multilateração

Conhecida também por posicionamento hiperboloide, a multilateração é técnica usada no cálculo do tempo de chegada entre dois receptores. Conhecendo o ponto no centro de uma hiperboloide de duas folhas, e com ajuda de um terceiro ponto, determina-se a posição espacial do objeto[9]. Este sistema tem servido sobretudo na localização aeronáutica, permitindo a um avião comunicar com as estações de rádio mais próximas através do cálculo do tempo de resposta entre elas e, assim, determinar a posição do avião[10]. Esta

posição do avião corresponde à interseção das superfícies hiperbólicas. A figura 2.5 ilustra as formas das superfícies hiperbólicas.

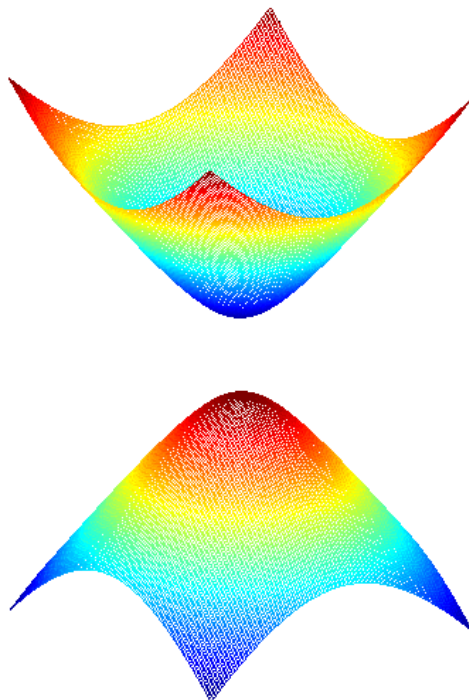


Figura 2.5: Multilateração.

Existem, contudo, alguns inconvenientes na multilateração, destacando-se o facto de terem de existir pelo menos quatro recetores para ser determinada a posição do emissor, neste caso o avião, como se referiu anteriormente. O problema recai, assim, na localização estratégica dos recetores.

## 2.3 Sistemas de localização em espaços interiores por luz visível

Sistemas de localização em espaços interiores por luz visível são dispositivos adaptáveis às luminárias existentes nos edifícios com o intuito de fornecer informação necessária para localização em espaços interiores. Nos seguintes subcapítulos falar-se-á da importância do aparecimento da VLC e da simbiose das suas capacidades.

### 2.3.1 Importância e contexto atual

A iluminação tem sido responsável por uma parcela importante do consumo de energia, pelo aumento do número de luminárias por residência e também pelo seu uso inconsciente ou exagerado. Com o intuito de reverter ou atenuar esta situação surgem alternativas quanto à sua utilização, alterando-se hábitos e, sobretudo, estudando-se formas de redução energética nos equipamentos. É neste cenário que surge a tecnologia LED, com benefícios consideráveis e como forma de reverter ou atenuar os efeitos nefastos do consumo atual de energia.

Na seguinte figura 2.6 conseguem-se ver algumas das características que ajudaram na substituição das lâmpadas comuns, halógenas<sup>3</sup> e *Compact Fluorescent Lamps* (CFL) pelo LED.

EFICIÊNCIA	Menos			Mais
TIPO				
	COMUM	HALÓGENA	CFL	LED
CONSUMO	40 W	28 W	8 W	4 W
	60 W	42 W	12 W	6 W
	75 W	53 W	15 W	8 W
	100 W	70 W	20 W	10 W
DURABILIDADE	1 ano	1-3 anos	6-10 anos	15-25 anos
ECONOMIA	×	até 30%	até 80%	até 95%

Figura 2.6: Eficiência das luminárias[11].

Além das características refletidas na figura 2.6, LEDs permitem a comunicação através da luz visível. Perante essa capacidade, muitos estudos tem sido feitos na alternativa às comunicações sem fios para ambientes fechados.

Em 2011, Harald Haas mencionou, em *Technology, Entertainment, Design (TED) Talks*, na sua conferência, que as ondas de rádio têm capacidade limitada e pouca segurança, a informação radiada eletromagnética necessita de maior energia comparativamente à tecnologia VLC e pode causar interferência com outros dispositivos eletromagnéticos. Acrescenta que o facto de a luz não poder atravessar paredes, torna a comunicação por luz visível mais segura[12].

### 2.3.2 Tecnologias atuais e suas limitações

Nos anos 70, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos necessitou de criar um sistema de navegação para vários ambientes (aéreo, marinho e terrestre) para fins militares,

<sup>3</sup>Conhecidas também por lâmpadas incandescentes com filamento de tungsténio contendo um gás inerte e uma pequena quantidade de halogéneo.

o GPS[13], sistema que funciona com a transmissão do relógio atômico de cada satélite e a sua posição por sinais de rádio. No recetor, essa informação é recebida de pelo menos quatro satélites mais próximos.

Dessa informação é calculada a posição do recetor das quatro incógnitas: três coordenadas de posição e uma de tempo de satélite de desvio de relógio. Hoje em dia, o sistema é composto por 24 satélites com seis órbitas distintas[14].

Contudo, o GPS é uma solução para localização em espaços exteriores e não em espaços interiores, devido ao sinal rádio enviado não conseguir permear obstáculos como as paredes. Surge então o *Indoor Positioning System* (IPS), sistema que soluciona a localização em espaços interiores, maioritariamente por ondas de rádio. Soluções do IPS dependem de diferentes tecnologias como por exemplo:

### **Bluetooth**[15]

Tecnologia que permite comunicação sem fio através da troca de informação de pacotes de dados entre dispositivos eletrônicos a partir de ondas de rádio. Opera a 2.45 [GHz] na gama *Industrial, Scientific, Medical* (ISM)<sup>4</sup>. Contudo, para que haja troca de informação é necessária a sincronização entre dispositivos emissor e recetor. Funciona dentro de um limite de áreas consoante a sua classe, como se pode ver na tabela 2.1. Quando é estabelecida a conexão entre aparelhos, forma-se uma rede denominada *piconet*. Rede que permite no máximo até oito utilizadores (um *master* e sete *slaves*). Porém, essa rede não é capaz de suportar mais do que um *master*, mas podendo ser alargada quando um *slave* pertence a duas ou mais redes (*scatternet*) como se mostra na figura 2.7[16, 17, 18].

Classes	Energia [ $mW$ ]	Metros [ $m$ ]
1	100	100
2	2.5	10
3	1	1

Tabela 2.1: Classes de alcance por *Bluetooth*

---

<sup>4</sup>Faixa que pode ser utilizada por qualquer tipo de utilizador.

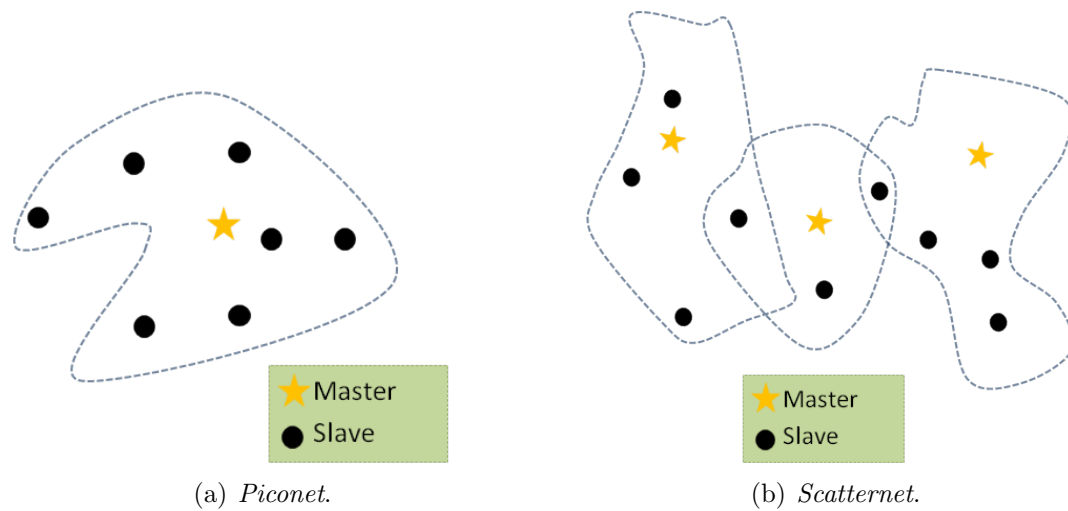


Figura 2.7: Redes de *Bluetooth*.

### ***Radio Frequency IDentification (RFID)***[19]

Na figura 2.8 é possível visualizar a tecnologia RFID que é composta por duas identidades únicas, leitores e *tags*<sup>5</sup> que tiram o partido da comunicação por rádio para poder identificar objetos ou pessoas. A identidade como o leitor comunicação com a *tag* por sinais de rádio para que ela envie a informação contida nela, onde de seguida o leitor faz o tratamento de dados a partir do controlador.

Contudo, existem etiquetas com funcionalidades distintas, tais como: ***Read-Only*** a *tag* permitindo só a leitura da sua informação; ***Read/Write (RW)*** que podem servir como uma pequena base de dados, onde se pode ler ou escrever informação[20].

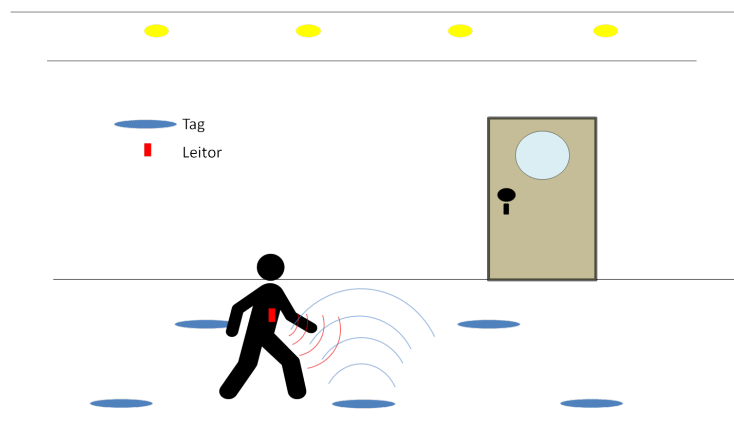


Figura 2.8: Sistema RFID.

### ***Wireless Fidelity (Wi-Fi)***

<sup>5</sup>Conhecida também por etiqueta RFID.

*Wi-Fi* é uma tecnologia de comunicação para redes de locais sem fios, como *Wireless Local Area Network* (WLAN), sendo possível implementar redes com a conexão de inúmeros dispositivos eletrônicos (computadores, *smartphones*, *tablets*, impressoras e entre outras), baseada no padrão *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) 802.11. Por não necessitar de aprovação direta de entidades governamentais, esta comunicação só pode ser usada nas gamas de frequências: [902-928] [MHz]; [2.4-2.485] [GHz]; [5.15-5.825] GHz. A localização de interiores a partir de *Wi-Fi* é baseada na intensidade do nível do sinal recebido[21, 22].

### 2.3.3 Oportunidades do uso de sistemas de iluminação

Das tecnologias mencionadas acima, verifica-se o uso excessivo da comunicação por ondas de rádio na gama giga *Hertz*<sup>6</sup> até os mega *Hertz*. Na figura 2.9 consegue-se visualizar que a VLC não faz uso da mesma gama espectral da comunicação por ondas de rádio. Face à gama espectral da comunicação por ondas de rádio se encontrar sobrecarregada, a VLC torna-se um trunfo muito forte devido à simbiose das áreas de iluminação e comunicação, podendo ser uma grande candidata na integração em sistemas IPS.

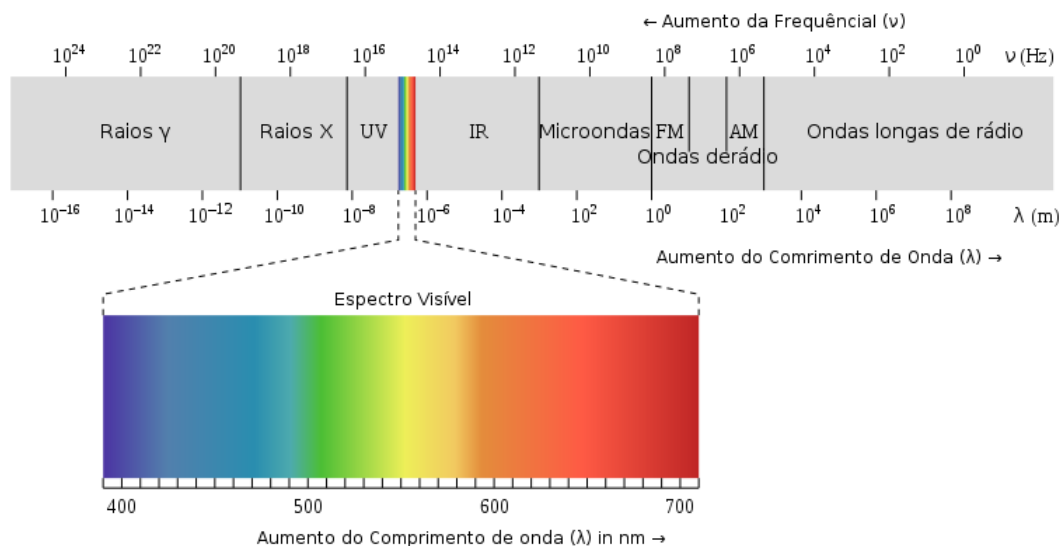


Figura 2.9: Gama espectral[23].

<sup>6</sup>Unidade de frequência no Sistema Internacional de unidades. Em honra/homenagem ao *Heinrich Rudolf Hertz*. devido às suas contribuições científicas sobre eletromagnetismo

	<i>Bluetooth</i>	RFID	Wi-Fi	VLC
Interferência EM	sim	sim	sim	não
Complexidade	elevada	elevada	elevada	reduzida
Funcionalidade	comunicação localização	comunicação localização	comunicação localização	comunicação localização iluminação
Espectro regulado	sim	sim	sim	não
Instalações	novas	novas	novas	circuito adaptável

Tabela 2.2: Comparação das tecnologias.

## 2.4 Iluminação de interiores por LED

Este subcapítulo debruçar-se-á sobre o aparecimento do LED, as suas principais características, a sua construção, as potencialidades de funcionamento e ainda a sua evolução no mercado, tendo em conta as leis que serão expostas.

### 2.4.1 Tendência de mercado

Em 1907, Henry Joseph Round, durante uma das suas investigações, verificou que, aplicando uma tensão entre dois pontos de um cristal *carborundum*<sup>7</sup>, ocorria o fenómeno de emissão de luz nos materiais inorgânicos. Desde esse acontecimento, a compreensão e estudos sobre esse fenómeno até à sua primeira comercialização levou aproximadamente seis décadas. Nick Holonyak foi o primeiro americano a desenvolver um díodo emissor de luz (tipo *GaAsP*). Na seguinte linha temporal, apresentada na figura 2.10 consegue-se visualizar a evolução da história das luminárias.

---

<sup>7</sup>Carboneto de silício *SiC*.



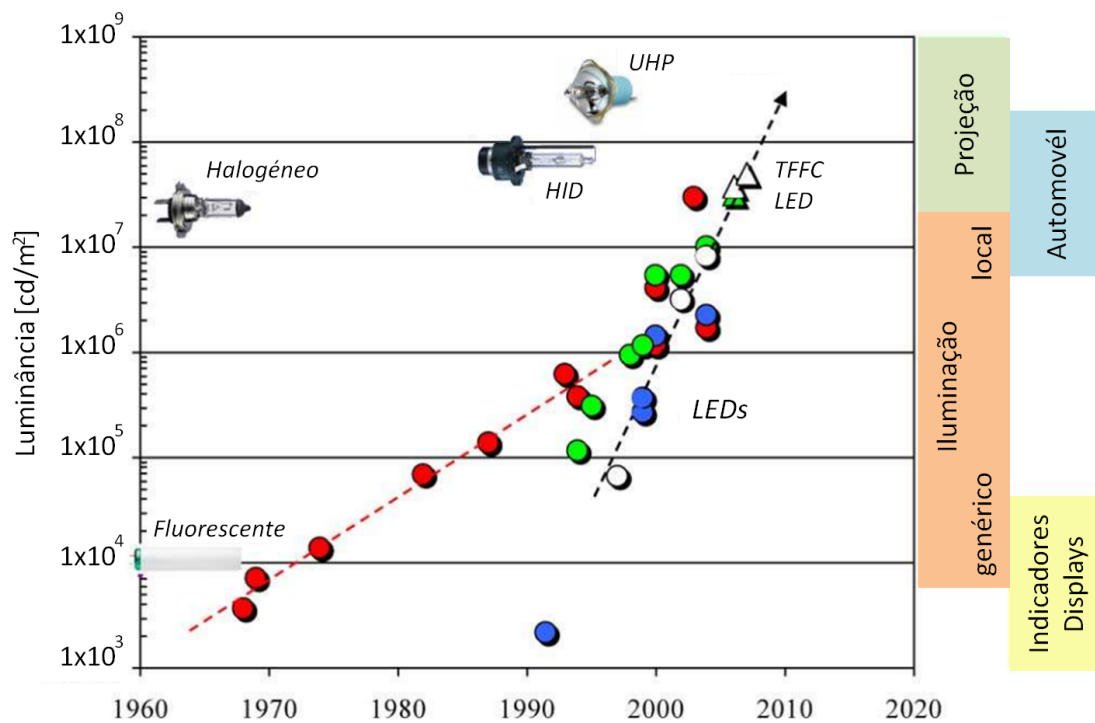


Figura 2.10: História da evolução da eficiência das luminárias[24].

Da primeira comercialização até aos últimos anos, o custo de aquisição do LED tem vindo a diminuir, face às outras tecnologias. Esta tendência pode ser confirmada pelas tendências das leis de Gordon Moore e Roland Haitz, nas quais não passam de uma observação que dependem da otimização do processo de fabrico de materiais semicondutores.

#### Lei de Gordon Moore:

Menciona que o número de transístores num circuito impresso duplica a cada dois anos. Expressa pela função 2.4, onde  $T_i$  representa o número de transístores inicial e a variável  $n$  o número de pares de anos.

$$T(n) = T_i(2^n) \quad (2.4)$$

#### Lei de Roland Haitz:

Menciona que, a cada dez anos, o custo de lúmens decai por um fator de dez e no mesmo período a quantidade de luz aumenta vinte vezes. Custo de lúmens pode ser expresso pela função 2.5,  $C_i$  representa o custo inicial de lúmen e  $n$  o número de cada década.

$$C_l(n) = C_i/(10^n) \quad (2.5)$$

E a seguinte função 2.6 exprime a quantidade de lúmens, onde  $Q_i$  significa a quantidade lúmen inicial e  $n$  o número de cada duas décadas.

$$Q_l(n) = Q_i(20^n) \quad (2.6)$$

Na figura 2.11 demonstrado por Roland Haitz observa-se que a intensidade dos LEDs aumenta vinte vezes a cada década e o seu preço decai dez vezes a cada dez anos.

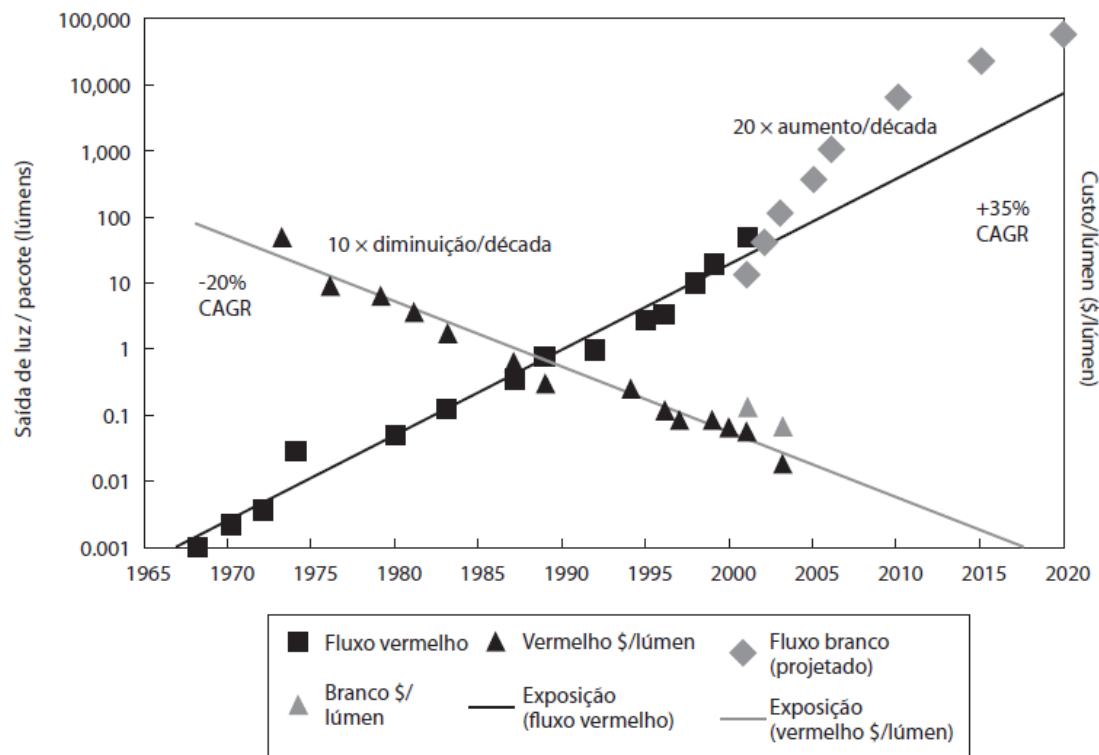


Figura 2.11: Lei de Roland Haitz[25].

## 2.4.2 Características do LED

O díodo emissor de luz é um dispositivo que foi criado com algumas finalidades. Inicialmente utilizado em luzes de indicação ligado/desligado de aparelhos eletrônicos, rapidamente passou a ser comum na iluminação de espaços, e mais recente para comunicação por luz visível.

As cores emitidas pela luz do LED podem ser diversas, todas elas monocromáticas, exceto uma, a de cor branca, uma vez que a sua cor resulta da combinação das cores *Red Green Blue* (RGB). Contudo, as cores emitidas não se devem ao plástico de encapsulamento, embora as cores de encapsulamento sejam de acordo com a cor que se pretende produzir.

Este resultado é associado à combinação e junção dos elementos físicos do chip do LED, todos eles com propriedades de semicondutores<sup>8</sup> distintos. O comprimento de onda das várias cores de luz produzida é derivado à junção dos semicondutores do LED. Na figura

<sup>8</sup>Material não metálico que consegue produzir corrente sobre o efeito de alguma ação, como por exemplo uma queda de tensão ao seus terminais.

2.12 é visualizado os vários comprimentos de onda de acordo com as cores emitidas pelo LED.

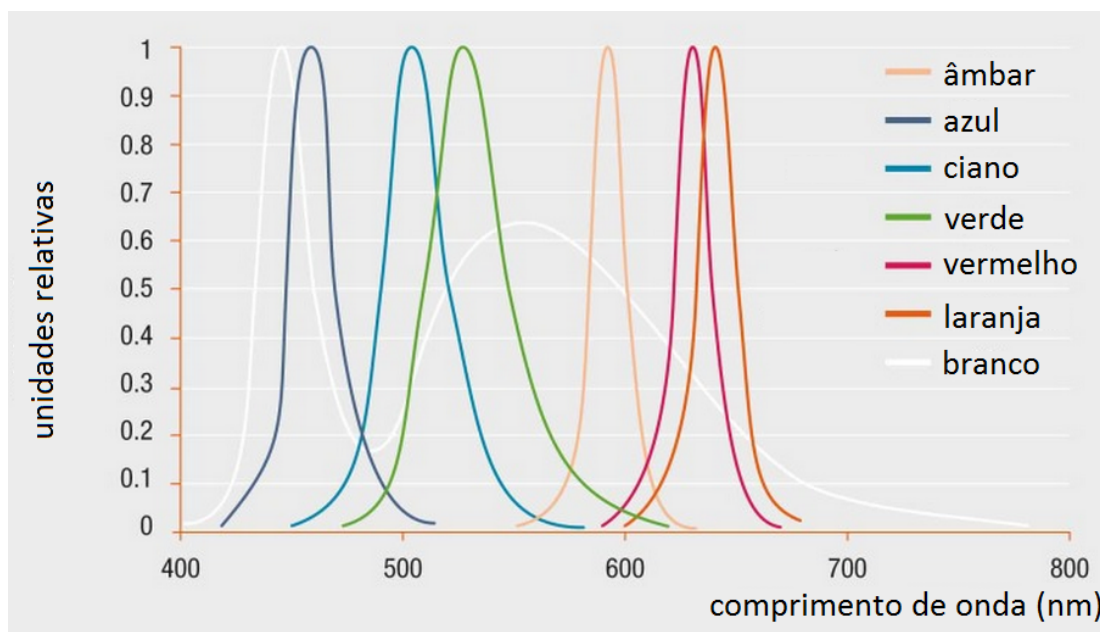


Figura 2.12: Distribuição espectral relativa[26].

A emissão de luz é consequência de um fenômeno óptico e elétrico de eletroluminescência do LED. A energia elétrica é convertida em energia luminosa.

A figura 2.13(a) tenta ilustrar o mecanismo de emissão de luz no LED. Quando aplicada uma queda de tensão suficiente aos terminais do LED, produz-se corrente elétrica devido ao movimento dos elétrons ( $e^-$ ), bem como as lacunas. Essa corrente é originada pelo movimento dos elétrons na banda de valência e as lacunas na banda de condução. Na necessidade de manter o equilíbrio energético devido à queda de tensão aplicada, ocorre o movimento das lacunas para os espaços vazios deixados pelos elétrons. A razão pela qual uma das camadas ser mais aceitadora de elétrons e outra doadora, origina na troca entre elétrons e lacunas.

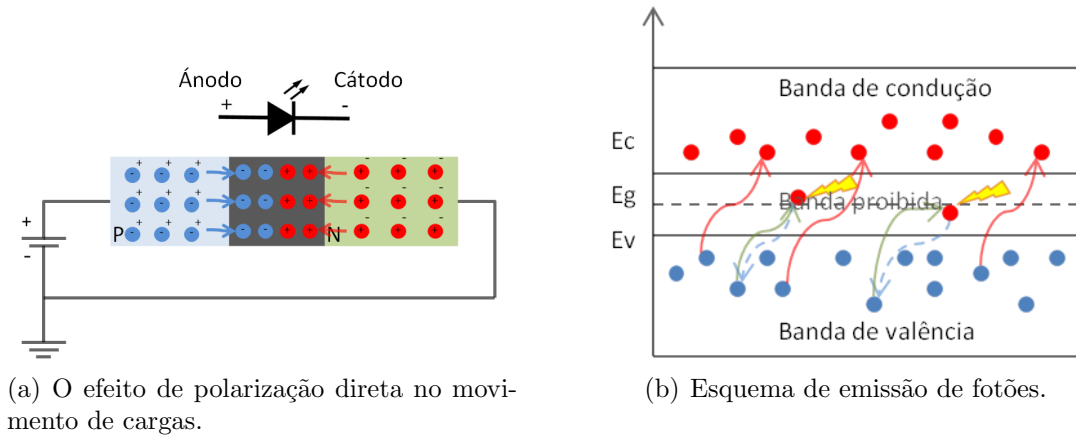


Figura 2.13: Princípio de funcionamento do LED.

Da linha de raciocínio anterior, agora é possível explicar a ocorrência de emissão de luz. Quando o semiconductor é sujeito a uma polarização direta, os elétrons que se encontram na camada do tipo  $n$  são forçados a ultrapassarem a barreira de energia de valência para a de condução. Contudo, caso a energia seja o suficiente para passar a energia de valência  $E_v$  mas não necessária para ultrapassar a de condução  $E_c$  o elétron encontra-se na zona proibida. Zona que não permite que os elétrons se encontrem nesse nível. Esse motivo leva a que o elétron perda/liberte energia em forma de luz (fotão). O fenómeno pode ser ilustrado pela figura 2.13(b).

A quantidade de luz emitida pelo LED pode ser controlada pela queda de tensão aplicada nos seus terminais. Porém, a tensão fornecida não é suficiente para se ter um controlo preciso sobre a corrente que atravessa o LED. Em detrimento das variáveis que influenciam a corrente no díodo emissor de luz é possível ser expressa pela função 2.7 teórica.

$$i(v) = I_0 \left( e^{\frac{qv}{\eta K_B t_a}} - 1 \right) \approx I_0 e^{\frac{qv}{\eta K_B t_a}} \quad (2.7)$$

Da expressão apresentada anteriormente é possível verificar que um dos grandes fatores de controlo de corrente é a tensão  $v$  aplicada aos terminais do LED. As constantes são  $I_0$  que é conhecida como corrente de saturação, a constante de Boltzmann  $K_B = 1.38 \times 10^{-23}$  [J/K], a carga  $q = 1.6 \times 10^{-19}$  [C], o coeficiente de emissão  $\eta$  que depende do tipo de material  $1 \leq \eta \leq 2$  e temperatura ambiente absoluta  $t_a$ .

## 2.5 Circuitos foto-detetores

Circuitos de foto-deteção são essencialmente dispositivos cuja finalidade é a deteção de radiação. Tendo a capacidade de traduzir a quantidade de luz recebida na produção de corrente eléctrica, são compostos pela junção de material semiconductor. Existem regiões mais concentradas de aceitadores e outras de doadores, criando um semiconductor de junção  $p-n$ .

Ao longo desta dissertação concentra-se principalmente sobre a detecção de ângulos de incidência, a potência recebida e a informação enviada pelo emissor que se encontra modulada na intensidade de luz. Para isso, serão necessários certos requisitos, como o controlo do campo de visão do foto-recetor, o ângulo com que são recebido os feixes de luz e um circuito de amplificação e retificação de sinal.

### 2.5.1 Dispositivos de foto-deteção

Os foto-detetores e os LEDs, funcionam de um mesmo modo na queda de uma tensão aos seus terminais: Um para deteção de luz e outro para emissão de luz. Contudo, a queda de tensão *versus* corrente em ambos é diferente como se pode ver no gráfico da figura 2.14.

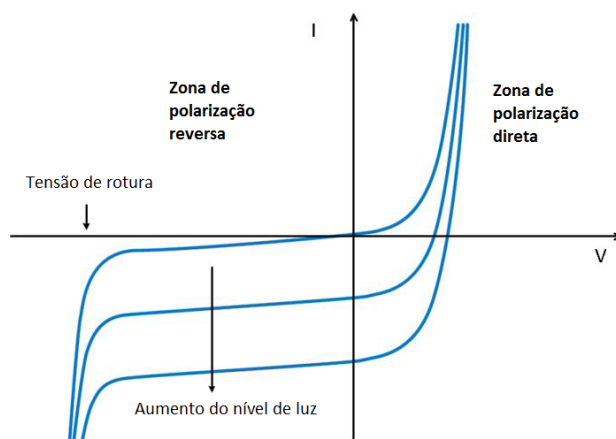


Figura 2.14: Curva característica da corrente tensão do foto-detetor e díodo.

Para que os LEDs funcionem, tem de ser aplicada uma queda de tensão positiva e suficiente para que possa emitir fotões para o espaço livre, chamada zona de polarização direta, enquanto o foto-detetor, para captar a luz proveniente do espaço, tem que se encontrar na zona de polarização reversa.

Conhecido o princípio de funcionamento dos foto-detetores, torna-se importante conhecer alguns dos tipos existentes. De seguida serão apresentados dois dos foto-detetores que podem ser usados em VLC, assim como algumas das suas características mais relevantes.

#### Foto-díodo

A simbologia usada em modelos eletrónicos para representar o foto-díodo é visível na figura 2.15.



Figura 2.15: Símbolo foto-díodo.

Na tabela 2.3 serão mostradas algumas das características mais relevantes na aquisição dos foto-díodos, entre elas a responsividade, a área efetiva  $A_{ef}$  de captação de luz, o pico de comprimento de onda  $\lambda$  onde a responsividade é máxima, o ângulo de abertura  $e$ , por fim, o custo.

Marca	Modelo	R [ $A/W$ ]	$A_{ef}$ [ $mm^2$ ]	Pico $\lambda$ [ $nm$ ]	FOV [ $^\circ$ ]	Custo [ $e$ ]
OSRAM[26]	BPW21	0,34	7,45	550	55	8,820
	SFH221	0,55	1,54	900	55	8,820
	SFH213	0,65	1,00	850	10	0,538
Thorlabs[27]	FDS010	0,44	0,82	730	90	39,06
	FDS1010	0,62	100	960	90	92,70

Tabela 2.3: Tabela comparativa dos foto-díodos.

### Foto-transístores

O símbolo representativo do foto-transísttor é visível na figura 2.16.



Figura 2.16: Símbolo foto-transísttor.

Os foto-transísttores, relativamente aos foto-díodos, são muito mais sensíveis à presença de luz, no que se traduz num maior aumento de corrente. Tal facto deve-se ao foto-díodo ser colocado do coletor à base do transísttor, fazendo com que aumente a corrente coletor  $I_c$ .

Na tabela 2.4 serão apresentadas algumas das características na sua aquisição.

Marca	Modelo	$I_c$ [ $mA$ ]	$A_{ef}$ [ $mm^2$ ]	Pico $\lambda$ [ $nm$ ]	FOV [ $^\circ$ ]	Custo [ $e$ ]
OSRAM[26]	BP103	100	0,110	850	55	0,882
	BPX43	50	0,675	880	15	1,782
	SFH3010	15	0,040	850	80	0,325
	SFH309	15	0,038	860	12	0,201
	BPX81	50	0,110	850	18	0,928

Tabela 2.4: Tabela comparativa dos foto-transísttores.

Embora os foto-detetores tenham a mesma funcionalidade (captação de luz), são usados em situações distintas devido ao modo como são construídos.

É comum o uso de foto-díodos no interior de edifícios para controlo de intensidade luminosa, uma vez que têm a capacidade de acionamento das luminárias quando o nível de intensidade é abaixo do programado/pretido.

Em geral, os foto-transístores são usados para controlo de fluxos luminoso, podendo ser usados nas entradas/saídas de edifícios, onde não é necessário medir a intensidade luminosa, mas sim o controlo de fluxo luminoso. Assim, quando é feita a ligação do feixe de luz entre o LED e o foto-transístor é detetado que ocorreu abertura da porta, como se ilustra na figura 2.17.

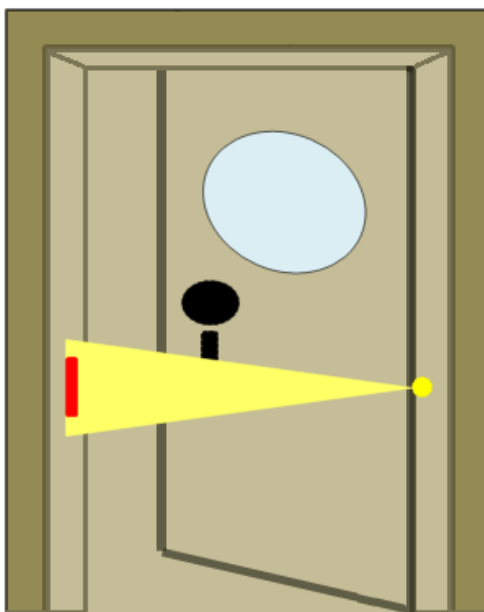


Figura 2.17: Sensor de abertura de porta, através da receção do sinal de luz pelo foto-transístor.

Pelo exposto, torna-se compreensível o uso do foto-díodo no desenvolvimento do sensor de localização em espaços interiores por luz visível. A capacidade de relacionarem a corrente com a intensidade luminosa de uma forma mais próxima do linear do que os foto-transístores.

## 2.5.2 Arquitetura restritiva do campo de visão

Na incidência de luz sobre os foto-detetores os fotões são absorvidos, fazendo com que eletrões presentes na camada de valência sejam forçados a passar para a camada de condução e as lacunas a preencherem os espaços vazios na camada de valência, como se ilustra na figura 2.18(a).

Pode verificar-se que é criada uma corrente proporcional aos fotões incidentes na área de captação de luz, relacionada com o FOV do foto-detetor que está ilustrado na imagem 2.18(b).

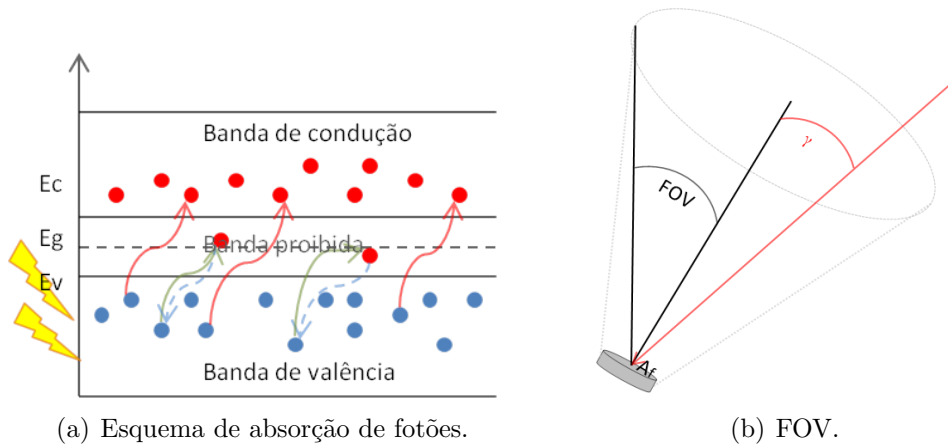


Figura 2.18: Foto-detetor.

A área efetiva  $A_{ef}$  captada pode ser expressa pela função 2.8 e o ângulo  $\gamma$  indica a direção com que o raio de luz incide sobre a área do foto-detetor  $A_f$  sensível à luz.

$$A_{ef}(\gamma) = \begin{cases} A_f \cos(\gamma) & |\gamma| < \text{FOV} \\ 0 & |\gamma| \geq \text{FOV} \end{cases} \quad (2.8)$$

### 2.5.3 Modos de operação do foto-díodo

Os modos de operação de um foto-díodo são diferentes quando a tolerância mínima de corrente e a velocidade de operação se tornam fatores relevantes. Na figura 2.19 mostra-se o modelo do foto-díodo.

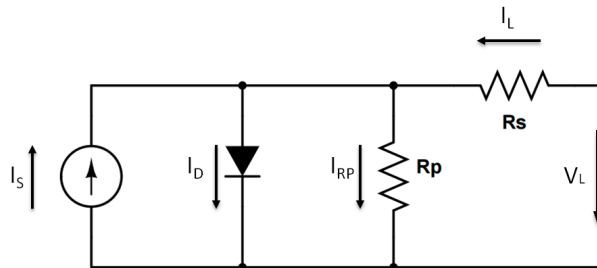


Figura 2.19: Modelo físico do foto-díodo.

A resistência  $R_p$  representa a impedância de curto-circuito do foto-díodo e a  $R_s$  a de junção do material. E o díodo representa o díodo ideal. Contudo, a corrente gerada pela incidência de luz é representada pela fonte de corrente  $I_s$ .

De seguida serão apresentados dois modos de operação, o fotovoltaico (a incidência de luz gera tensão) e o fotocondutivo (a incidência de luz gera corrente)[28].



## Fotovoltaico

Os foto-díodos em modo fotovoltaicos são geralmente utilizados em aplicações que requerem alta precisão. A não polarização do foto-díodo ilustrada na figura 2.20(a) apresenta certas características como corrente escura (corrente gerada pela ausência de luz) nula, maior linearidade e baixo ruído.

Na polarização direta do foto-díodo é possível detetar a potência incidente de luz no foto-díodo sem a presença de corrente escura.

Pela primeira lei de *Kirchhoff*<sup>9</sup>, e considerando-se a corrente  $I_{RP}$  desprezável,  $I_L$  é dado por,

$$I_L \approx I_D - I_S \quad (2.9)$$

Neste modo de operação em circuito aberto, a corrente  $I_L$  é nula, originando uma tensão aos terminais do foto-díodo que é dada pela substituição da equação 2.7 diretamente na equação 2.9,

$$V_L = \frac{\eta K_B t_a}{q} \ln \left( \frac{I_S}{I_0} + 1 \right) \quad (2.10)$$

Verificando-se na figura 2.20(b) as tensões correspondentes a quando a incidência de luz no foto-díodo no modo fotovoltaico assinaladas a vermelho.

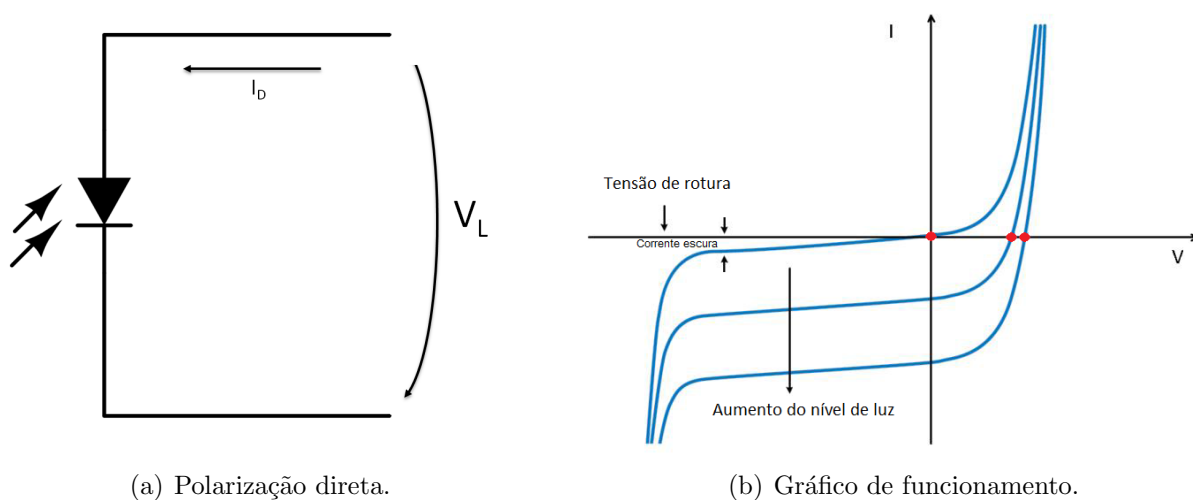


Figura 2.20: Modo de operação fotovoltaico.

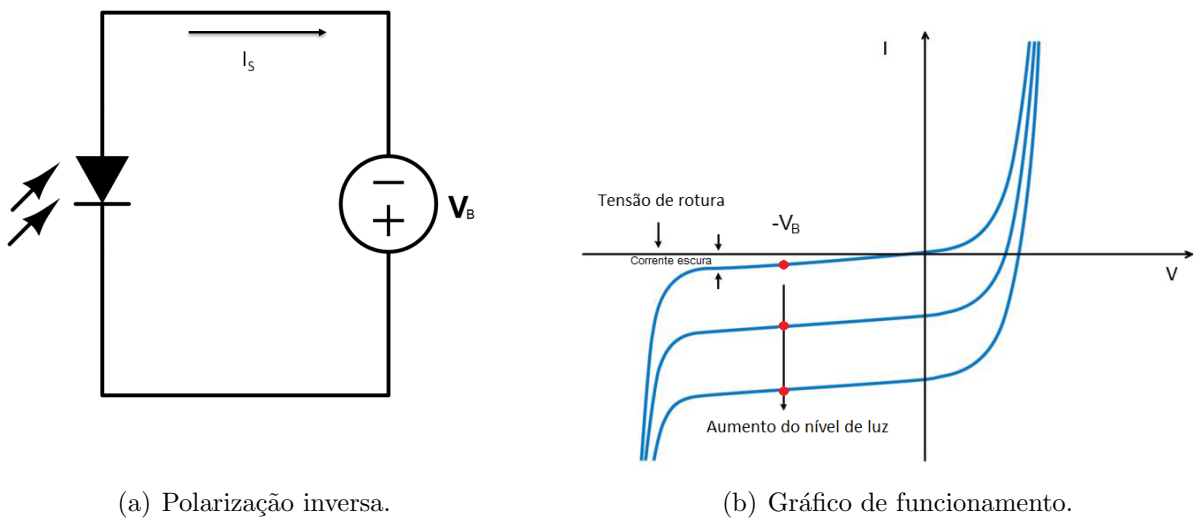
## Fotocondutivo

Contrariamente ao modo fotovoltaico, as características do modo fotocondutivo relacionam-se com o alto ruído, a corrente escura, a não linearidade e a capacidade

<sup>9</sup>Físico alemão *Gustav Robert Kirchhoff* (1824 - 1887), que determinou as duas leis essenciais para circuitos elétricos.

de comutação de altas velocidades do foto-díodo. Estas especificidades resultam da polarização inversa do foto-díodo como se ilustra na figura 2.21(a).

Nesta configuração o foto-díodo quando polarizado com um tensão  $V_B$  negativa, opera em curto circuito. Assim, a diferença de tensão aos seus terminais é  $V_L$  é nula. O ponto de operação correspondente a esta configuração é ilustrado pelo gráfico da figura 2.21(b), em que a corrente gerada pela luz incidente no foto-díodo encontra-se indicada a vermelho. Verificando-se que quanto maior for a incidência de luz, maior é a amplitude da corrente  $I_S$ .



(a) Polarização inversa.

(b) Gráfico de funcionamento.

Figura 2.21: Modo de operação fotocondutivo.

#### 2.5.4 Topologias de amplificação ótica

A informação modulada pelas fontes de luz, desde que é enviada até ser decifrada pelos recetores, sofrem algumas alterações. Uma vez que a potência emitida pelos díodos decai com o quadrado da distância, justifica-se que tenha de haver estágios de amplificação dentro da gama do recetor.

Outro aspeto importante é a filtragem de ruído. Isto, porque o canal de envio de informação é o espaço livre entre o emissor e o recetor, como reflexões nas paredes, espelhos e outras fontes luminárias presentes.

De seguida serão apresentados alguns desses estágios, amplificação do sinal e retificação do sinal *Direct Current* (DC) emitido por outras fontes, como por exemplo a luz do próprio sol.

Uma das formas mais usadas para amplificação ótica é a configuração de transimpedância, visível na figura 2.22. Consiste basicamente na conversão de uma forma eficiente à corrente de saída do foto-díodo para tensão. Uma das vantagens desta configuração é a

grande sensibilidade, que depende da linearidade do amplificador e da resistência de realimentação. A largura de banda neste caso é limitada pela impedância de entrada e pelo ruído. Nesta configuração, o que vai determinar o ganho de corrente é a resistência  $R_f$  [29].

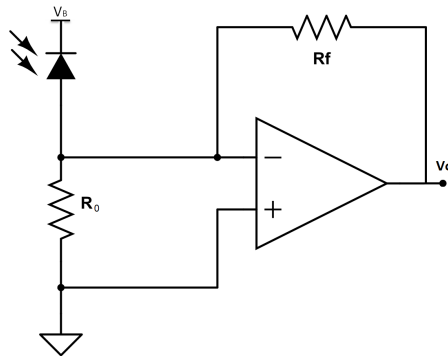


Figura 2.22: Amplificador óptico de transimpedância.

Na filtragem das componentes que são adicionadas por outras fontes luminárias opta-se exclusivamente pela adição de um condensador em série dos terminais da resistência  $R_0$  de polarização e do foto-díodo até à entrada do amplificador, visível na figura 2.23. A intensidade luminosa adicionada por outras fontes luminarias é muito baixa (à volta dos 50 a 100 [Hz]). A intensidade luminosa adicionada pelo sol é DC. Posto isto, o filtro que é adicionado é do tipo passa alto, onde são eliminadas/rejeitadas as componentes de baixa frequência. Da equação 2.11 é possível calcular a frequência de corte  $f_c$  que se pretende rejeitar de acordo com a resistência vista nos terminais do condensador.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.11)$$

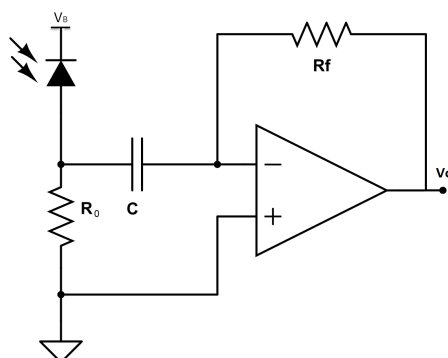


Figura 2.23: Filtragem da componente DC.

## 2.6 Comunicação por luz visível de baixo débito

O envio de informação necessária na localização de interiores por VLC é exclusivamente para indicação das fontes luminárias que se encontram no campo de visão do sensor. Ao detetar a luz enviada por uma fonte, tem de ter a capacidade de decifrar essa informação e verificar na sua *hash table*<sup>10</sup> de quem é a informação recebida.

O sensor desenvolvido nesta dissertação abrirá a porta para dois métodos de receção do sinal enviado pelos LEDs e serão descritos neste capítulo. Contudo, a escolha do melhor ou mais vantajoso na comunicação por luz visível será feita por outros alunos que posteriormente continuaram com o projeto.

Um dos métodos consiste no envio de palavras codificadas pelas fontes luminárias e o outro na frequência das portadoras *Radio Frequency* (RF) dos LEDs.

### 2.6.1 Atribuição de palavras codificadas às luminárias

A atribuição de palavras codificadas às luminárias, obriga à construção de um protocolo de comunicação unidirecional para o recetor. Este tipo de envio de informação, parecendo complexo de início, pode tornar-se mais simples quando o número de emissores se torna elevado. As vantagens podem ser tanto para o recetor como para o emissor, uma vez que este último pode enviar as suas palavras de identificação como outro tipo de informações adicionais. Outro aspeto nesta arquitetura é a necessidade de uma única frequência da portadora, fazendo com que o recetor esteja só à espera da informação dentro dessa gama. além de existir a possibilidade de ter um filtro digital para rejeição das restantes frequências desnecessárias[30, 31, 32].

### 2.6.2 Associação de frequências variadas por luminária

A associação de frequências por luminária é uma solução para a identificação dos LEDs, que consiste na variação da portadora das fontes de luz.

A variação das portadoras RF das fontes de luz acarreta uma limitação: o recetor tem de ser capaz de detetar as frequências com precisão dentro da gama e distingui-las.

Contudo, existem artigos que propuseram este tipo de comunicação com o intuito de provar que a interferência entre as várias luminárias não era um problema[33, 31].

---

<sup>10</sup>Palavra que é reconhecida pelo recetor que corresponde a uma certa informação guarda na sua tabela interna.

# Capítulo 3

## Projeto do sensor de localização

*"For a long time it puzzled me how something so expensive, so leading edge, could be so useless. And then it occurred to me that a computer is a stupid machine with the ability to do incredibly smart things, while computer programmers are smart people with the ability to do incredibly stupid things. They are, in short, a perfect match." - Bill Bryson*

### *Sumário*

*Ao longo deste capítulo serão apresentados os requisitos necessários de simulação para o emissor e recetor, por linguagem de computação técnica, Matlab. Primeiramente, será feita uma análise do dimensionamento do sensor a simular. Em seguida, o estudo do manuseamento do FOV do recetor na receção do sinal. Em virtude dos factos mencionados, serão apresentadas algumas considerações no final do capítulo.*

A construção do sensor de localização obedece a um conjunto de metas e requisitos, do início até à sua conclusão final. Temos que ter em conta qual o objetivo primordial do trabalho para podermos desenvolver um sensor capaz de receber informação dos LEDs e calcular a sua própria posição a partir de algoritmos matemáticos. Exige-se um estudo sobre os intervenientes em causa, necessário para a sua aquisição: o emissor (LED) e recetores (foto-díodos).

Este estudo envolve a simulação dos modelos matemáticos de ambos os componentes, via *MatLab*, separadamente e após a deliberação do modelo físico do sensor.

Implica igualmente averiguar quais as condições necessárias para a simulação do sensor de localização.

A construção do suporte para os foto-díodos será abordada neste capítulo e os requisitos do circuito de receção do sinal no capítulo seguinte. Na figura 3.1 encontra-se o esquema resumido do trabalho envolvido na construção do sensor.

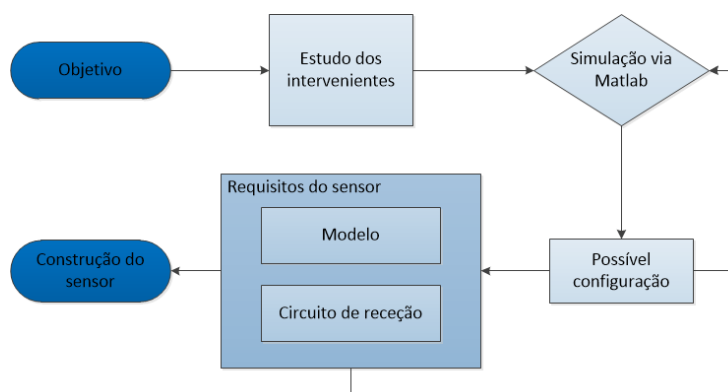


Figura 3.1: Esquema do planeamento da execução do sensor de localização.

### 3.1 Características do emissor e recetor

Na caracterização dos modelos matemáticos do emissor e recetor, é necessário conhecer as suas coordenadas. Tendo em conta que alguns sistemas mais usados na determinação de um ponto são as coordenadas cartesianas e esféricas, é possível a sua translação de cartesianas para esféricas e vice-versa.

Na figura 3.2 está representado o ponto  $Q$  que pode ser dado por coordenadas cartesianas e esféricas. As coordenadas cartesianas  $x$ ,  $y$  e  $z \in \mathbb{R}$ , e esféricas  $\rho \in [0, \infty[$ ,  $\theta \in [0, 2\pi[$  e  $\varphi \in [0, \pi]$ .

A equação 3.1 representa os pontos  $x$ ,  $y$  e  $z$  de  $Q$  a partir  $\rho$ ,  $\theta$  e  $\varphi$ ,

$$\begin{cases} x = \rho \sin(\varphi) \cos(\theta) \\ y = \rho \sin(\varphi) \sin(\theta) \\ z = \rho \cos(\varphi) \end{cases} \quad (3.1)$$

onde a distância entre o ponto  $Q$  e a origem é dada por  $\rho$ , o ângulo entre o eixo  $X$  positivo e a linha que une a origem com a projeção do ponto  $Q$  no plano  $XY$  por  $\varphi$  e o ângulo entre o eixo  $Z$  e a linha que une a origem e ponto  $Q$  é  $\theta$ .

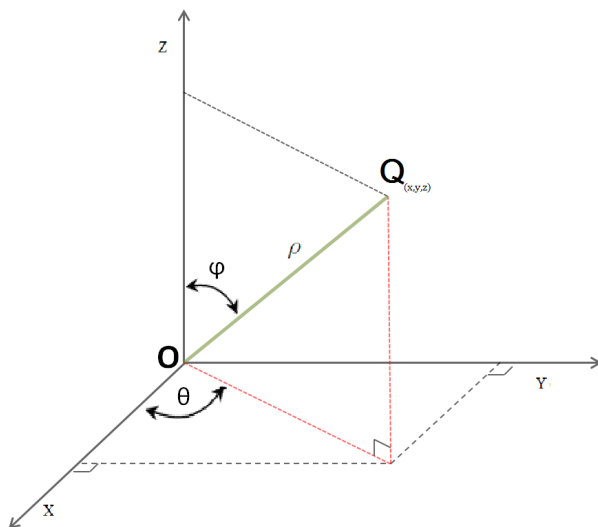


Figura 3.2: Sistema representativo das coordenadas cartesianas e esféricas.

No entanto as coordenadas esféricas podem ser dadas pelas cartesianas segundo a equação 3.2.

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \varphi = \arctg\left(\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{z}\right) \\ \theta = \arctg\left(\frac{y}{x}\right) \end{cases} \quad (3.2)$$

Na determinação da localização do recetor, o robô parte do pressuposto que é conhecido  $h$ , a altura a que se encontram colocados os LEDs emissores (luminárias), ficando  $z = \rho \cos(\varphi) = h$ . Sendo só necessário o conhecimento dos ângulos  $\varphi$  e  $\theta$ . Na substituição de  $h$  no sistema de equações 3.1,  $x$  e  $y$  ficam dependentes de  $\varphi$  e  $\theta$ , visível na função 3.3.

$$\begin{cases} x(\varphi, \theta) = h \tan(\varphi) \cos(\theta) \\ y(\varphi, \theta) = h \tan(\varphi) \sin(\theta) \end{cases} \quad (3.3)$$

Contudo, na determinação de  $x$  e  $y$ , existe sempre um erro associado, o erro relativo  $\Delta x$  e  $\Delta y$ , que pode ser dado pela equação 3.4, a partir dos erros relativos dos ângulos  $\Delta\varphi$  e  $\Delta\theta$ .

$$\begin{cases} \Delta x(\varphi, \theta) = \left| \frac{\partial x}{\partial \varphi} \right| \Delta\varphi + \left| \frac{\partial x}{\partial \theta} \right| \Delta\theta \\ \Delta y(\varphi, \theta) = \left| \frac{\partial y}{\partial \varphi} \right| \Delta\varphi + \left| \frac{\partial y}{\partial \theta} \right| \Delta\theta \end{cases} \quad (3.4)$$

desenvolvendo a equação anterior,

$$\begin{cases} \Delta x(\varphi, \theta) = h [|\sec(\varphi)^2 \cos(\theta)| \Delta\varphi + |\tan(\varphi) \sin(\theta)| \Delta\theta] \\ \Delta y(\varphi, \theta) = h [|\sec(\varphi)^2 \sin(\theta)| \Delta\varphi + |\tan(\varphi) \cos(\theta)| \Delta\theta] \end{cases} \quad (3.5)$$

A função secante,  $\sec(x)$ , é definida,

$$\sec(x) = \frac{1}{\cos(x)} \quad (3.6)$$

Após a descrição da obtenção das coordenadas dos pontos nos vários sistemas, cartesiano e esférico e os erros associados na sua determinação a partir dos ângulos, serão apresentados os modelos matemáticos do emissor e recetor.

### 3.1.1 Emissor LED

O diagrama de radiação do emissor ótico é frequentemente modelado pela função *Lambertiana*, definida por *Johann Heinrich Lambert*<sup>1</sup> (1728-1777)[34]. Desse modo, a intensidade de radiação emitida é definida pela função 3.7,

$$I(\theta) = I_0 \cos(\theta)^n, |\theta| \leq \frac{\pi}{2} \quad (3.7)$$

onde  $I_0$  é a intensidade de radiação máxima para quando  $\theta = 0 \text{ rad}$  e  $n$  representa a diretividade que está relacionada com *Half Power Angle* (HPA) do LED, podendo ser definida pela seguinte equação 3.8.

$$n = \frac{-\ln(2)}{\ln(\cos(\text{HPA}))} \quad (3.8)$$

A potência total recebida  $P_r$  no recetor é dada pela equação 3.9[35].

$$P_r = \frac{P_t(n+1) \cos(\theta)^n}{2\pi d^2} \quad (3.9)$$

$P_t$  é a potência emitida pelo emissor e  $d$  a distância a que se encontra o emissor do recetor. A intensidade de radiação *Lambertiana* de um emissor simulado é visível na figura 3.3, existindo simetria ao longo do vetor diretor do emissor[36]. Este modelo restringir-se à linha de vista. Pelo facto de ser direcional, tornando-se adequado aos propósitos pois temos de minimizar os efeitos de reflexões.

---

<sup>1</sup>Matemático suíço, primeiro a introduzir as funções hiperbólicas em trigonometria.



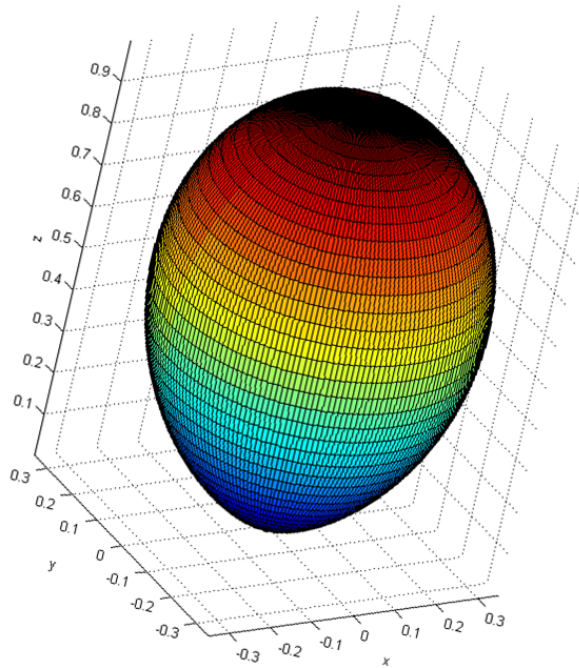


Figura 3.3: Superfície de intensidade de radiação *Lambertiana* de um emissor de  $n = 5$ , corresponde  $HPA \approx \frac{\pi}{6}$  ( $HPA \approx 30^\circ$ ) normalizado.

Existe um caso especial denominado por emissor *Lambertiano* puro quando  $n = 1$ , que corresponde  $HPA = \frac{\pi}{3}$  ( $HPA = 60^\circ$ ). Na figura 3.4 está representada a evolução do diagrama de radiação *Lambertiana* para  $n = [1, 3, 5, 7]$ . Visualiza-se que quando a diretividade  $n$  aumenta o HPA fica, conseqüentemente, mais confinado, existindo uma maior concentração do foco de radiação[33, 37].

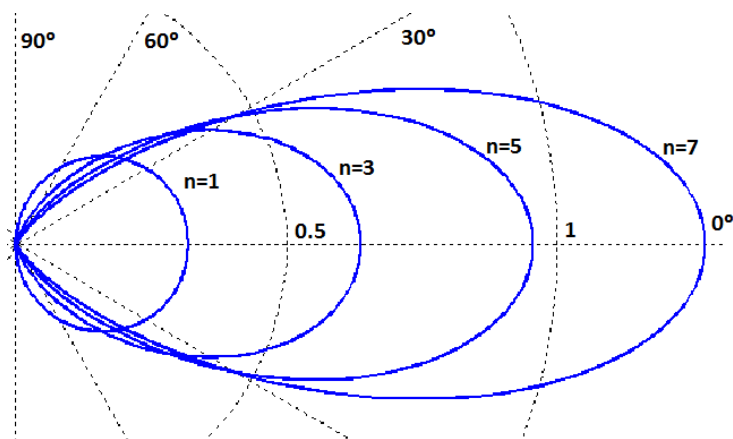


Figura 3.4: Diagrama de radiação *Lambertiana* para várias ordens de diretividade  $n$ .

### 3.1.2 Recetor foto-díodo

Normalmente, o campo de visão ótico do recetor tem a forma cónica, como se apresenta na figura 3.5. A receção de sinal recebido é descrita pela seguinte equação 3.10[37].

$$A_{ef}(\gamma) = \begin{cases} A_f \cos(\gamma) & |\gamma| < \text{FOV} \\ 0 & |\gamma| \geq \text{FOV} \end{cases} \quad (3.10)$$

A radiação é nula quando o ângulo de visão ( $\alpha$ ) é superior ao FOV, devido a radiação não se encontrar dentro do campo de receção cónico. Denomina-se campo de visão completo, quando  $\text{FOV} = 90^\circ$ . A área efetiva  $A_{ef}$  de receção do recetor é definido pela sua orientação coincidente com o eixo central da forma cónica, área do foto-díodo  $A_f$  e o FOV.

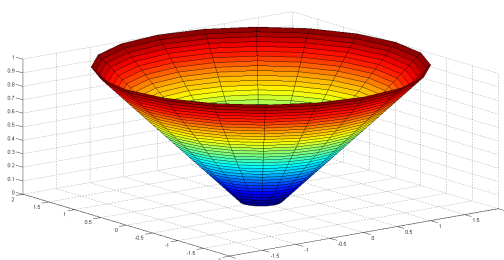


Figura 3.5: Superfície cónica que delimita o campo de visão do recetor.

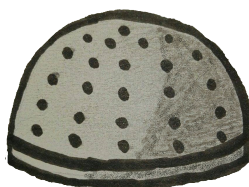
## 3.2 Requisitos do modelo do sensor

Na elaboração de qualquer projeto é importante entender quais os requisitos necessários para a sua execução. No entanto, na realização do sensor de localização é relevante conhecer as possibilidades que existem e as vantagens e desvantagens de cada uma dessas possibilidades, de forma a facilitar o trabalho posterior.

No desenvolvimento do sensor é necessário, primeiramente, conceber o modelo físico do sensor para se poder passar à fase de testes, via simulação *MatLab*. Na figura 3.6 seguinte são apresentados os primeiros esboços do desenho do sensor a desenvolver.



(a) Superfície de arco de  $180^\circ$  preenchido de foto-díodos alinhados.



(b) Superfície semi-esfera preenchida de foto-díodos.



(c) Superfície de arco de  $90^\circ$  preenchido de foto-díodos alinhados.

Figura 3.6: Configurações possíveis para o sensor.

Na figura 3.6(a) visualiza-se uma superfície de arco com um campo de visão fatiado preenchido de foto-díodos, todos alinhados sobre o plano perpendicular a XY. Contudo, para se poder visualizar toda a área em seu redor é necessário rodar o sensor, usando um motor passo a passo sobre o eixo Z. É visível na segunda figura 3.6(b) uma superfície semiesférica preenchida de foto-díodos sobre toda a sua superfície, com um campo de visão de  $360[^\circ]$  no plano XY e de  $180[^\circ]$  no plano perpendicular a XY. Na última figura 3.6(c) apresenta-se um sensor com um menor número de foto-díodos do que os restantes dois, por ter um campo de visão de  $90[^\circ]$  no plano perpendicular a XY. Para cobrir toda a área é necessário fazer o mesmo do que no sensor da figura 3.6(a). Todavia, em detrimento da escolha da melhor configuração do sensor a desenvolver, é necessário ter em conta: o número de foto-díodos  $N_f$ ; o número de circuitos de amplificação e o número de condensadores  $C_s$  de retificação de sinal; o número de portos de leitura dos sinais  $N_p$ ; se são necessários componentes extras, como motores; o peso  $P$  e o preço final  $P_f$ . De seguida são apresentadas as vantagens e desvantagens de ambas as configurações na tabela 3.1.

Sensor da figura:	3.6(a)	3.6(b)	3.6(c)
Nº de foto-díodos	$2N_f - 1$	$\approx \frac{N_f 180^\circ}{FOV} (2N_f - 1)$	$N_f$
Nº de circuitos	$2C_s - 1$	$\approx \frac{N_f 180^\circ}{FOV} (2C_s - 1)$	$C_s$
Nº de portos I/O	$2N_p - 1$	$\approx \frac{N_f 180^\circ}{FOV} (2N_p - 1)$	$N_p$
Motor	Sim	Não	Sim
Peso	$2P - 1$	$\approx \frac{N_f 180^\circ}{FOV} (2P - 1)$	$P$
Preço	$2P_f - 1$	$\approx \frac{N_f 180^\circ}{FOV} (2P_f - 1)$	$P_f$

Tabela 3.1: Características dos sensores.

Da tabela 3.1, apresentada anteriormente, é possível concluir que o sensor da figura 3.6(b) é o mais dispendioso no número de componentes, apesar de não ser necessário o uso de um motor. Existe um fator multiplicativo  $\frac{N_f 180^\circ}{FOV}$  que corresponde ao número de foto-díodos necessários para preencher a área em seu torno dependente do FOV. O número total de cada componente de 3.6(b) é influenciado pelo campo de visão FOV e pelo número de foto-díodos necessários para cobrir uma área de  $180[^\circ]$  em seu torno. Posto, isto verificasse que a configuração da 3.6(c) é que utiliza menor número de componentes, fazendo com que se torna a melhor configuração para ser implementada. Após conhecida a configuração que apresenta melhor vantagem no desenvolvimento do sensor e custo reduzido no número de componentes usados é necessário conhecer o número de foto-díodos para a realização da simulação. Este número está dependente da dimensão do diâmetro da cabeça do robô e do espaçamento entre eles. O diâmetro dos robôs deste estudo é de 25 [cm], sendo certo que pode ser extrapolado para outras dimensões.

### 3.3 Manipulação do campo de visão do foto-díodo

O controle do campo de visão de um foto-díodo é essencial na construção e simulação do sensor de localização de interiores por luz visível.

No mercado de foto-detetores a variedade de foto-díodos com  $FOV_r$  restrito é muito limitada. Pelo que se torna desenvolver um modo de controle do  $FOV_a$  artificial. Esse controle é ilustrado na figura 3.7.

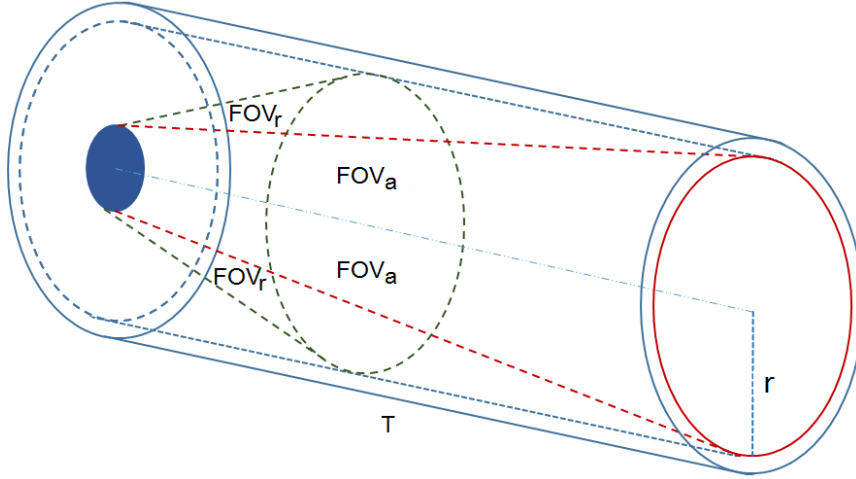


Figura 3.7: Controle do  $FOV_r$  restritivo do foto-díodo.

É colocado um tubo sobre o foto-díodo com raio  $r$  igual ao da lente do foto-díodo e comprimento  $T$ . Esse comprimento  $T$  é o que irá determinar o novo campo de visão do foto-díodo,  $FOV_a$  artificial que pode ser equacionado pela seguinte equação 3.11.

$$FOV_a = \arctan\left(\frac{r}{T}\right) \quad FOV_r > FOV_a \quad (3.11)$$

### 3.4 Simulação do sensor

Nesta secção serão abordadas as principais características utilizadas no processo de simulação do sensor de localização de interiores por luz visível via *MatLab*.

O sensor é constituído pelo aglomerado de foto-díodos, dispostos por uma ordem e forma predeterminadas, tendo em atenção a sua orientação ao longo do arco a desenvolver posteriormente à simulação.

A sua distribuição é feita ao longo de uma superfície semiesférica tendo em conta o espaçamento entre os foto-díodos, de acordo com uma progressão predefinida. Outro parâmetro importante durante a simulação é a distância a que se encontram os foto-receptores do raio do semi-arco.

O número de identidades  $N_f$  (foto-díodos), o  $FOV_a$  e a sua distribuição espacial ao longo do arco têm por objetivo a obtenção do ângulo do emissor, com intensidades e

ângulos distintos. O ângulo  $\theta$  do emissor será determinado a partir da média pesada de cada ângulo diretor de cada foto-díodo, podendo ser equacionada pela seguinte equação 3.12,

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^{N_f} \theta_i W_i}{\sum_{i=1}^{N_f} W_i} \quad (3.12)$$

onde  $\theta_i$  representa o ângulo diretor do foto-díodo e  $W_i$  a intensidade recebida pelo respetivo foto-díodo. Um facto visível no cálculo do ângulo do emissor é o número de foto-díodos. Quanto maior o número de  $N_f$  maior será a precisão do ângulo calculado, contudo, existe um compromisso entre  $N_f$ , as dimensões do arco e a distribuição dos restantes foto-díodos.

### 3.4.1 Emissor e recetor

No sentido de simular um sensor de localização em espaços interiores por luz visível, começou-se por simular o impacto de alguns dos fatores, o FOV<sub>a</sub> dos foto-díodos e o HPA dos díodos, em cenários iguais, salas com as mesmas dimensões, mas com variações diferentes. Este cenário é ilustrado na figura 3.8.

Numa sala de três metros de altura e dois metros de comprimento são visíveis os intervenientes de simulação, o recetor e o emissor. A forma da radiação do LED usada durante a simulação segue a forma de radiação *Lambertiana*, variando o HPA e mantendo sempre um ângulo diretor fixo perpendicular ao plano XY e com sentido negativo a uma altura  $h = 3$  metros. O recetor é colocado fixo, no centro da sala, nas coordenadas (0,0) e com um ângulo diretor perpendicular ao plano XY e sentido positivo. Na seguinte tabela são apresentados os valores de simulação de ambos os cenários.

Simulação	$A_f [m^2]$	$E_0 [W]$	FOV <sub>a</sub> [°]	HPA [°]	$x [m]$	$y [m]$	$z [m]$
1 <sup>a</sup>	1	1	{2, 4, 6, 8, 10}	30	[-1,1]	[0,3]	0
2 <sup>a</sup>	1	1	7.5	{20, 40, 60, 80}	[-1,1]	[0,3]	0

Tabela 3.2: Parâmetros de simulação.

Primeiramente simula-se a variação do FOV<sub>a</sub> do foto-díodo, para os valores presentes na tabela 3.2, mantendo as mesmas características mencionadas no segundo parágrafo, embora o emissor percorre a sala ao longo do eixo X no sentido positivo. Da primeira simulação para a segunda altera-se a variação do HPA mantendo sempre o mesmo FOV<sub>a</sub> do foto-díodo.

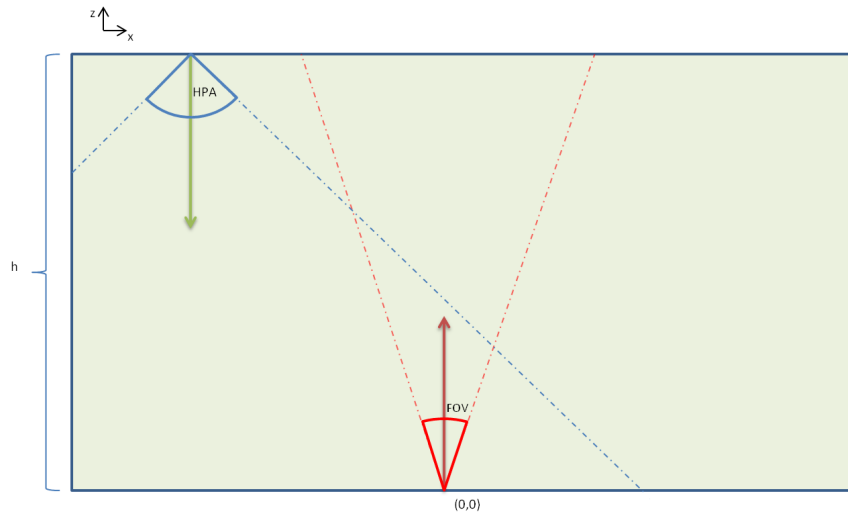


Figura 3.8: Cenário de simulação do  $FOV_a$  e HPA.

De seguida serão apresentados os gráficos dos resultados das simulações, normalizadas, impondo a variação do  $FOV_a$  do foto-díodo e do HPA do LED.

Na figura seguinte é apresentado o gráfico da variação do  $FOV_a$  do foto-díodo.

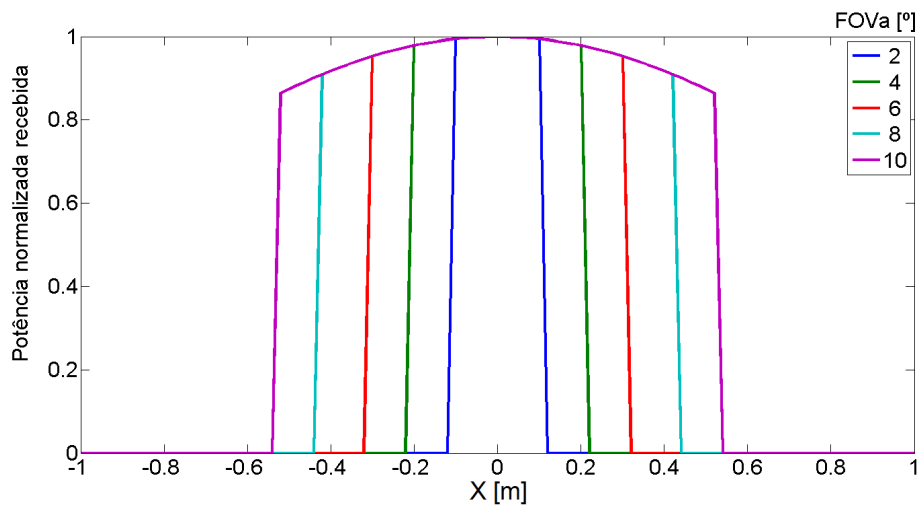


Figura 3.9: Variação do  $FOV_a$  do foto-díodo.

Os resultados da primeira simulação são apresentados no gráfico da figura anterior, verificando-se que ao aumentar o ângulo de captação de luz, o  $FOV_a$ , consegue-se abranger uma maior área. Contudo, o sinal recebido decaí quando o emissor se afasta do recetor.

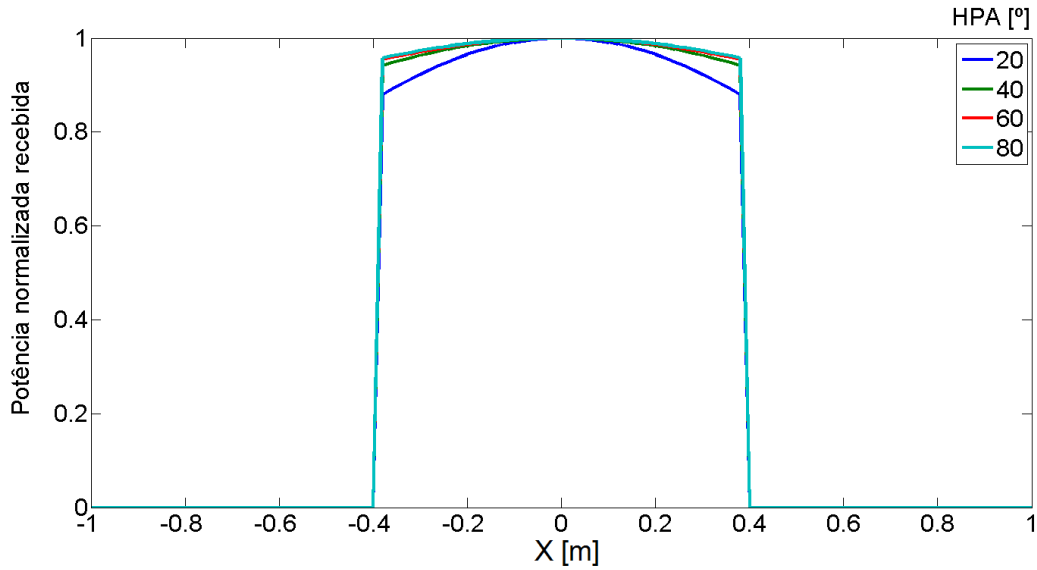


Figura 3.10: Variação do HPA do LED.

No gráfico da figura 3.10 estão presentes os resultados da variação do HPA dos LEDs mantendo sempre o  $FOV_a$  dos foto-díodos fixo,  $FOV_a = 7.5[^\circ]$ . Consta-se que, quando o HPA do LED diminui, o sinal recebido no recetor tende a ficar mais concentrado e com maior intensidade na distância mais curta entre os intervenientes (foto-díodos e LEDs). Há menor variação da potência do sinal recebido comparativamente à variação do  $FOV_a$ .

### 3.4.2 Distribuição espacial dos foto-díodos

A distribuição dos foto-díodos na receção do sinal constitui um dos parâmetros necessários no desenho do sensor de localização de interiores por luz visível, de forma a conseguir extrair o ângulo do emissor e a sua identificação.

A extração do ângulo é influenciada pelo número de foto-díodos, como já foi mostrado anteriormente, sendo certo que a sua disposição ao longo do arco e o próprio  $FOV_a$  do foto-díodo são fatores importantes na redução de incerteza do ângulo extrapolado, visível na equação 3.12.

Nesta subsecção serão abordados todos os fatores importantes a ter em conta durante a simulação, nomeadamente o número de foto-díodos, o espaçamento entre foto-díodos, o tamanho do tubo de controlo de  $FOV_a$  e a sua distribuição.

A disposição do último foto-díodo constitui um caso particular na distribuição dos foto-díodos. Na figura 3.11 apresenta-se as disposições possíveis.

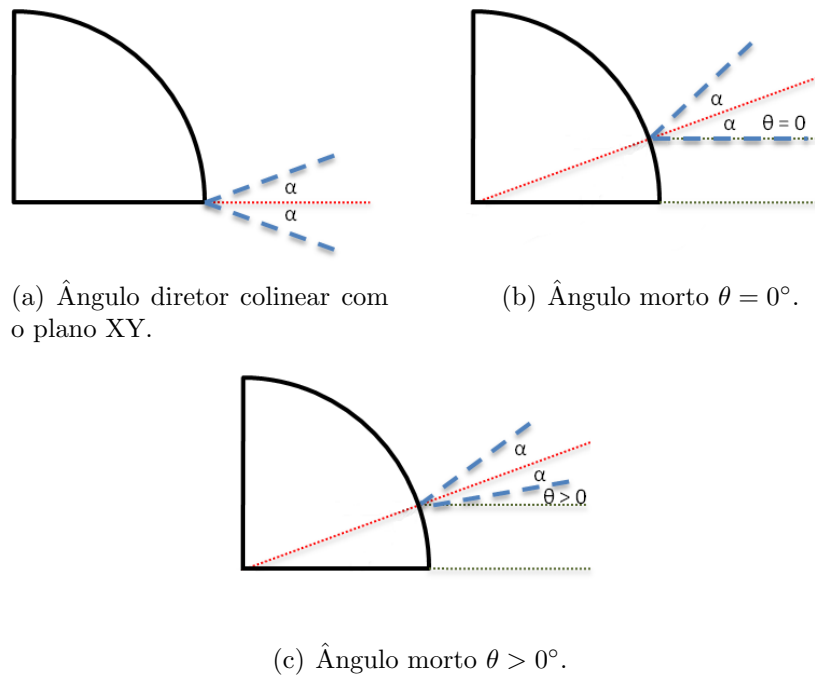


Figura 3.11: Disposição do último foto-díodo.

A figura 3.11(a) apresenta a disposição de um foto-díodo, onde o seu ângulo diretor é colinear com o plano XY. Esta disposição acarreta sérios problemas à receção do sinal, podendo ser recebido a partir de reflexões vindas do solo. No caso de ser o único foto-díodo a receber o sinal, o ângulo determinado terá uma incerteza grande.

Na segunda disposição, visível na figura 3.11(b), as reflexões provenientes do solo são minimizadas, apesar de persistir a incerteza do ângulo.

No intuito de corrigir os erros realçados anteriormente, pretende-se que exista sempre um ângulo morto, como se ilustra na última imagem da figura 3.11(c). Desta forma, as reflexões vindas do solo serão minimizadas e a determinação do ângulo do emissor será mais precisa.

### Disposição dos foto-díodos no sensor de localização

No processo de desenvolvimento do protótipo do sensor de localização são tidos em conta requisitos importantes: raio externo  $R_e$ ; raio interno  $R_i$ ; distância entre foto-díodos  $l_f$ , como o seu ângulo diretor  $\alpha$ ; diâmetro da célula de receção do foto-díodo  $d_f$  e o comprimento do tubo  $T$  para controlo do  $FOV_a$  do foto-díodo. A variável  $l_f$  é uma distância mínima entre foto-díodos que se respeita para não dificultar a construção do arco de suporte. Na figura 3.12, representa-se o perfil lateral do sensor.



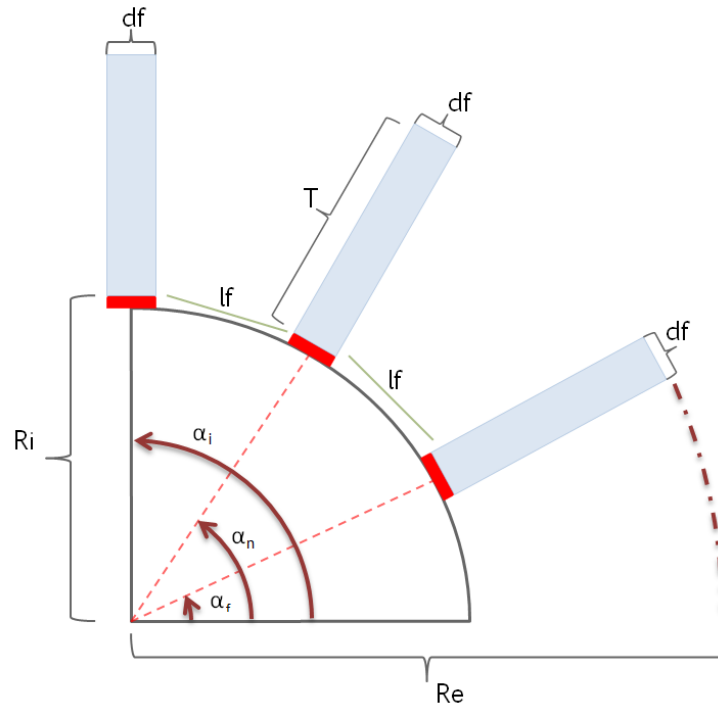


Figura 3.12: Perfil lateral do sensor.

Para uma primeira percepção da integração de todos os foto-díodos simulou-se a recepção da potência, normalizada, do sinal com 8 foto-díodos (todos com o mesmo  $FOV_a = 5[^\circ]$ ) e um LED com um  $HPA = 60[^\circ]$ , mantendo os mesmos parâmetros de simulação da tabela 3.2, exceto o  $FOV_a$  e o  $HPA$ . O número de foto-díodos será um tema discutido mais à frente. O cenário de simulação é visível na figura 3.8, onde se simulou individualmente cada foto-díodo, respeitando cada ângulo dos foto-díodos. Inicialmente, a distribuição dos foto-díodos traduz a seguinte expressão matemática 3.13,

$$\alpha(n) = 90 - \frac{90n}{N_f} \quad (3.13)$$

onde a função  $\alpha(n)$  determina o ângulo diretor de cada foto-díodo,  $N_f$  é o número de foto-díodos e  $n$  o índice de cada um,  $n \in [0, N_f]$ .

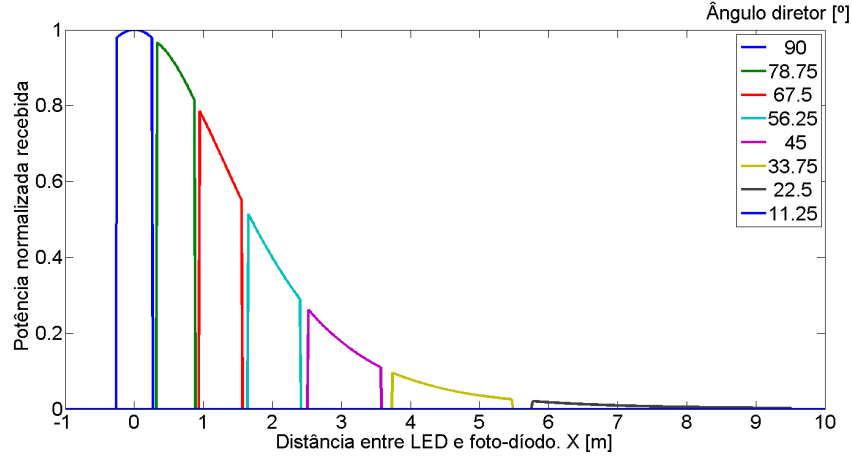


Figura 3.13: Potência normalizada da integração dos foto-díodos.

Na figura anterior, a recepção do sinal de cada foto-díodo é identificada por cores diferentes, sendo visível a integração completa do sinal emitido com zonas descontínuas. Tal facto deve-se ao número de foto-díodos e do seu  $FOV_a$ , transparecendo a forma de radiação *Labertiano* do LED e o seu HPA. Existe, portanto, uma maior captação de energia nos foto-díodos sempre que aumenta o ângulo diretor. Contudo, quando o  $\alpha$  de cada ângulo diretor diminui abrange-se uma maior distância. As zonas descontínuas da simulação anterior resultam do número de foto-díodos e o do seu  $FOV_a$ .

### Número de foto-díodos

O número máximo de foto-díodos  $N_f$  depende inicialmente dos requisitos das dimensões físicas do sensor a desenvolver ( $R_e = d_f/2 = 12.5[cm]$ ), que é descrito pela equação 3.14, visível na figura 3.12.

$$R_i + T \leq R_e = 12.5[cm] \quad (3.14)$$

onde  $R_i$  é dado pela seguinte equação 3.15,

$$R_i = \frac{N_f d_f + \sum_{n=1}^{N_f} f(n)}{\frac{\pi(\alpha_i - \alpha_f)}{180}} \quad (3.15)$$

dependente do número de foto-díodos  $N_f$  e do diâmetro  $d_f$  da célula de cada um, mais o somatório da função  $f(n)$ , que expressa a evolução da distância entre foto-díodos, mantendo sempre uma distância  $l_f$  mínima entre cada um deles, e pelos ângulos  $\alpha_i$  e  $\alpha_f$  respetivamente do primeiro e último foto-díodo. A função  $f(n)$  será posteriormente definida, tendo em conta as simulações efetuadas.

O comprimento do tubo  $T$  é dado por,

$$T = \frac{d_f}{2 \tan(FOV_a)} \quad (3.16)$$

dependente do diâmetro da célula de recepção e do  $FOV_a$ .

No intuito de calcular o número de foto-díodos  $N_f$ , que inflige a melhor incerteza do ângulo calculado, simularam-se as variáveis em jogo, o  $FOV_a$  dos foto-díodos e da sua distribuição, expressa pela função  $f(n)$ .

O cenário de simulação é ilustrado na figura 3.14. O sensor é fixo na origem e o emissor percorre sobre o plano XZ conseguindo-se ainda visualizar o ângulo diretor de cada foto-díodo. Os parâmetros de simulação encontram-se na tabela 3.3.

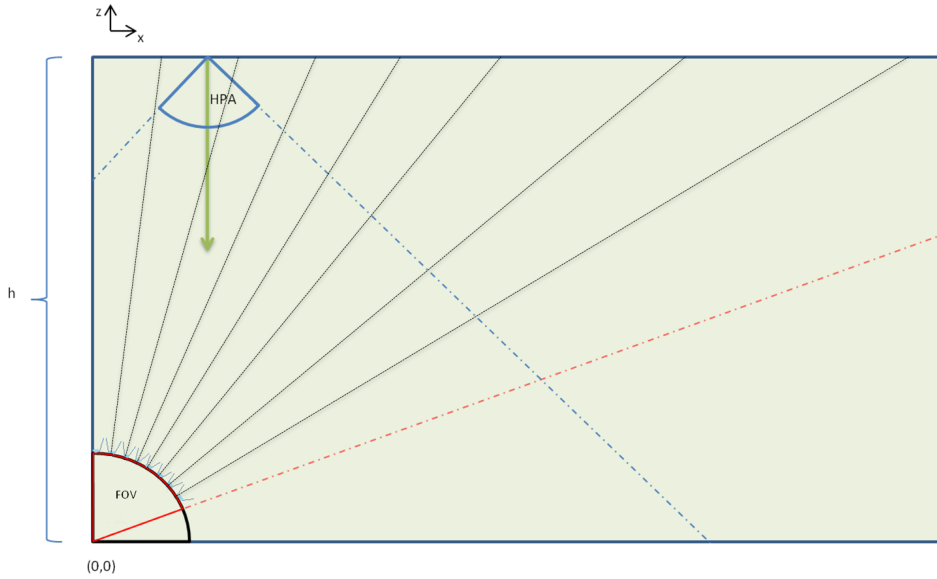


Figura 3.14: Cenário de simulação do número de foto-díodos  $N_f$ .

Variáveis	Valores
$A_f[m^2]$	1
$E_0[W]$	1
$FOV_a[^\circ]$	9
$HPA[^\circ]$	85
$N_f$	10
$d_f[mm]$	6
$l_f[mm]$	5
$\alpha_i[^\circ]$	90
$\alpha_f[^\circ]$	9

Tabela 3.3: Parâmetros de simulação na determinação do ângulo calculado e teórico.

Durante a simulação é sucessivamente calculada a posição do LED emissor considerando a potência de emissão  $E_0$  normalizada. Conhecendo a posição em que se encontra o emissor, é calculado o ângulo do emissor. No gráfico 3.15, o ângulo conhecido está assinalado a

vermelho, enquanto o ângulo calculado aparece a verde. O ângulo diretor de cada foto-díodo é identificado pelo símbolo \* azul.

É perceptível que, para variações de ângulos mais reduzidos, existe uma maior variação na distância a que se encontra o LED do sensor, resultante do facto dos ângulos inferiores terem uma maior área de captação.

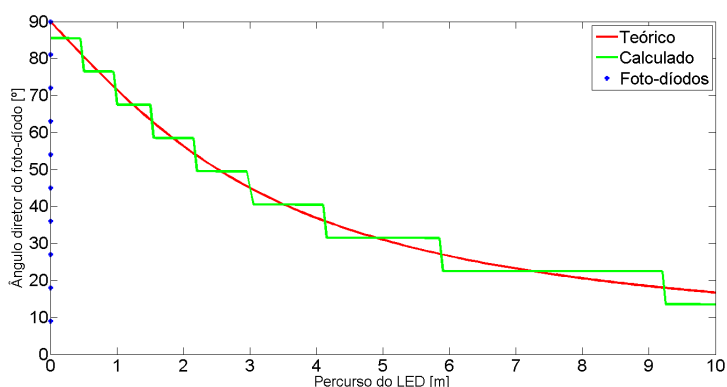


Figura 3.15: Ângulo calculado e teórico,  $FOV_a = 9^\circ$   $N_f = 10$ .

A evolução da incerteza do ângulo calculado é mostrado no gráfico 3.16, podendo constatar-se que quando se encontra mais afastado do sensor a incerteza aumenta. Além disso, torna mais suave a incerteza do ângulo.

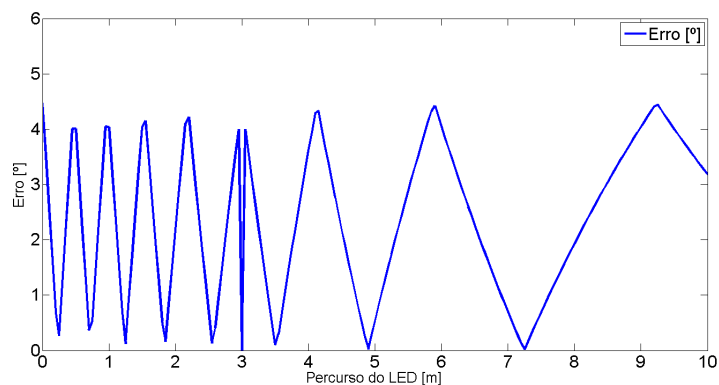


Figura 3.16: Incerteza entre ângulo calculado e o teórico.

Na seguinte figura 3.17, o gráfico apresenta a evolução da incerteza numa outra perspetiva. A incerteza começa a evoluir drasticamente para os ângulos mais pequenos, os últimos foto-díodos, verificando-se que se tornam mais importantes os foto-díodos com maior ângulo diretor.

Numa sala, os LEDs são colocados de modo a iluminarem o espaço todo sem que haja grandes variações de luminosidade, implicando que as distâncias entre LEDs não sejam

muito acentuadas.

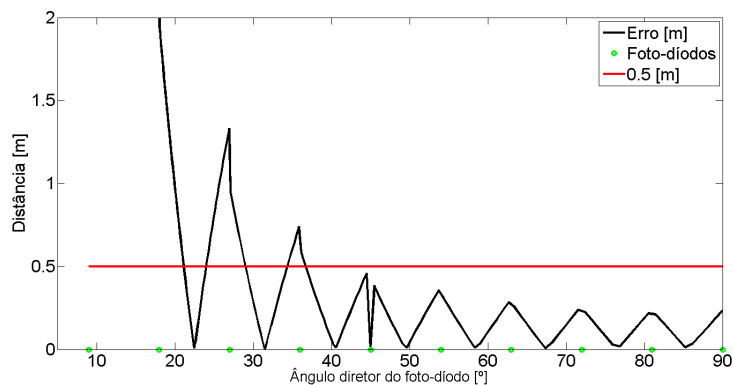


Figura 3.17: Erro provocado pela incerteza do ângulo calculado.

Após os resultados da simulação anterior conclui-se que o número  $N_f$  de foto-díodos máximo acontece quando a distância entre foto-díodos  $l_f$  é mínima, sendo o resultado  $N_f = 10$ . Contudo, como o  $FOV_a$  dos foto-díodos e as suas distribuições são fatores influentes na incerteza do ângulo calculado, o número máximo  $N_f$  possível para as dimensões físicas pretendidas não significa uma menor incerteza no ângulo. Neste âmbito, pretende-se simular o  $FOV_a$  e a sua distribuição espacial de acordo com diferentes disposições dos foto-díodos, nomeadamente a Linear (3.17), a Inversa (3.18) e a Neperiana (3.19).

$$f_1(n) = a(n - 1) + b; n \geq 1 \quad (3.17)$$

$$f_2(n) = \frac{-a}{n - (N_f + 1)} - \frac{a}{n} + b; n \geq 1 \quad (3.18)$$

$$f_3(n) = a \ln(n) + b; n \geq 1 \quad (3.19)$$

onde  $a$  é a constante de progressão e  $b$  a distância mínima pretendida entre foto-díodos.

Na figura 3.18 ilustram-se os vários cenários de simulação usando as distribuições anteriores. A primeira figura 3.18(a) ilustra-se a progressão decrescente e em 3.18(a) a crescente.

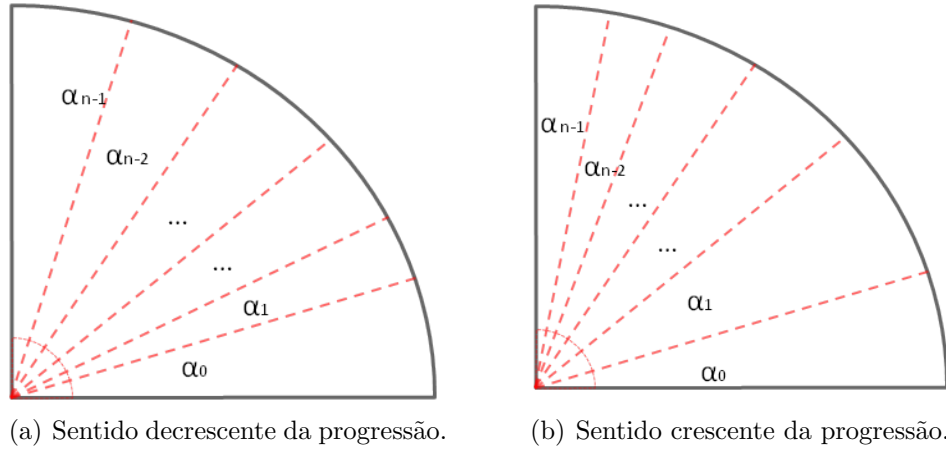


Figura 3.18: Distribuição da progressão dos foto-díodos.

As características tidas em conta na escolha do melhor  $FOV_a$  dos foto-díodos e na sua distribuição para uma maior precisão do ângulo calculado são: o erro médio e o erro máximo.

Os resultados obtidos encontram-se na tabela 3.4. É possível concluir que existe um erro médio e um  $FOV_a$  menor no caso da progressão decrescente. Na progressão crescente, os valores são sempre os mesmos, independentemente das funções usadas. Isto deve-se que ao facto de o melhor resultado se aproximar de uma função  $f(n) = b = l_f$ , onde a distância entre foto-díodos é sempre a mesma.

Quando se usa a progressão decrescente é visível que existe em média um erro e um  $FOV_a$  mais confinado.

A função que introduz menor erro máximo e médio é a Neperiana (3.19). Estes valores estão presentes na tabela 3.4. Este melhor desempenho devesse essencialmente à redução das áreas abrangidas por cada foto-díodo, quando se reduz a distância entre eles de acordo com a função da progressão.

$f(n)$	Prog.	$E_{max} [^\circ]$	$E_{med} [^\circ]$	$FOV_a [^\circ]$	$a \cdot 10^{-3}$	$R_i [cm]$	$T [cm]$	$R_e [cm]$
$f_1(n)$	cres.	3.3008	1.3315	7.61760	0.00	7.68	3.14	10.82
	deces.	3.9895	1.2319	7.16180	0.74	9.15	3.34	12.49
$f_2(n)$	cres.	3.3008	1.3315	7.61760	0.00	7.68	3.14	10.82
	deces.	4.7636	1.2792	7.47060	4.40	8.22	3.20	11.42
$f_3(n)$	cres.	3.3008	1.3315	7.61760	0.00	7.68	3.14	10.82
	deces.	3.2900	1.2229	7.41180	1.90	9.13	3.23	12.36

Tabela 3.4: Resultados obtidos das funções usadas nas varias progressões simuladas.

O Resultado que devolve a melhor configuração pode ser visível nos seguintes gráficos tridimensionais da figura 3.19, em que as variáveis de simulação são o  $FOV_a$  e o ganho  $a$  da função  $f_3(n)$ .

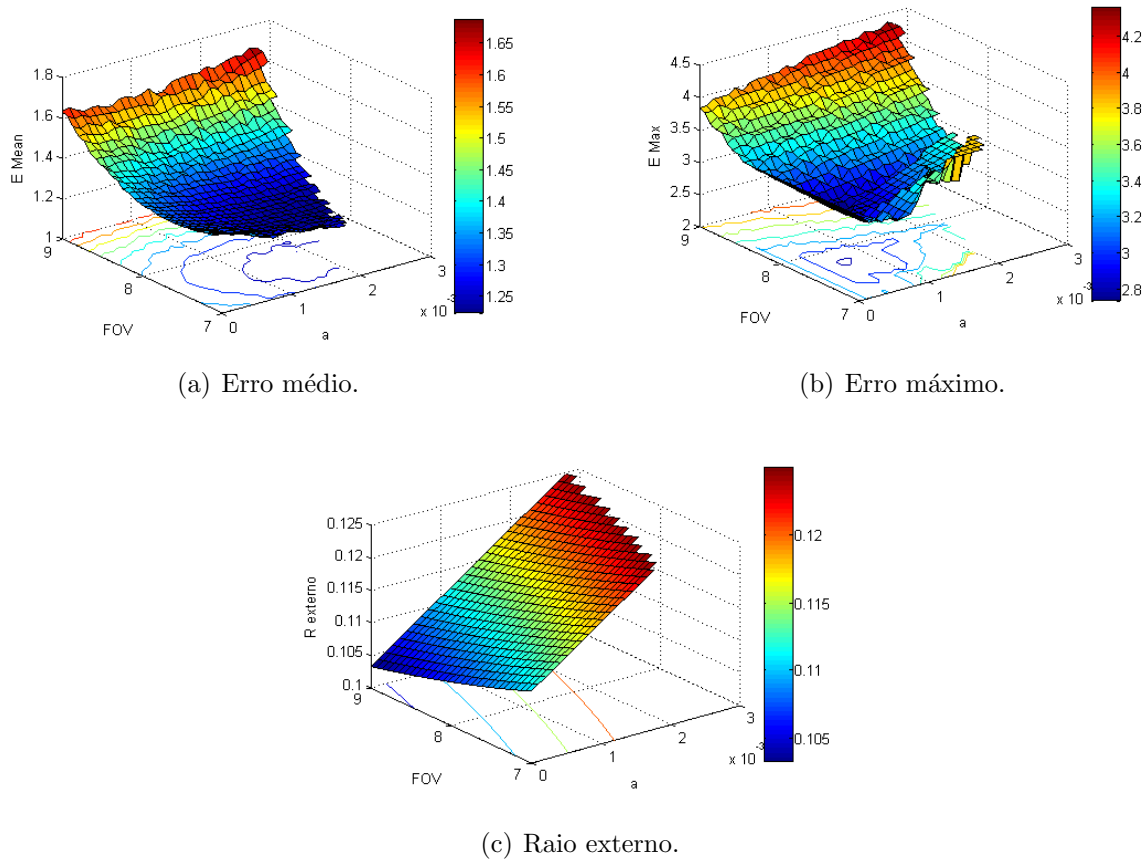


Figura 3.19: Distribuição da progressão do foto-díodos.

Analisando os gráficos 3.19(a) e 3.19(b), existem dois pontos mínimos onde o erro médio e máximo são os que devolvem a menor incerteza no ângulo calculado. Contudo, os pontos não se encontram nas mesmas zonas, tendo de haver um ponderação na sua escolha. Optou-se pelo resultado do erro médio por ser um dos factos mais importante.

E na 3.19(c), a evolução do raio externo  $R_e$  dependendo do  $FOV_a$  e do ganho  $a$ . Os gráficos das restantes funções encontram-se no anexo A. Encontrada a distribuição e a progressão dos foto-díodos, apresentam-se os valores dos respetivos ângulos diretores dos foto-díodos na seguinte tabela 3.5.

Foto-díodos	1. <sup>o</sup>	2. <sup>o</sup>	3. <sup>o</sup>	4. <sup>o</sup>	5. <sup>o</sup>	6. <sup>o</sup>	7. <sup>o</sup>	8. <sup>o</sup>
Ângulo [°]	90.00	79.10	68.35	57.79	47.45	37.38	27.65	18.41

Tabela 3.5: Resultados da melhor configuração dos foto-díodos.

### 3.4.3 Simulação em três dimensões do sensor

Nas secções anteriores as simulações estavam restritas a duas dimensões, passando agora para três dimensões no intuito de visualizar o sensor num mundo real.

Serão ilustradas algumas simulações para se aceder ao campo de visão captado pela integração completa dos foto-díodos com as distribuições simuladas anteriormente. Serão apresentados também algumas simulações dos erros provocados pela incerteza do ângulo calculado.

#### Campo de visão do sensor em três dimensões

Na figura 3.20 mostra-se o resultado da simulação em três dimensões da integração completa do sensor e o seu alcance de captação quando se encontra fixo na origem. Como se pode verificar, tem um alcance próximo de 16 metros e cobre uma secção lateral de 2 metros. A área captada por cada foto-díodo é representada por superfícies de círculos. A quantidade de área captada por cada foto-díodo é distinta, sendo maior quanto menor for o ângulo diretor de cada foto-díodo. Para que houvesse uma melhor resolução na estimativa do ângulo do emissor, seria uniformizar a área coberta por cada foto-díodo. Contudo, neste sensor não foi possível devido as restrições iniciais de dimensionamento do sensor.

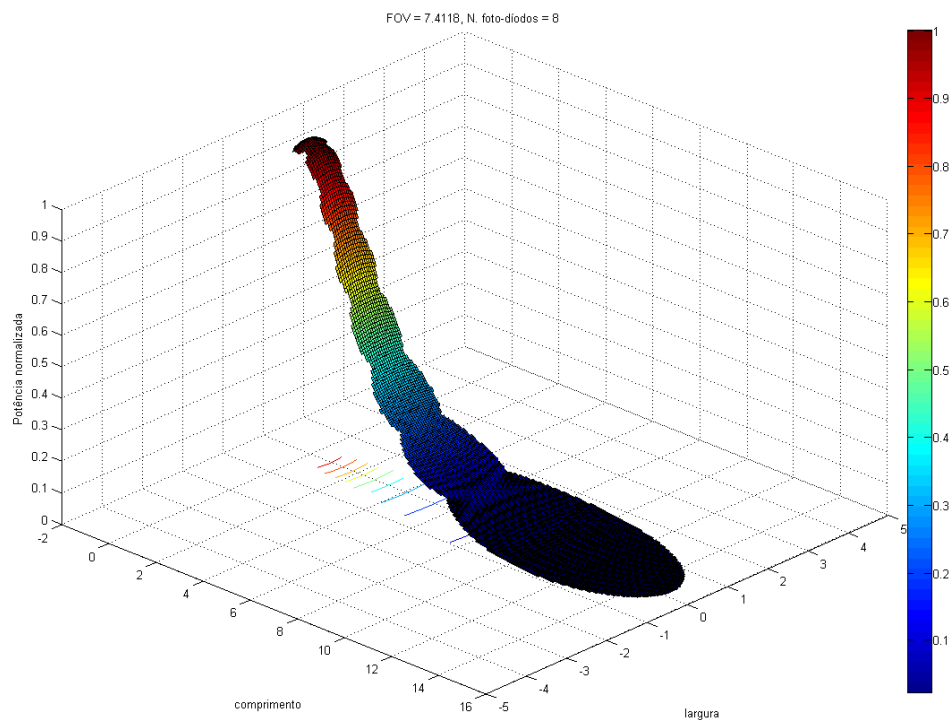


Figura 3.20: Campo de visão e alcance do sensor em três dimensões.

Após a percepção do campo de visão do sensor de localização, é interessante simular o erro provocado pela incerteza do ângulo calculado do emissor.



Na simulação seguinte utilizou-se uma sala de  $4 \times 4$  [ $m^2$ ] de área e de 3 metros de altura, sendo colocado o sensor no centro daquele espaço, na posição  $(0,0)$  a azul. No intuito de verificar como o sensor vê o "mundo" simulou-se ponto a ponto, os emissores (LEDs) em varias posições na sala. Sendo a vermelho os LEDs e a verde a estimativa da posição calculada do emissor pelo sensor. Mostrando-se na figura 3.21, como é interpretado o "mundo" para o sensor, colocando todas as coordenadas calculadas sobre circunferências com raios cada vez maiores entre elas quando se afastam da posição do sensor.

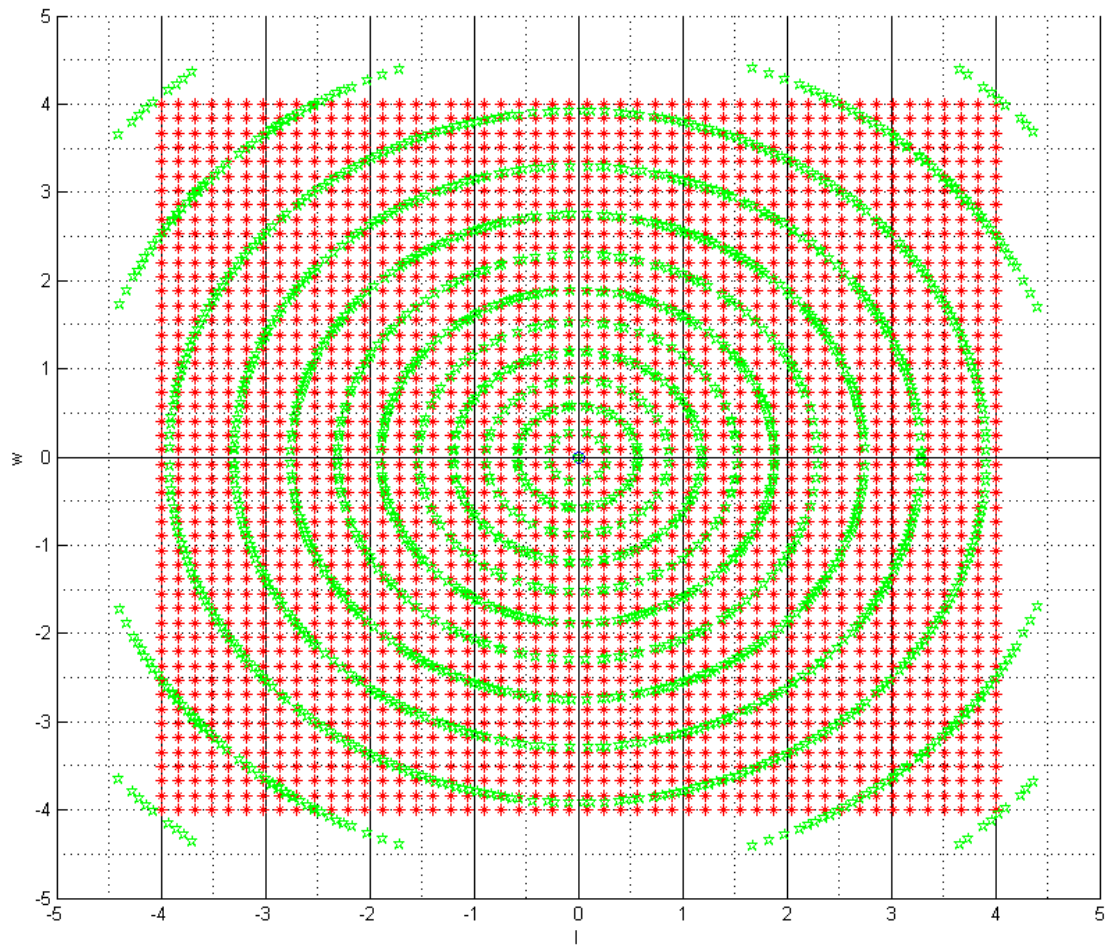


Figura 3.21: Simulação do erro espacial do sensor.

Durante a simulação, o erro gerado é calculado pela diferença entre a posição teórica, que se conhece *a priori* do emissor LED, e a estimada, que é calculada a partir da potência de sinal captada pelos foto-díodos, como se ilustra na figura 3.22.

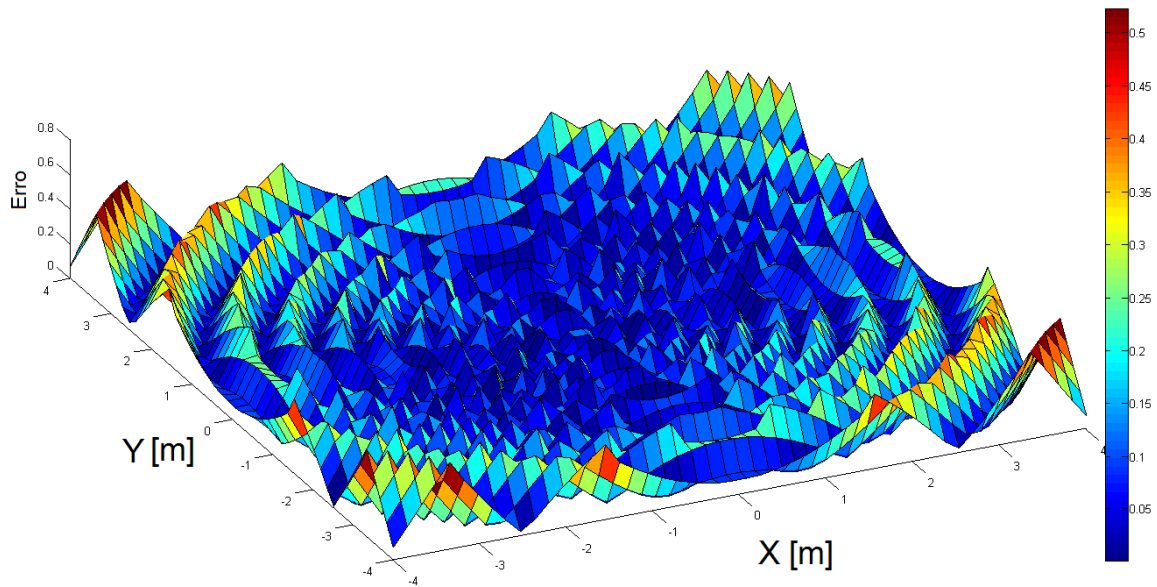


Figura 3.22: Gráfico do erro da posição provocado pela incerteza do ângulo calculado.

### 3.5 Considerações sobre o planeamento e simulação do sensor

Nas considerações sobre o planeamento e simulação do sensor existem vários fatores a ter em conta, relacionados essencialmente com as dimensões físicas possíveis para se projetar/simular o sensor de localização de interiores, com o número de foto-díodos necessários e suficientes para se desenvolver/simular um sensor capaz de calcular o ângulo de onde é captado o sinal emitido pelo emissor, a distribuição dos foto-díodos ao longo do seu arco de suporte e ainda o controlo do  $FOV_a$  dos foto-díodos.

# Capítulo 4

## Protótipo do sensor de localização

*”Nenhum homem realmente produtivo pensa como se estivesse escrevendo uma dissertação.” - Albert Einstein*

### *Sumário*

*Ao longo deste capítulo serão apresentados os circuitos que constituem o sensor. Falar-se-á do emissor auxiliar para a realização e comprovação de testes, do recetor para a recepção do sinal, cálculo do ângulo emissor e detecção da frequência. Por fim, abordar-se-á o desenho e construção do arco de suporte e controlo do campo de visão (FOV) dos foto-díodos.*

Feita a análise do tipo de sensor a desenvolver no capítulo 3, com capacidade de captar/receber sinal proveniente de uma fonte luminária, designadamente o LED, e depois de se ter ponderado sobre o modelo recetor, procedeu-se à simulação dos vários intervenientes no processo até ao sensor final.

Neste capítulo, serão tratados os circuitos intervenientes na construção do sensor. Neste sentido, será descrito o emissor teste com capacidade de transmissão de informação e a sua importância nos testes e comprovação de resultados do sensor. Enquadra-se o recetor elaborado, tendo como premissas a sua replicação e integração no arco de suporte e controlo do campo de visão dos foto-díodos.

No final do capítulo, explora-se a transição do esboço para o protótipo do sensor de localização em espaços interiores por luz visível. Surgirá, em paralelo, o desenho da estrutura do arco em *SolidWorks*<sup>1</sup> e a sua impressão em três dimensões, respeitando as dimensões físicas do sensor e da impressora.

## 4.1 Circuito de emissão auxiliar

O emissor desenvolvido nesta dissertação teve como objetivo principal simular um luminária com capacidade de transmissão da sua identificação. Desta forma promove-se o teste dos recetores do sensor e comprova-se os resultados simulados.

### 4.1.1 Princípio de funcionamento e esquema elétrico

O circuito ilustrado na figura 4.1 foi desenhado de modo a funcionar como um interruptor. O circuito dos LEDs encontra-se fechado quando se aplica um sinal positivo na *Porta* do MOSFET, e aberto quando se utiliza um sinal nulo, de forma a controlar a corrente que atravessa os LEDs.

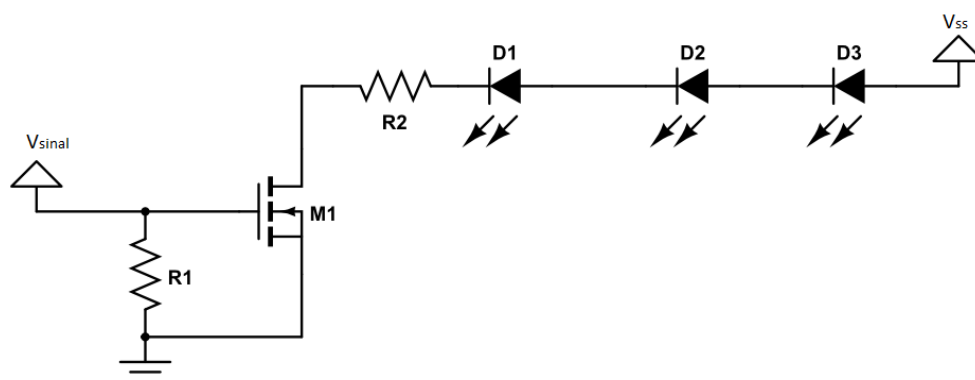


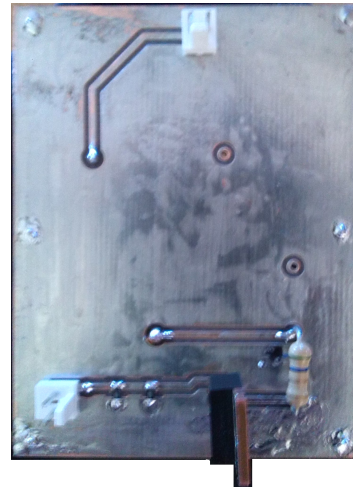
Figura 4.1: Circuito emissor de teste.

<sup>1</sup>*Software* baseado em computação paramétrica, criando formas tridimensionais a partir de formas elementares.

Este circuito é constituído por três LEDs, com o objetivo de ter uma maior potência de emissão. Estes são controlados por um MOSFET ( $M_1$ ), formado por quatro terminais: a *Porta*, onde é aplicado o sinal  $V_{sinal}$  desejado para controlo dos LEDs; o *Dreno*, por onde flui a corrente dos LEDs, limitada pela resistência  $R_2$  e a tensão  $V_{ss}$ ; o *Substrato* e a *Fonte*, que se encontram conectados à terra. Na adaptação da impedância de entrada são colocadas duas resistências em paralelo resultando na  $R_1$ . De seguida, são apresentadas as imagens (figura 4.2) do resultado final do circuito emissor. O desenho da PCB encontra-se no anexo B.1.



(a) Circuito superior do emissor.



(b) Circuito inferior do emissor.

Figura 4.2: Aspeto físico do circuito emissor de teste.

Na primeira imagem (figura 4.2(a)) é apresentada a parte superior do circuito de emissão dos LEDs. A disposição apresentada visa reduzir a distância entre LEDs para que não seja afetado o erro de posição no sensor. Na segunda imagem (figura 4.2(b)) são apresentados os restantes dos componentes:  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $M_1$  e os conetores. Os valores dos componentes utilizados na construção do emissor encontram-se na seguinte tabela (4.1).

Componentes	Especificação
LED[38]	Dragon-X Plus $DX01 - W4F - 854$
$2 \times R_1$	$100 [\Omega] @ 1/4[W]$
$R_2$	$5.6 [\Omega] @ 1/2[W]$
$M_1$ [39]	$IRF510$

Tabela 4.1: Componentes usados na construção do emissor.

## 4.2 Circuito elétrico do sensor

O circuito recetor desenvolvido durante este trabalho tem como objetivo comprovar o conceito e os resultados obtidos no capítulo 3. Pretende-se mostrar a capacidade de cálculo do ângulo a que se encontra o emissor, através da potência de sinal recebido por cada foto-díodo e o algoritmo implementado no microcontrolador. Analisa-se igualmente a identificação da frequência de comutação do LED, com recurso a um algoritmo implementado no microcontrolador (PIC32) em uso. Avalia-se ainda a frequência calculada a partir, única e exclusivamente, do foto-díodo com maior potência recebida.

### 4.2.1 Princípio de funcionamento e esquema elétrico

O esquema geral do circuito desenvolvido para o sensor de localização em espaços interiores por luz visível é apresentado na figura 4.3.

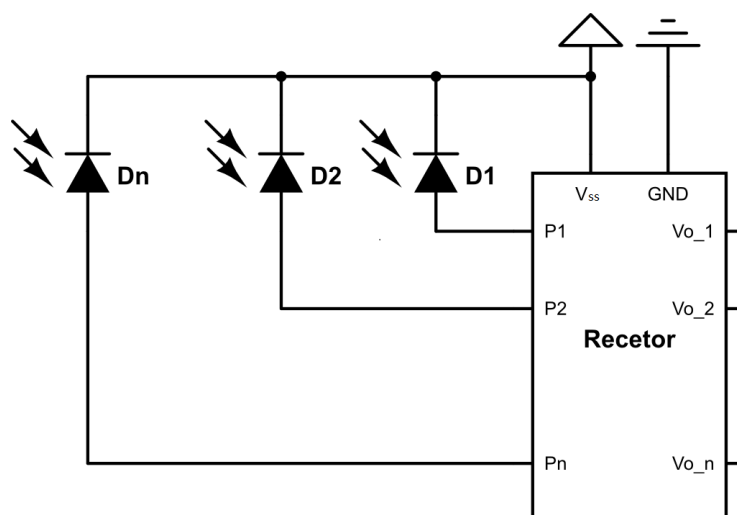


Figura 4.3: Esquema geral do circuito recetor do sensor de localização.

Pode-se conferir que todos os foto-díodos partilham da mesma tensão de alimentação  $V_{ss}$ . A corrente proveniente dos foto-díodos é recebida pelas portas  $P_n$ , onde  $n$  identifica o número do foto-díodo. O circuito recetor do sensor é constituído por oito circuitos, todos iguais, com a capacidade de ler a corrente proveniente de cada foto-díodo e filtrar o sinal DC. Esta leitura é tratada, individualmente e em paralelo, por cada circuito através de um microcontrolador (PIC32). Será explicado de seguida o circuito de leitura de um só foto-díodo.

### 4.2.2 Circuito de receção

O circuito elementar de leitura de um foto-díodo é apresentado na figura (4.4). Quando existe incidência de luz sobre os foto-díodos, produz-se uma corrente proporcional à

intensidade de luz recebida por cada foto-díodo. A corrente produzida é na ordem dos  $[\mu A]$ . Em contrapartida, como o microcontrolador (PIC32) em uso não tem capacidade de precisão para medir correntes de tal ordem é necessário um estágio de amplificação. O foto-díodo, como já tinha sido mencionado anteriormente, capta toda a luz dentro do seu campo de visão, sendo necessário adicionar ao circuito um filtro capaz de filtrar sinal DC.

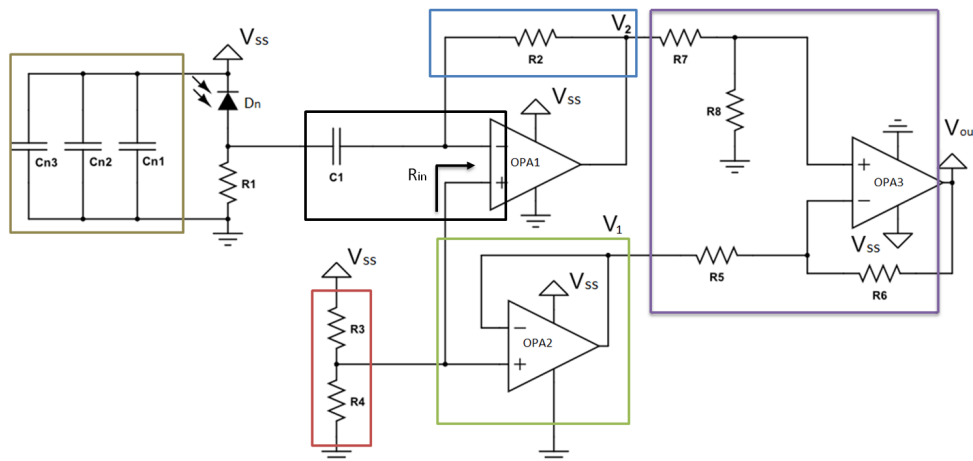


Figura 4.4: Circuito de recepção de um foto-díodo.

Na figura anterior encontram-se identificadas 6 configurações importantes na recepção, com amplificação e filtragem do sinal recebido pelo foto-díodo.

Serão de seguida apresentadas algumas das configurações do circuito recetor, identificadas por cores diferentes:

A castanho, os condensadores  $C_{n1}$ ,  $C_{n2}$  e  $C_{n3}$ , com ordens de grandeza diferentes, encontram-se ligados diretamente da tensão de alimentação ao GND para filtragem de picos de tensão e anomalias provenientes da fonte de alimentação.

A preto, o filtro DC, formado pela resistência  $R_{in}$  vista pelo amplificador de transimpedância e o condensador  $C_1$ , para eliminar sinais constante. Caso a corrente que flua pelo foto-díodo seja constante, fluirá unicamente pela resistência  $R_1$ . A frequência de corte  $f_c$  pode ser expressa pela equação 4.1.

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{in} C_1} \quad (4.1)$$

A azul, o maior ganho do circuito de amplificação do sinal encontra-se no amplificador de transimpedância dado por  $R_2$ , onde a corrente é amplificada em forma de tensão pela resistência  $R_2$ , sendo o ganho dado por  $G = -R_2$ .

A roxo, este circuito é conhecido por amplificador de diferença, onde o sinal de saída será a diferença entre o sinal  $V_2$  (sinal amplificado do amplificador de transimpedância) aplicado na resistência  $R_7$  e o sinal  $V_1$  (tensão de *offset*) aplicado na resistência  $R_5$ . Tensão de saída é dada pela equação:

$$V_{out} = V_2 \frac{(R_6 + R_5)R_8}{(R_8 + R_7)R_5} - V_1 \frac{R_6}{R_5} \quad (4.2)$$

escolhendo  $R_8$  e  $R_6$  iguais a  $R_7$  e  $R_5$ , a expressão anterior simplifica-se,

$$V_{out} = \frac{R_8}{R_7}(V_2 - V_1) \quad (4.3)$$

Contudo, a equação 4.3 mostra que se pode fazer a diferença de sinais e amplificá-los ao mesmo tempo, quando se mantêm a condição mencionada anteriormente do par das resistências.

A verde, o *buffer* de tensão, utilizado usualmente para isolar e conectar outros estágios, com capacidade de apresentar a mesma tensão na saída quando aplicada na entrada, é usado porque pretende-se colocar a tensão *offset* na saída do *buffer* quando aplicada na sua entrada. Tudo isto só é possível por causa da alta impedância de entrada do *buffer*, fazendo com que não haja excursão de corrente. O *buffer* é também conhecido por seguidor de tensão pela mesma razão apresentada acima.

A vermelho, o divisor resistivo apresentado serve para afastar o sinal lido pelo amplificador de transimpedância das tensões de alimentação:  $V_{ss}$  e GND. A tensão  $V_1$  é dada pelas resistências  $R_3$  e  $R_4$  na seguinte expressão matemática,

$$V_1 = V_{ss} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (4.4)$$

As tensões de referência usadas são as do microcontrolador, tais como  $V_{ss} = 3.3[V]$  e GND. Os restantes valores usados no circuito recetor de um foto-díodo encontram-se apresentados na tabela 4.2.

Componentes	Especificação
$C_{n1}$	10 [ $\mu F$ ]
$C_{n2}$	10 [ $nF$ ]
$C_{n3}$	10 [ $pF$ ]
$R_1$	100 [ $K\Omega$ ] @ 1/4[W]
$C_1$	10 [ $nF$ ]
$R_2$	1 [ $M\Omega$ ] @ 1/4[W]
$R_3$	1 [ $K\Omega$ ] @ 1/4[W]
$R_4$	1 [ $K\Omega$ ] @ 1/4[W]
$R_5$	100 [ $\Omega$ ] @ 1/4[W]
$R_6$	1 [ $K\Omega$ ] @ 1/4[W]
$R_7$	100 [ $\Omega$ ] @ 1/4[W]
$R_8$	1 [ $K\Omega$ ] @ 1/4[W]
OPA1[40]	OPA381
OPA2[41]	LMV796
OPA3[41]	LMV796
$D_n$ [42]	SFH213

Tabela 4.2: Componentes usados no circuito recetor de um foto-díodo.



A na figura 4.5 é apresentado a fotografia real do recetor de um único foto-díodo, o desenho da PCB pode ser encontrada no anexo B.2.

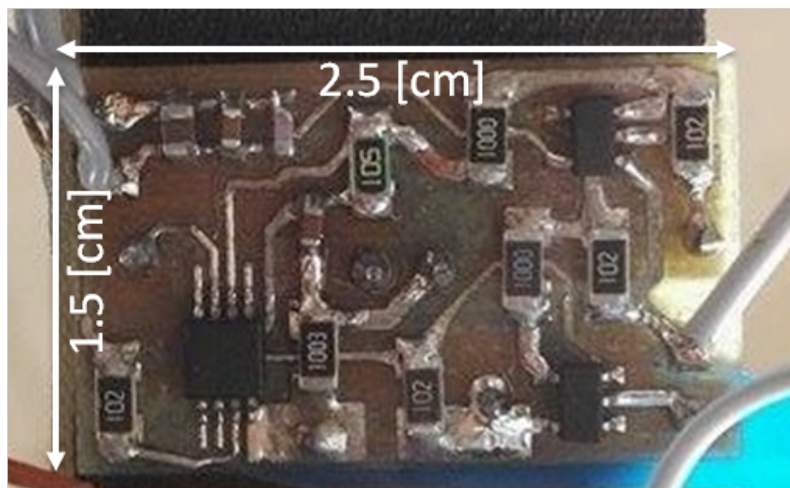
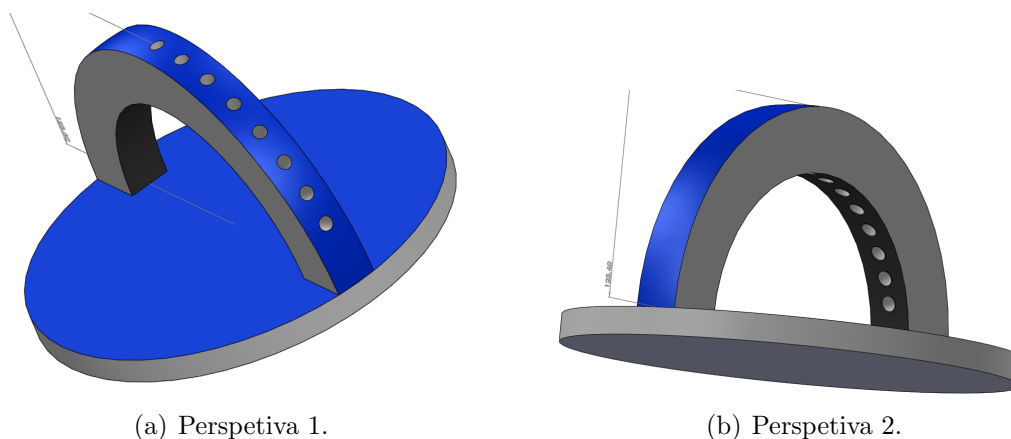


Figura 4.5: Aspeto físico do circuito recetor do foto-díodo.

### 4.3 Desenvolvimento da estrutura do sensor e a integração dos recetores

Durante o trabalho realizaram-se algumas pesquisas e simulações para o projeto do sensor a desenvolver. Após alguns desses testes e simulações do sensor determinaram-se as dimensões e a sua configuração mais adequada, simulada na secção 3.4.2, o suporte foi realizado com recurso ao programa *SolidWorks*. A figura 4.6 torna visível o desenho tridimensional do sensor em duas perspetivas diferentes.



(a) Perspetiva 1.

(b) Perspetiva 2.

Figura 4.6: Protótipo da estrutura do sensor.

Posteriormente, procedeu-se à sua impressão em três dimensões no Instituto Telecomunicações. Verificou-se que não era possível imprimir apenas numa única peça, sendo necessária a fragmentação do arco em três semi-arcos (figura 4.7), com a exigência de não afetar a estrutura.

A base do sensor não foi impressa em três dimensões devido ao tempo que levava a impressão de uma peça e pelo custo que acarretava, sendo realizada em madeira.

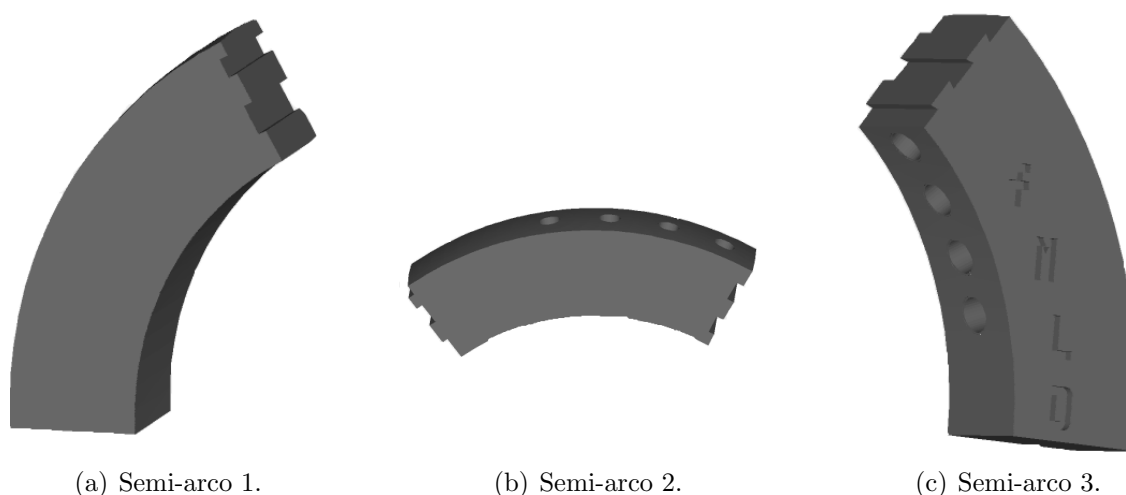


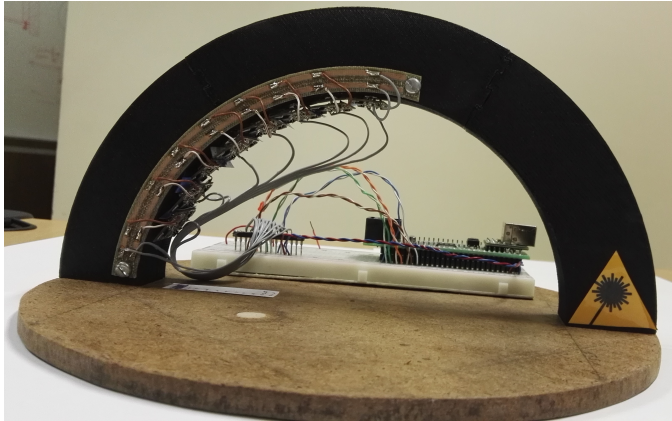
Figura 4.7: Fragmentação da estrutura do arco.

A impossibilidade de imprimir tudo numa única peça comporta algumas anomalias (tabela 4.3) relacionadas com os ângulos dos respetivos foto-díodos. Estes serão afetados devido à fragmentação do arco e à imprecisão da impressora 3D.

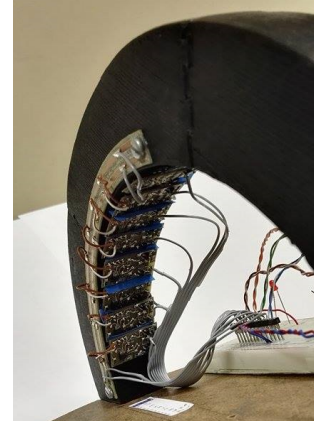
Foto-díodos	1. <sup>o</sup>	2. <sup>o</sup>	3. <sup>o</sup>	4. <sup>o</sup>	5. <sup>o</sup>	6. <sup>o</sup>	7. <sup>o</sup>	8. <sup>o</sup>
Ângulo Teo.[°]	90.00	79.10	68.35	57.79	47.45	37.38	27.65	18.41
Ângulo Pra.[°]	90.00	79.00	68.50	58.50	48.00	37.50	27.50	18.00

Tabela 4.3: Ângulos teóricos e práticos do arco.

Em paralelo à impressão 3D dos semi-arcos foram realizadas as replicas dos oito circuitos de receção dos foto-díodos.



(a) Perfil do sensor.



(b) Disposição dos foto-díodos.

Figura 4.8: Sensor de localização em espaços interiores desenvolvido.

Após a conclusão da impressão dos semi-arcos e das replicações dos circuitos, passou-se para a integração completa de todos os elementos responsáveis no sensor final (figura 4.8 e anexo C).

## 4.4 Considerações dos protótipos finais

A construção de um sensor de localização em espaços interiores por luz visível, exige a contemplação de inúmeros fatores, cuidados e medidas cruciais para a sua finalização, relacionados com o emissor auxiliar, com os recetores dos foto-díodos, com o arco de suporte e com a integração destes componentes. Neste sentido, teve-se o cuidado de adaptar o circuito de entrada a  $50[\Omega]$  no emissor auxiliar, além de se ter um cabo de conexão entre o gerador de sinais e o circuito adaptado a  $50[\Omega]$ . Mais concretamente, esta adaptação teve como meta a união dos dois tipos de material para que houvesse um coeficiente de reflexão nulo, fazendo com que não existisse reflexão do sinal para o gerador ou atenuação do sinal na passagem. Além disso, colocou-se um dissipador no MOSFET para se poder dissipar energia em forma de calor, evitando que os MOSFETs se queimassem. Nos circuitos recetores dos foto-díodos, existiu a preocupação de colocar condensadores de ordens de grandeza diferentes para filtrar eventuais picos provenientes da fonte de alimentação do microcontrolador. Além dos estágios de amplificação do sinal, colocou-se um filtro para rejeitar sinais DC provenientes de fontes não desejadas. No que toca à construção do circuito em si, foram inúmeras as dificuldades para soldar os componentes, resultantes das suas dimensões e também por causa de serem soldas frias. No arco de suporte e controlo do FOV dos foto-díodos, teve-se o cuidado de respeitar as dimensões durante a simulação: dimensões do tubo (que controla o FOV do foto-díodo), as distâncias entre os foto-díodos, o diâmetro dos foto-díodos e a dimensão máxima de raio do arco. Uma das dificuldades encontradas durante o processo da realização do arco foi a sua fragmentação em três, como

já referido, o que se traduziu me erros na disposição dos ângulos diretores dos foto-díodos. Deu-se por finalizado o sensor quando se integraram todos os circuitos recetores no arco construído e se fizeram todas as ligações diretas ao microcontrolador. Durante este processo tiveram-se cuidados especiais nas ligações de alimentação e GND dos circuitos recetores, encontrado-se todos ligados em paralelo para, no caso de um falhar, não prejudicar os seguintes, o que aconteceria se estivessem em série. Na figura 4.8 é possível verificar como foi feita a ligação das tensões de alimentação.

# Capítulo 5

## Resultados e Análise

*”Pequenas mudanças podem fazer grande diferença e gerar excelentes resultados.” -  
Surama Jurdi*

### *Sumário*

*Neste capítulo serão comprovadas as simulações via MatLab apresentadas no capítulo 3. Referir-nos-emos à integração do sinal recebido dos foto-díodos, do cálculo do ângulo de emissão dos LEDs e da detecção da frequência do sinal emitido. Será descrito o ambiente experimental de teste e também os componentes utilizados. Seguidamente serão analisados os resultados dos teste elaborados com base nos conceitos que definem o comportamento do emissor e sensor.*

## 5.1 Descrição do ambiente experimental de teste

Após a criação do sensor de localização em espaços interiores por luz visível, pretende-se criar um cenário de teste, semelhante ao usado nas simulações, para comprovação do conceito demonstrado. Neste âmbito, o cenário de teste ilustrado na figura 5.1 permite identificar o espaço de teste (laboratório do Instituto de Telecomunicações), o sensor e o emissor. Este espaço, com uma altura de 2.78 metros e uma área de  $6.30 \times 4.80[m^2]$ , foi utilizado na realização de três testes práticos que se encontram na secção 5.2. O sensor construído sobre uma mesa de 60 centímetros, com rodas para uma melhor deslocação, perfazendo uma distância mínima entre emissor e sensor de 2.18 metros.

Os dados recebidos pelo sensor, apresentados na secção seguinte, foram tratados no próprio microcontrolador e enviados para o PC, através de um protocolo *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART) e com ajuda de um *software* de emulação de terminal (*PuTTY*) para leitura dos dados tratados no *MatLab*.

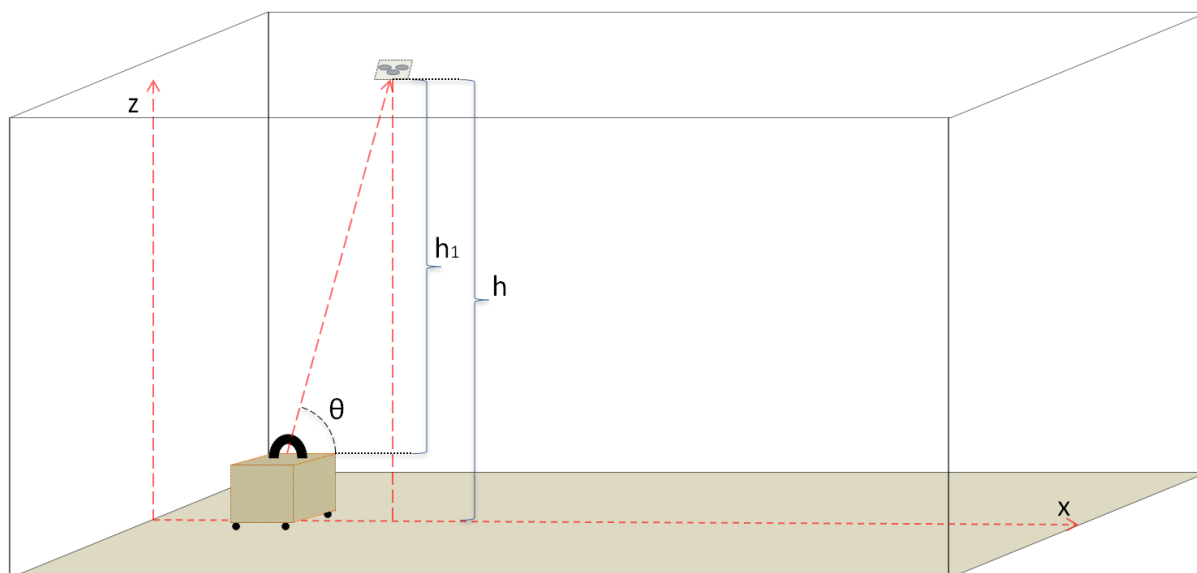


Figura 5.1: Cenário de teste do sensor no mundo real.

## 5.2 Resultados

Um dos primeiros testes elaborados depois da conclusão final do sensor é ilustrado no cenário da figura 5.1. O teste consistiu em retirar amostras do sinal de tensão máxima de cada foto-díodo lido pela PIC32 do sensor a cada  $5[cm]$ . O sensor foi colocado sobre uma linha imaginária (vermelho tracejado, na imagem acima), percorrendo  $315[cm]$ , desde os  $-40[cm]$  até os  $275[cm]$ , depois de colocar o emissor com os foto-díodos dispostos no sentido contrário ao seu movimento.

O microcontrolador (PIC32) encontrava-se essencialmente a fazer leituras (durante aproximadamente  $6.6[ms]$ ), além dos cálculos internos do sinal, a uma frequência de amos-

tragem  $150[KHz]$ , num número total de 1000 amostras. Depois da leitura de todas as amostras, registou-se o sinal normalizado por cada foto-díodo. Os resultados são apresentados no gráfico da figura 5.2.

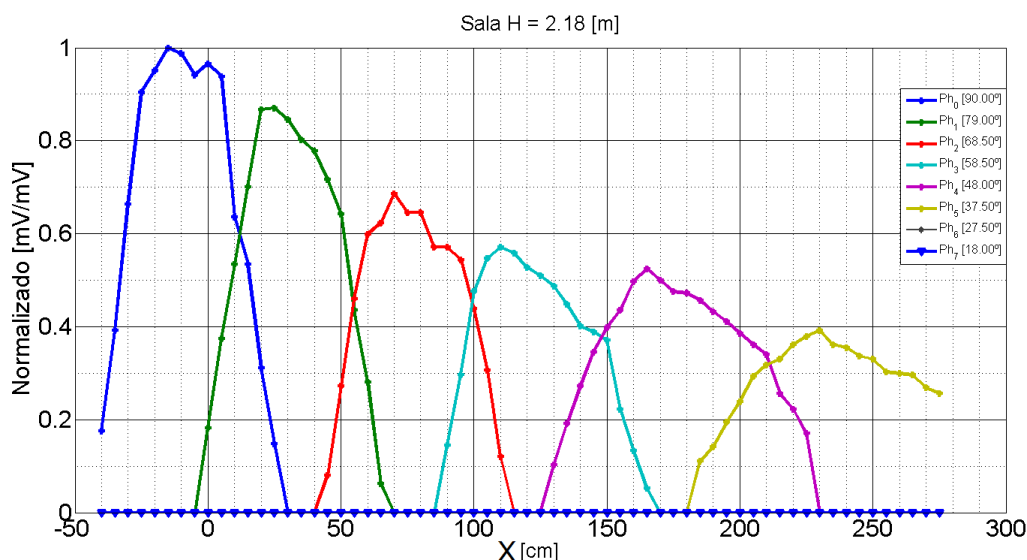
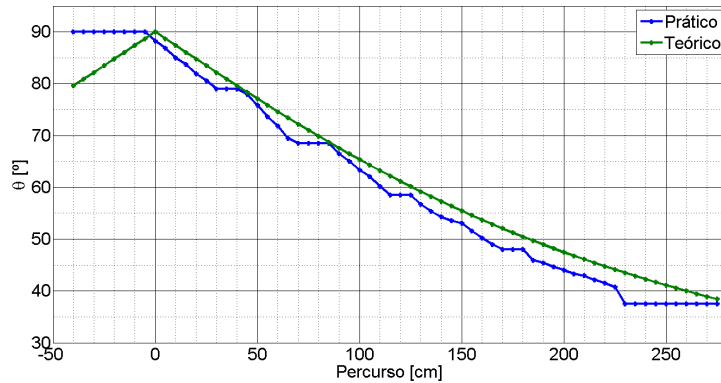


Figura 5.2: Curva de sinal recebido pelos foto-díodos do sensor.

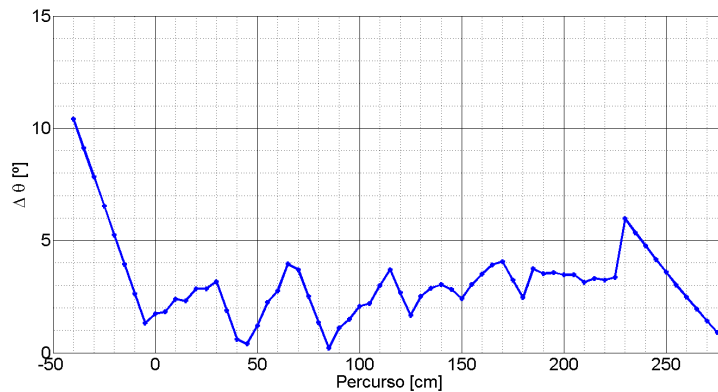
No gráfico estão representados unicamente os seis primeiros foto-díodos a receber sinal no percurso do teste realizado, uma vez que o emissor se encontrava a uma distância da parede de 2.80 metros e não permitia recolher informação dos restantes dois recetores (foto-díodos).

Este resultado vem ao encontro das simulações apresentadas no capítulo 3, chegando-se ao mesmo tipo de conclusões: 1) a intensidade do sinal é proporcional à distância entre o emissor e o sensor, ou seja, quanto mais curta a distância mais intenso é o sinal. Verifica-se uma intensidade máxima quando o emissor se encontra sobre o sensor (linha azul no gráfico); 2) o emissor torna-se mais visível num percurso maior, quando o ângulo diretor do foto-díodo é mais pequeno, decaindo a intensidade do sinal recebido quando nos afastamos do emissor; 3) não existe descontinuidade da receção do sinal, uma vez que a área é toda coberta e visível por algum foto-díodo, como se ilustra no gráfico (figura 5.2).

Na segunda experiência foi feito o mesmo teste, agora com objetivo de calcular o ângulo a que se encontra o emissor, com o recurso do algoritmo (anexo D) presente no microcontrolador. Nos gráficos seguintes são apresentados os resultados do ângulo prático/estimado e o real (figura 5.3(a)), visualizando-se o erro cometido pelo algoritmo no gráfico 5.3(b).



(a) Ângulo teórico e prático calculado.



(b) Erro cometido no cálculo do ângulo prático.

Figura 5.3: Resultado comparativo entre ângulo teórico e calculado.

No gráfico 5.3(a), a linha azul identifica o ângulo calculado pelo sensor e a verde o ângulo teórico, verificando-se que o ângulo calculado encontra-se sempre abaixo do teórico. Quando o caminho a percorrer do sensor é no sentido dos foto-díodos, distanciando-se do emissor, identifica sempre o ângulo calculado de  $90^\circ$ , como se indica no gráfico. Isso deve-se exclusivamente ao facto de ser só o foto-díodo do cima a vê-lo. Existem pontos no percurso onde se verifica o mesmo ângulo quando o sensor se desloca, uma vez que é visível apenas por um foto-díodo, tal como no início e final da experiência.

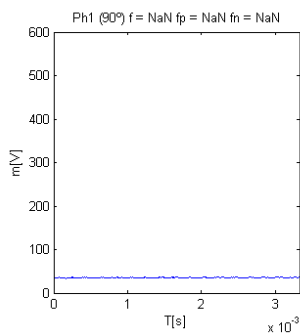
No segundo gráfico (figura 5.3(b)) é apresentado o módulo do erro entre o ângulo prático e o teórico. Aqui verifica-se que existe maior incerteza/erro nas extremidades do sensor, por ser só um foto-díodo a receber o sinal do emissor. Contudo, era esperado que o erro fosse maior no início e que começasse a aumentar quando se afastasse do emissor pelas mesmas razões apresentadas anteriormente, tendo como seguro que a incerteza é mais pequena quando o foto-díodo respetivo se encontra colinear<sup>1</sup> com o emissor. Apesar disso, o erro que é apresentado no percurso negativo do gráfico é resolvido se o sensor rodar em

<sup>1</sup>Que se encontra sobre a mesma reta imaginária.

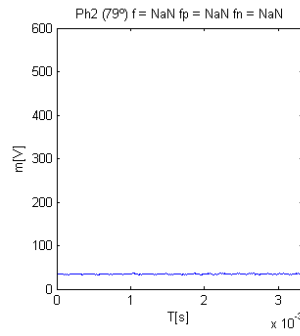


seu torno.

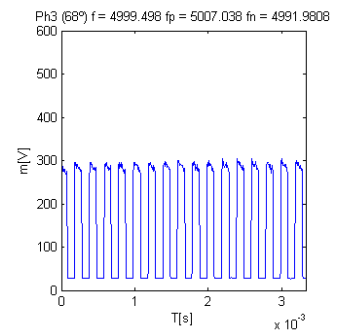
Pretendia-se, com a realização do terceiro teste, determinar o ângulo e a frequência de comutação do foto-díodo que recebesse maior sinal. Para isso, colocou-se o sensor sobre a mesma linha de visão do emissor a uma distância de um metro, tendo um ângulo teórico de  $\theta_T = \arctan\left(\frac{2.18}{1}\right) = 65.36[^\circ]$ , e o emissor a uma frequência de 5[KHz] de comutação do LED. A seguir são apresentados os gráficos de cada foto-díodo (figura 5.4).



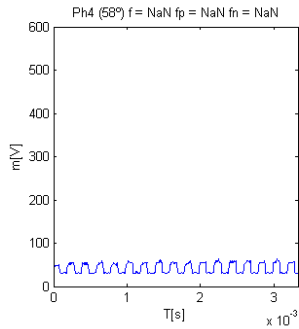
(a) Foto-díodo 1.



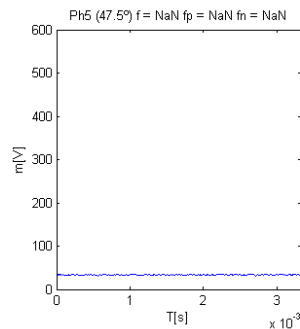
(b) Foto-díodo 2.



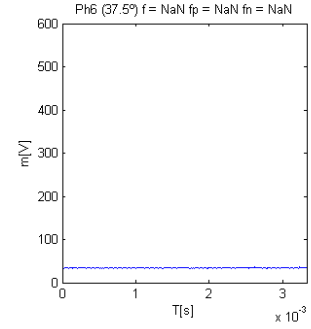
(c) Foto-díodo 3.



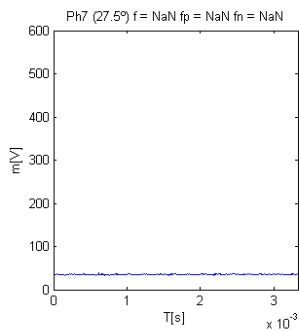
(d) Foto-díodo 4.



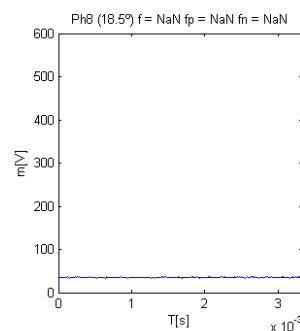
(e) Foto-díodo 5.



(f) Foto-díodo 6.



(g) Foto-díodo 7.



(h) Foto-díodo 8.

Figura 5.4: Sinal recebido dos 8 foto-díodos.

Estes resultados foram enviados do sensor através do microcontrolador para o PC. O cálculo do ângulo do emissor e da frequência foram tratados internamente pelo microcontrolador e enviados posteriormente para o *MatLab* para sua visualização. O código que permitiu os cálculos e envio encontra-se mais detalhado em anexo (D). O cálculo do ângulo  $\theta_P$  do emissor é determinado com o recurso a equação da média pesada (equação 3.12). O sinal de tensão recebido pelos foto-díodos 3 e 4 são respetivamente 300[mV] e 50[mV], resultando no ângulo  $\theta_P = 67.07[^\circ]$ . Verifica-se que é possível calcular o ângulo a que se encontra o emissor, existindo uma percentagem de erro baixa como foi averiguada em simulação. Neste teste verifica-se ainda que o ângulo seja ligeiramente diferente ao apresentado no gráfico da figura 5.3(a). O facto deve-se à diretividade do sensor e a sua posição não se encontrarem exatamente iguais. O algoritmo desenvolvido para determinar a frequência de comutação é apresentado de seguida no fluxo grama da figura 5.5, encontrando-se em anexo (D) o código utilizado no microcontrolador.

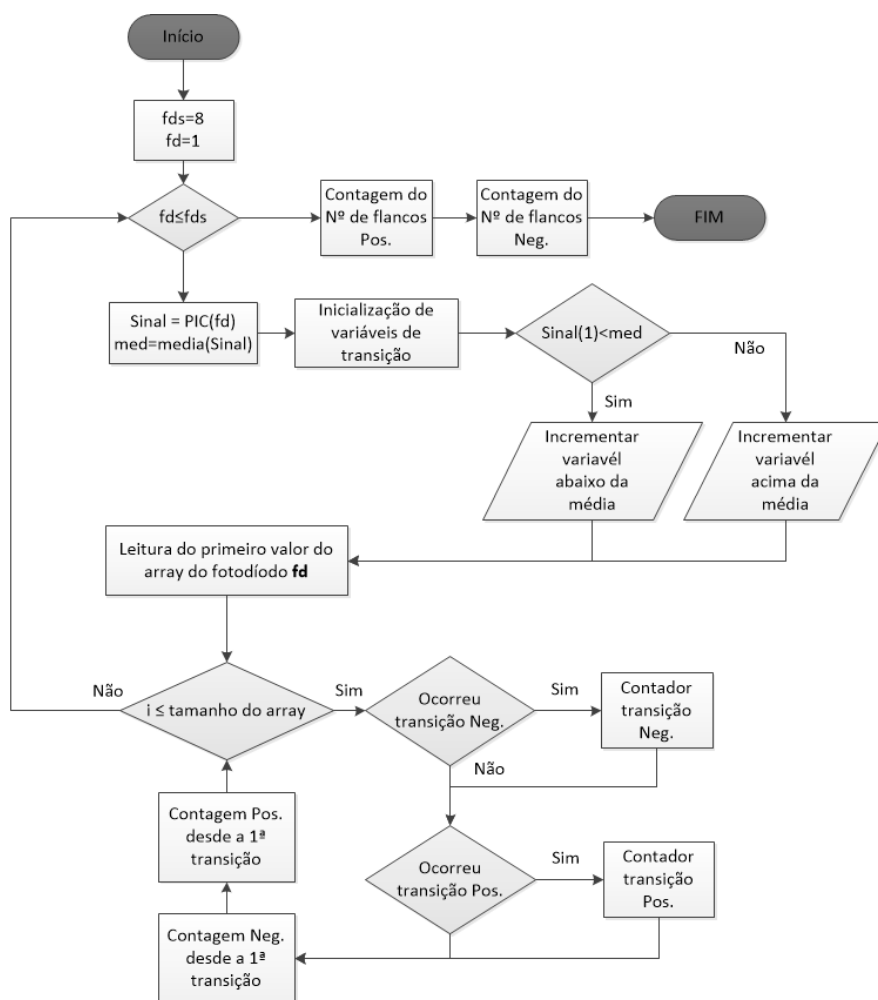


Figura 5.5: Fluxo grama do cálculo da frequência.

Este algoritmo foi desenvolvido com o intuito de calcular a frequência em menor tempo, o que não acontecia se fosse calculado por uma *Fast Fourier Transform* (FFT) que necessita de inúmeros cálculos e ocupando muito tempo de processamento do microcontrolador. Consiste basicamente na contagem do número de amostras que se encontram acima e abaixo da média, funcionando unicamente para ondas retangulares. Sabendo a frequência de amostragem do microcontrolador e o número de amostras, faz-se uma estimativa da frequência, como se verifica no gráfico 5.4(c) da figura 5.4, frequência  $f = 4999.498[\text{Hz}]$  calculada. A fim de melhorar a precisão do cálculo, é feita a contagem do número de flancos positivos ou negativos existentes nos dados recolhidos. Quando o número de flancos é múltiplo de 2 significa que é um período do sinal. Assim, por exemplo, se tivermos 4 períodos é feita a média das 4 frequências calculadas nesses 4 períodos, tornando a estimativa da frequência mais precisa. Apresentando-se no fluxo grama da figura 5.5 de forma resumida como se procedeu a estimativa do cálculo da frequência do sinal recebido no microcontrolador.

### 5.2.1 Considerações finais

Sobre o primeiro teste experimental foram registados 64 pontos, devido às 1000 amostras retiradas de 5 em 5 centímetros dos foto-díodos, registando o sinal máximo recebido por cada. Alguns erros que podem ser apresentados nos resultados advêm da deslocação do conjunto (mesa, sensor) sobre a linha imaginária apresentada na figura 5.1, por não se conseguir manter perfeitamente alinhado o sensor e o emissor. As imperfeições apresentadas na impressão da estrutura do sensor, como já foi mencionado, têm a ver com os ângulos não se apresentarem iguais aos teóricos. Outro aspeto que poderia influenciar na leitura dos valores seria o emissor auxiliar desenvolvido (como por exemplo o HPA dos LEDs).

O segundo teste foi realizado com o intuito de verificar o erro cometido no ângulo prático calculado pelo sensor desenvolvido com o ângulo real do emissor. O desvio de erro do ângulo calculado cometido advêm de alguns pontos cruciais, tais como: possível erro de leitura do *Analog to Digital Converter* (ADC) do microcontrolador; algumas deformações na estrutura impressa do arco; possíveis reflexões internas no tubo de controlo de FOV dos foto-díodos, afetando o sinal recebido; HPA do LED e seu controlo; Contudo, apesar das incertezas apresentadas, e caso se verifiquem constantes, pode-se fazer um ajuste da sua posição.

Na terceira experiência é pretendido o cálculo da frequência de comutação do LED, verificando-se que o algoritmo implementado é adequado, apresentando um erro insignificante, na ordem das unidades. O teste foi feito daquele ponto, tal como poderia ser feito em qualquer outro ponto com a mesma eficiência. Enquanto existir um foto-díodo que consiga receber o sinal a frequência é calculada de forma correta, sendo certo que o cálculo da frequência é calculada de forma correta sobre os dados recebidos do foto-díodo com maior sinal e não esquecendo que o algoritmo é aplicado só a sinais retangulares.



# Capítulo 6

## Conclusões e trabalhos futuros

*”A vida é a arte de tirar conclusões suficientes a partir de premissas insuficientes.”  
- Samuel Butler*

### *Sumário*

*Por fim, algumas conclusões fulcrais, retidas e analisadas durante este percurso da dissertação. E ideias para um futuro próximo.*

## 6.1 Conclusões do trabalho

Ao longo deste trabalho foram realizados alguns estudos, em paralelo com simulações sobre algumas características do LED e do foto-díodo, quanto ao manuseamento do HPA e do FOV, com o objetivo de simular e desenvolver um sensor capaz de se localizar em espaços interiores de edifícios através da VLC.

Determinando a disposição dos foto-díodos no sensor a desenvolver, desenhou-se e construiu-se o arco de suporte e controlo do FOV dos foto-díodos. Respeitaram-se as medidas durante as simulações. Desenvolveram-se também os circuitos para comprovação do conceito, o emissor auxiliar e os respetivos circuitos de receção de cada foto-díodo, culminando no sensor final.

No final, as simulações realizadas ao longo da dissertação puderam ser comprovadas, quando se passou para o mundo real com o sensor desenvolvido, testando-se as curvas de sinal recebido por cada foto-díodo, como o esperado nas simulações. Calculou-se o ângulo do emissor mais próximo e a frequência de comutação do LED a partir dos dados recebidos pelo sensor ao microcontrolador.

O desenvolvimento deste sensor abre novas portas na determinação da posição do robô. A informação tanto pode ser enviada por palavras codificadas por cada luminária (LED), mantendo sempre a mesma frequência de comunicação, como pelo envio de várias frequências de comutação.

## 6.2 Perspetivas de desenvolvimento futuro

Pretende-se que este trabalho resulte na adaptação do sensor desenvolvido num robô real, tirando partido da sua auto-localização e movimentação livre através de um registo interno do mapa onde se encontra, tendo em conta os dados retirados da sua posição.

Seria vantajosa a implementação de um motor passo a passo no sensor para poder ter um campo de visão total à sua volta. Outro ponto fulcral nesta implementação seria o estudo da conjugação da velocidade rotacional, a recolha de dados e o próprio movimento do robô. Exige-se, contudo, o desenvolvimento de um algoritmo inteligente que mapeie as luminárias já registadas para que não haja a recolha progressivamente sempre das mesmas.

Além do mencionado, seria interessante o estudo sobre algoritmos de comunicação existente entre o sensor desenvolvido e as fontes luminárias (LED).

Uma vez este sensor parte do princípio que conhece sempre a distância mínima a que se encontra dos LEDs, tendo como referência o teto onde estão dispostos, poder-se-ia contrariar este parâmetro desenvolvendo e adaptando um sensor para calcular essa distância.

Outra hipótese enriquecedora tem a ver com o desenvolvimento de um protótipo que possa ser adaptado a outro robô com a mesma finalidade, melhorando o tipo de material para que o peso não seja fator prejudicial no tempo de recolha da informação.

# Bibliografia

- [1] RIA, “Repositório institucional da universidade de aveiro.” <http://ria.ua.pt/simple-search?query=VLC>. [Online; acedido a 28-Agosto-2015].
- [2] studentsday, “Student day deti.” <http://studentsandteachersdeti.web.ua.pt/>. [Apresentação: 03-Junho-2015].
- [3] wikipedia. <https://pt.wikipedia.org/wiki/Espelho#Hist.C3.B3ria>. [Online: 03-Setembro-2015].
- [4] “Orientação por métodos expeditos.” <http://cneagrupamento1006.home.sapo.pt/orientacao/expedita.htm>.
- [5] J. M. C. de Sena Esteves, “Metologia de autolocalização absoluta em ambientes quase-estruturados,” Master’s thesis, Universidade do Minho escola de Engenharia, Julho 2005.
- [6] F. Thomas and L. Ros, “Revisiting trilateration for robot localization,” *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 1, pp. 93–101, 2005.
- [7] F. Thomas, E. Ottaviano, L. Ros, and M. Ceccarelli, “Coordinate-free formulation of a 3-2-1 wire-based tracking device using cayley-menger determinants,” in *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA’03. IEEE International Conference on*, vol. 1, pp. 355–361, IEEE, 2003.
- [8] G. Han, D. Choi, and W. Lim, “Reference node placement and selection algorithm based on trilateration for indoor sensor networks,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 9, no. 8, pp. 1017–1027, 2009.
- [9] wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Multilateration>. [Online: 30-Agosto-2015].
- [10] J. P. Gomes, C. R. Cunha, and R. Mansilha, “Orientação de invisuais em espaços fechados combinando técnicas de multilateração, inerciais e magnéticas, usando redes 802.11 e dispositivos móveis,” 2010.
- [11] Kian, “Quadro comparativo entre tecnologias.” <http://www.kianbrasil.com.br/>. [Apresentação: 07-Setembro-2015].

- [12] H. Haas, “Wireless data from every light bulb.” <https://www.youtube.com/watch?v=NaoSp4NpkGg>. [Acedido: 01-Setembro-2015].
- [13] Y. Masumoto, “Global positioning system,” May 11 1993. US Patent 5,210,540.
- [14] A. P. Miguens, “Navegação: A ciência e a arte,” 1996.
- [15] B. S. I. G. (SIG), “Specification for the bluetooth system 1.1. technical report specification,” 2001.
- [16] P. J. de Campos Bartolomeu, “Evaluating bluetooth® for the wireless transmission of midi,” Master’s thesis, Universidade de Aveiro, 2005.
- [17] M. D. A. Oliveira, “Tecnologias sem fios no apoio a pessoas com limitações funcionais,” Master’s thesis, Universidade de Aveiro, 2009.
- [18] J. H. Erisson, “The universal radio interface for ad hoc, wireless connectivity,” 1998.
- [19] “Rfid.” [http://www.gta.ufrj.br/grad/10\\_1/rfid/tecnologia.html](http://www.gta.ufrj.br/grad/10_1/rfid/tecnologia.html). [Online: 08-Setembro-2015].
- [20] J. P. B. Neiva, “Localização e orientação “indoor” com recurso à tecnologia rfid,” Master’s thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [21] L. G. Carlos Pereira and N. B. Carvalho, “A smart-phone indoor/outdoor localization system,” 2011.
- [22] C. M. C. Pereira, “Sistema de localização utilizando redes sem fios,” Master’s thesis, Universidade de Aveiro, 2011.
- [23] “A relação da frequência com o comprimento de onda eletromagnética.” <http://dan-scientia.blogspot.pt/2010/03/relacao-da-frequencia-com-o-comprimento.html>.
- [24] M. R. Krames, O. B. Shchekin, R. Mueller-Mach, G. O. Mueller, L. Zhou, G. Harbers, and M. G. Craford, “Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting,” *Journal of display technology*, vol. 3, no. 2, pp. 160–175, 2007.
- [25] J. C. A. Dornelas, J. A. Timmons, and S. Spinelli, *Criação de Novos Negócios - Empreendedorismo para o Século 21*, ch. 15. 9 ed.
- [26] OSRAM. <http://www.osram.com.br/>. [Online: 15-Setembro-2015].
- [27] Thorlabs. <http://www.thorlabs.com/>. [Online: 23-Setembro-2015].
- [28] N. R. M. Lourenço, “Communication systems using visible light: Emitter/receiver,” Master’s thesis, Universidade de Aveiro, 2009.



- [29] L. F. M. N. M. Alves, “Medição de relação sinal ruído em receptores Ópticos atmosféricos,” Master’s thesis, Universidade de Aveiro, 2000.
- [30] Y. U. Lee and M. Kavehrad, “Two hybrid positioning system design techniques with lighting leds and ad-hoc wireless network,” *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 4, pp. 1176–1184, 2012.
- [31] S.-Y. Jung, S. Hann, S. Park, and C.-S. Park, “Optical wireless indoor positioning system using light emitting diode ceiling lights,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 54, no. 7, pp. 1622–1626, 2012.
- [32] H. Q. Nguyen, J. Choi, M. Kang, Z. Ghassemlooy, D. Kim, S. Lim, C. Lee, *et al.*, “A matlab-based simulation program for indoor visible light communication system,” in *Communication Systems Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), 2010 7th International Symposium on*, pp. 537–541, IEEE, 2010.
- [33] H.-S. Kim, D.-R. Kim, S.-H. Yang, Y.-H. Son, and S.-K. Han, “Inter-cell interference mitigation and indoor positioning system based on carrier allocation visible light communication,” in *Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS), 2011 5th International Conference on*, pp. 1–7, IEEE, 2011.
- [34] J. R. F. d’as Seixas, “Dispositivos opto-electrónicos,” Master’s thesis, 2009.
- [35] J. Liu, P. W. C. Chan, D. W. K. Ng, E. S. Lo, and S. Shimamoto, “Hybrid visible light communications in intelligent transportation systems with position based services,” in *Globecom Workshops (GC Wkshps), 2012 IEEE*, pp. 1254–1259, IEEE, 2012.
- [36] J. M. Kahn and J. R. Barry, “Wireless infrared communications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 2, pp. 265–298, 1997.
- [37] R. J. M. T. Valadas, “Redes de comunicações de área local não-cabladas por raios infravermelhos,” Master’s thesis, Universidade de Aveiro, Novembro 1995.
- [38] OSRAM, “Dragon-x plus dx01-plus.” [https://www.cld-dist.co.uk/product\\_data/16150.pdf](https://www.cld-dist.co.uk/product_data/16150.pdf).
- [39] Vishay, “Irf510 - power mosfet.” <http://www.vishay.com/docs/91015/sihf510.pdf>.
- [40] T. Instruments, “Precision, low power, 18mhz transimpedance amplifier.” <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/opa381.pdf>.
- [41] T. Instruments, “Lmv796/lmv796q/lmv797 17 mhz, low noise, cmos input, 1.8v operational amplifiers.” <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmv797.pdf>.
- [42] OSRAM, “Silicon pin photodiode with very short switching time.” <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/opa381.pdf>.

# Apêndice A

## Resultados da simulação do $FOV_a$ e ganho $a$ dos foto-díodos

Apresentação dos resultados das simulações do  $FOV_a$  e ganho  $a$  para as várias funções e progressões usadas. As funções utilizadas foram a Linear, a Inversa e a Neperiana. Usando as progressões crescente e decrescente.

Resultados usando a função Linear e a progressão crescente.

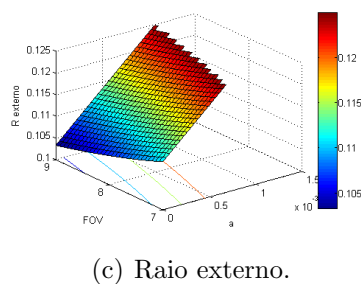
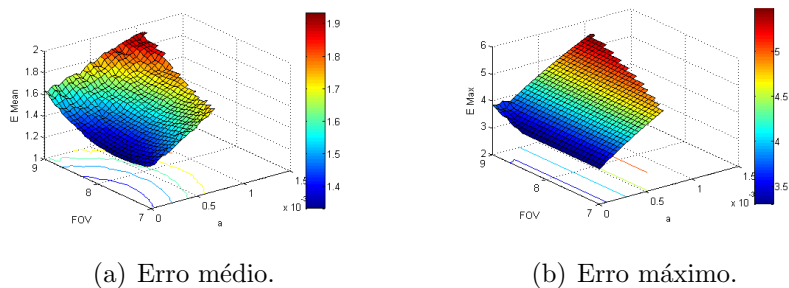
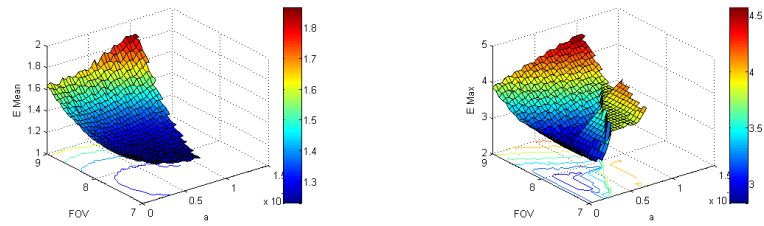


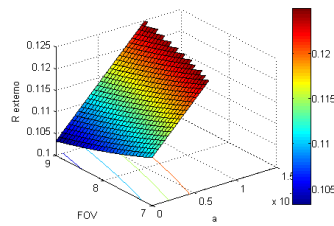
Figura A.1: Simulação da distribuição Linear crescente dos foto-díodos.

Resultados usando a função Linear e a progressão decrescente.



(a) Erro médio.

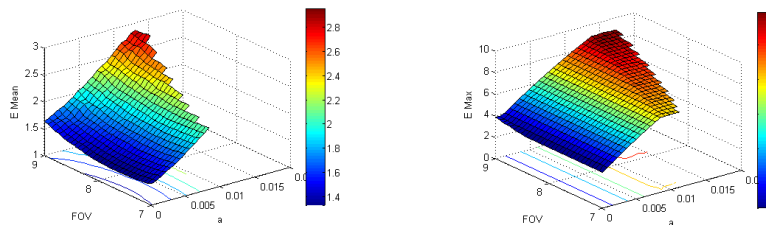
(b) Erro máximo.



(c) Raio externo.

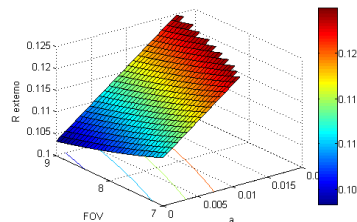
Figura A.2: Simulação da distribuição Linear decrescente dos foto-díodos.

Resultados usando a função Inversa e a progressão crescente.



(a) Erro médio.

(b) Erro máximo.



(c) Raio externo.

Figura A.3: Simulação da distribuição Inversa crescente dos foto-díodos.

Resultados usando a função Inversa e a progressão decrescente.

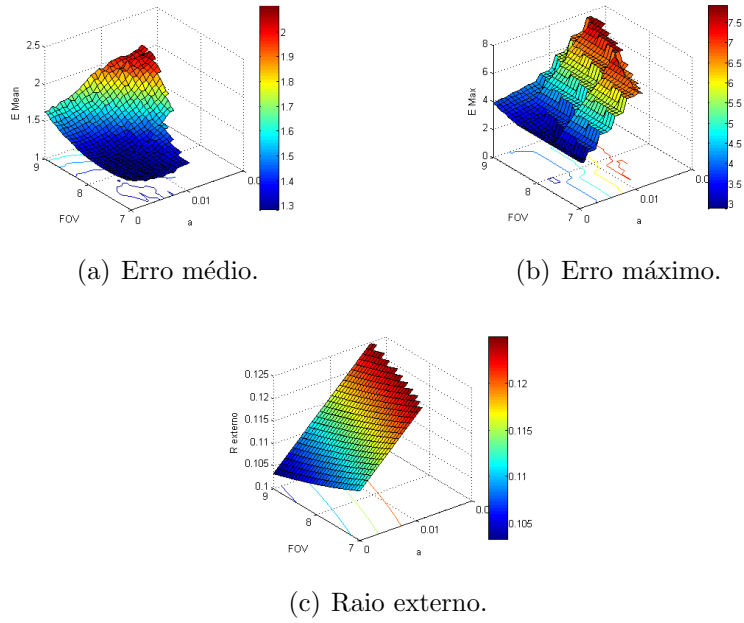


Figura A.4: Simulação da distribuição Inversa decrescente dos foto-díodos.

Resultados usando a função Neperiana e a progressão crescente.

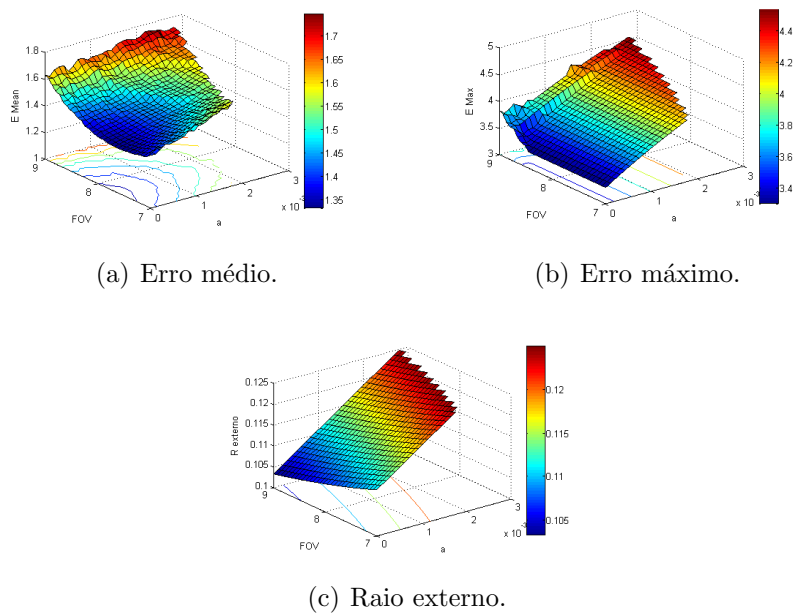
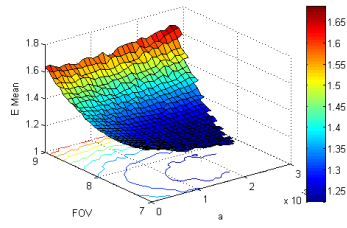
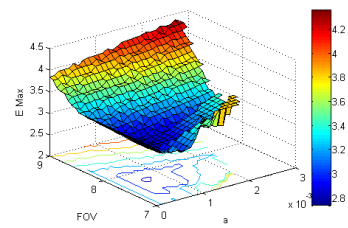


Figura A.5: Simulação da distribuição Neperiana crescente dos foto-díodos.

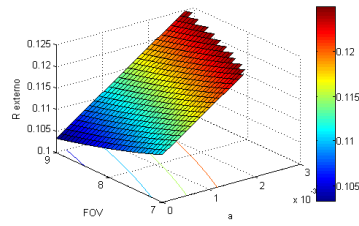
Resultados usando a função Neperiana e a progressão decrescente.



(a) Erro médio.



(b) Erro máximo.



(c) Raio externo.

Figura A.6: Simulação da distribuição Neperiana decrescente dos foto-díodos.

# Apêndice B

## PCBs dos circuito

As PCB apresentadas nesta secção foram elaboradas com ajuda do programa *Altium*.

### B.1 Emissor

PCB do circuito emissor desenvolvido.

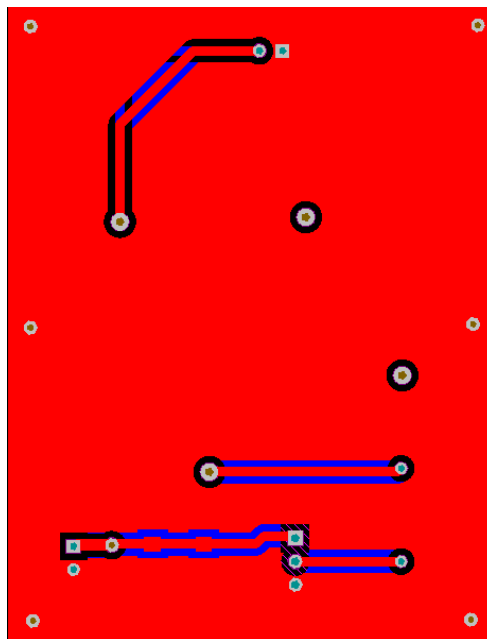


Figura B.1: PCB do emissor.

Na figura B.1, a vermelho identifica-se a face inferior da placa e azul a zona onde foram soldados os LEDs. E os restantes pontos são perfurações necessárias para se ter acesso à outra face ou para soldar os componentes.

## B.2 Recetor

PCB dos circuitos desenvolvido do recetor.

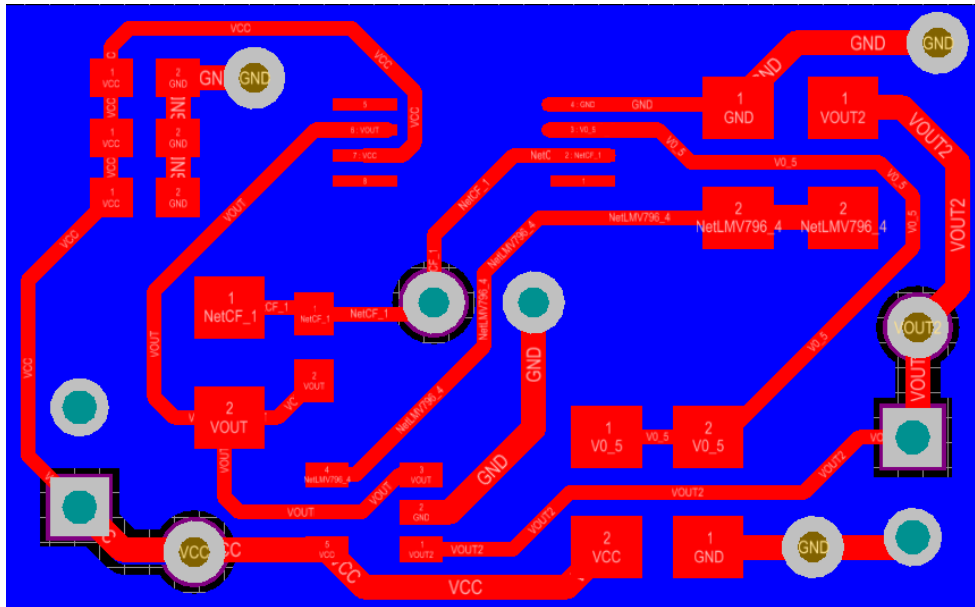


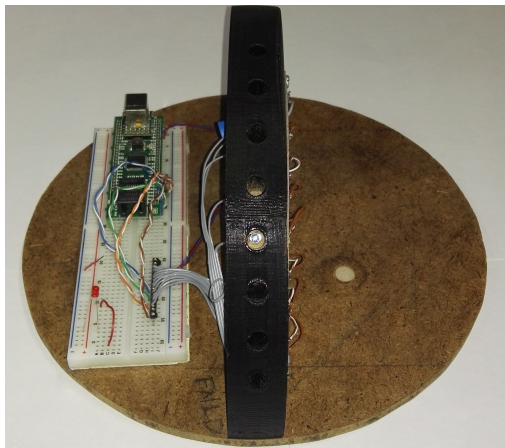
Figura B.2: PCB do recetor.

Na figura B.2, identifica-se a vermelho a face superior onde foram soldados os componentes do recetor e na face oposta azul a terra que era partilhada pelo restantes dos componentes.

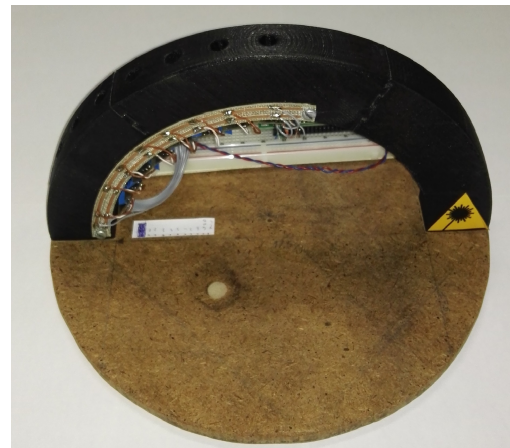
# Apêndice C

## Sensor desenvolvido

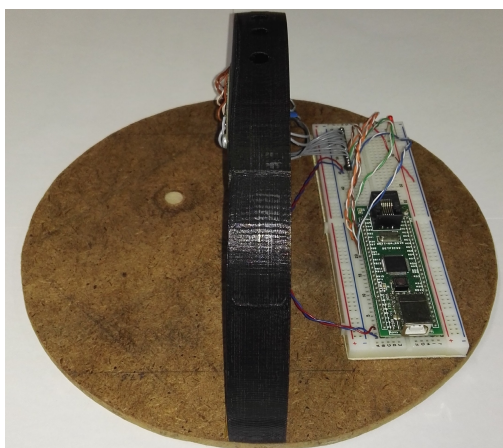
Algumas das perspectivas do sensor desenvolvido.



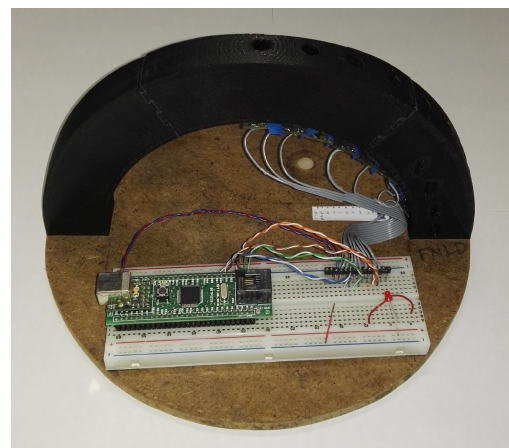
(a) Sensor, perspectiva 1.



(b) Sensor, perspectiva 2.



(c) Sensor, perspectiva 3.



(d) Sensor, perspectiva 4.

Figura C.1: Perspectivas do sensor desenvolvido.



# Apêndice D

## Código de leitura do microcontrolador

### D.1 *globalFunction.h*

```
/*
 * File:    globalFunction.h
 * Author:  Filipe Duarte
 *
 * Created on 14 de Junho de 2015, 21:31
 */
#include <xc.h>
#include <plib.h>
#include <p32xxxx.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdint.h>
#include <time.h>

#include "uart_control.h"

#ifndef GLOBALFUNCTION_H
#define GLOBALFUNCTION_H

#define SYSCLK 8000000L           // Frequencia do relógio do sistema,
    em Hz
#define MICROCLK 40L           // Microclock

// Variaveis
#define TPS_256 7               // TCKPS código para xx pre-scaler
#define TPS_64 6
#define TPS_32 5
#define TPS_16 4
#define TPS_8 3
#define TPS_4 2
```

```

#define TPS_2    1
#define TPS_1    0

#ifdef    __cplusplus
extern "C" {
#endif

/***** Prototipos das funcoes *****/
// Configurar fotodiodos
void ConfFotodiodos(void);
void angle_freq_volt(void);

//funcoes para o timer4
void interrupConfig_Timer4(void);
void interrupConfig_ADC(void);
void configTimer4(void);
void configuracaoADC(void);
void tmr4sampling_isr(void);
void time_for_read_voltage(void);
float soma(unsigned int s[], unsigned short);
void frequencia(unsigned short s[]);
unsigned short maximo(unsigned short s[], unsigned short);
unsigned short minimo(unsigned short s[], unsigned short);
void str_invert(unsigned char *str);
unsigned char str_length(unsigned char *str);
void str_int2string(int i, unsigned char *str);
void imprimirInt(int num);

#ifdef    __cplusplus
}
#endif

#endif /* GLOBALFUNCTION_H */

```

## D.2 *globalFunction.c*

```

/*
 * File:    globalFunction.c
 * Author:  Filipe Duarte
 *
 * Created on 14 de Junho de 2015, 21:31
 */
#include <xc.h>
#include <plib.h>
#include <p32xxxx.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdint.h>
#include <time.h>

#include <math.h>

```

```

#include "globalFunction.h"
#include "uart_control.h"

#define L 1000
#define Fs 150000
#define indmax 20

unsigned int ind = 0;
unsigned short AN0[L], AN1[L], AN2[L], AN3[L], AN4[L], AN5[L], AN6[L],
    AN7[L];

// Configurar fotodiodos
void ConfFotodiodos(void){
    TRISB = TRISB | (0xFF);
}

// ->tmr4sampling_isr
void interrupConfig_Timer4(void){
    void __attribute__((interrupt(ipl2), vector(_TIMER_4_VECTOR)))
        tmr4sampling_isr(void);
    IFS0bits.T4IF = 0; // Baixar bandeira da interrupcao
    IPC4bits.T4IP = 2; // set interrupt priority (1..6) *** Make sure
        it matches iplx in isr declaration above ***
    IEC0bits.T4IE = 1; // Enable T4 interrupts
}

// ->time_for_read_voltage
void interrupConfig_ADC(void){
    void __attribute__((interrupt(ipl3), vector(_ADC_VECTOR)))
        time_for_read_voltage(void);
    IFS1bits.AD1IF = 0;
    IPC6bits.AD1IP = 3;
    IEC1bits.AD1IE = 1;
}

// Config timer4
void configTimer4(void){
    T4CONbits.TON = 0; // Stop Timer
    IFS0bits.T4IF = 0; // Reset interrupt flag
    T4CONbits.TCKPS = TPS_1; // Select pre-scaler
    T4CONbits.T32 = 0; // 16 bit timer operation
    PR4 = 40000000/(1*(Fs))-1; // Compute PR value 200KHz
    TMR4 = 0;
}

// Config ADC
void configuracaoADC(void){
    unsigned short amostras = 8;
    AD1CON2bits.SMPI = amostras-1; // 16 samples
    AD1CON2bits.BUFM = 0; // Buffer 1
    AD1CON2bits.ALTS = 0; // alt
}

```

```

AD1CHSbits.CHONA = 0;           // ground a zero
AD1CON1bits.SSRC = 7;          // Contador interno termina e
    começa a conversão de amostragem
AD1CON1bits.CLRASAM = 0;       // Stop conversions when the
    first ADC interrupt is generated. Hardware clears the ASAM bit
    when the ADC interrupt is generated
AD1CON3bits.SAMC = 2;          // tempo de amostras 16 TAD
AD1PCFG = 0xFF00;             // RBO-RB7 configurado como
    entrada analógica
AD1CON2bits.CSCNA = 1;        // Scan input
AD1CSSL = 0x00FF;             // Select AN0-AN7 for input
    scan
AD1CON1bits.ON = 1;
}

// Timer4
void tmr4sampling_isr(void){
    if(ind < L){
        ind++;
    }
    else{
        // Imprimir valores para o Matlab LER
        uart_putstr("\n\n\rFs = [");          imprimirInt(Fs);
        uart_putstr("];\n\rL = [");          imprimirInt(L);
        uart_putstr("];");
        /*
        uart_putstr("];\n\r%Ph1 = ["); frequencia(AN0); uart_putstr("]
            Hz; Max ["); imprimirInt(maximo(AN0,L)); uart_putstr("];
            Min = ["); imprimirInt(minimo(AN0,L));
        uart_putstr("];\n\r%Ph2 = ["); frequencia(AN1); uart_putstr("]
            Hz; Max ["); imprimirInt(maximo(AN1,L)); uart_putstr("];
            Min = ["); imprimirInt(minimo(AN1,L));
        uart_putstr("];\n\r%Ph3 = ["); frequencia(AN2); uart_putstr("]
            Hz; Max ["); imprimirInt(maximo(AN2,L)); uart_putstr("];
            Min = ["); imprimirInt(minimo(AN2,L));
        uart_putstr("];\n\r%Ph4 = ["); frequencia(AN3); uart_putstr("]
            Hz; Max ["); imprimirInt(maximo(AN3,L)); uart_putstr("];
            Min = ["); imprimirInt(minimo(AN3,L));
        uart_putstr("];\n\r%Ph5 = ["); frequencia(AN4); uart_putstr("]
            Hz; Max ["); imprimirInt(maximo(AN4,L)); uart_putstr("];
            Min = ["); imprimirInt(minimo(AN4,L));
        uart_putstr("];\n\r%Ph6 = ["); frequencia(AN5); uart_putstr("]
            Hz; Max ["); imprimirInt(maximo(AN5,L)); uart_putstr("];
            Min = ["); imprimirInt(minimo(AN5,L));
        uart_putstr("];\n\r%Ph7 = ["); frequencia(AN6); uart_putstr("]
            Hz; Max ["); imprimirInt(maximo(AN6,L)); uart_putstr("];
            Min = ["); imprimirInt(minimo(AN6,L));
        uart_putstr("];\n\r%Ph8 = ["); frequencia(AN7); uart_putstr("]
            Hz; Max ["); imprimirInt(maximo(AN7,L)); uart_putstr("];
            Min = ["); imprimirInt(minimo(AN7,L));
        uart_putstr("]");
        */
    }
}

```

```

*/
unsigned short flag = 1;
while(flag == 1){
    uart_putstr("\n\n\r          %PRIMA\n\r%Valores para o MATLAB
                (y)");
    uart_putstr("\n\r%Repetir medicao                (r)");
    uart_putstr("\n\r%Nao fazer nada                (n)");
    uart_putstr("\n\r%Frequencia da ultima amostragem (f) ?");
    char letra = get_c();
    put_c(letra);
    if(letra == 'y')
        flag = 2;
    else if(letra == 'r'){
        flag = 0;
    }else if(letra == 'f'){
        flag = 0;
        uart_putstr("\n\r
                .....
                n\r");
        angle_freq_volt();
        uart_putstr("\n\r
                .....
                n\r");
    }else{
        flag = 1;
        uart_putstr("\n\n\r%END :D :p :/");
    }
}
ind = 0;
int i;
if(flag == 2){
    uart_putstr("\n\rPIC = [");
    // Imprimir tensao
    for(i = 0; i < L; i++){
        imprimirInt(AN0[i]);    uart_putstr(",");
        imprimirInt(AN1[i]);    uart_putstr(",");
        imprimirInt(AN2[i]);    uart_putstr(",");
        imprimirInt(AN3[i]);    uart_putstr(",");
        imprimirInt(AN4[i]);    uart_putstr(",");
        imprimirInt(AN5[i]);    uart_putstr(",");
        imprimirInt(AN6[i]);    uart_putstr(",");
        imprimirInt(AN7[i]);    uart_putstr(";");
    }
    uart_putstr("];ex3");
    IEC1bits.AD1IE = 0;        // Disable ADC interrupts
    IEC0bits.T4IE = 0;        // Disable T4 interrupts
}
IFS0bits.T4IF = 0;          // Reset interrupt flag
}

```

```

// devolve o angulo, frequencia e a forza do sinal em mV
void angle_freq_volt(void){
    unsigned short sinal = 45;
    unsigned short sinal_med = 0;
    short fotod = -1;

    unsigned short mediaFotodiodo [8] = {0,0,0,0,0,0,0,0};
    mediaFotodiodo [0] = ((maximo(AN0,L) - minimo(AN0,L))/2) + minimo(
        AN0,L);
    mediaFotodiodo [1] = ((maximo(AN1,L) - minimo(AN1,L))/2) + minimo(
        AN1,L);
    mediaFotodiodo [2] = ((maximo(AN2,L) - minimo(AN2,L))/2) + minimo(
        AN2,L);
    mediaFotodiodo [3] = ((maximo(AN3,L) - minimo(AN3,L))/2) + minimo(
        AN3,L);
    mediaFotodiodo [4] = ((maximo(AN4,L) - minimo(AN4,L))/2) + minimo(
        AN4,L);
    mediaFotodiodo [5] = ((maximo(AN5,L) - minimo(AN5,L))/2) + minimo(
        AN5,L);
    mediaFotodiodo [6] = ((maximo(AN6,L) - minimo(AN6,L))/2) + minimo(
        AN6,L);
    mediaFotodiodo [7] = ((maximo(AN7,L) - minimo(AN7,L))/2) + minimo(
        AN7,L);

    if(sinal >= maximo(mediaFotodiodo,8))
    {
        uart_putstr("\n\r          %Nao esta a receber sinal.\n\r");
    }else
    {
        double angulos [8] = {900, 790, 685, 585, 480, 375, 275, 180};
        unsigned int i;
        double ang;

        double prod_soma = 0;
        double soma_ener = 0;

        for(i=0;i<8;i++)
        {
            imprimirInt(mediaFotodiodo [i]); uart_putstr("; \n\r");
            if(sinal < mediaFotodiodo [i])
            {
                uart_putstr("dentro = ");    imprimirInt(mediaFotodiodo
                    [i]); uart_putstr("; \n\r");
                prod_soma = prod_soma + mediaFotodiodo [i]*angulos [i];
                soma_ener = soma_ener + mediaFotodiodo [i];
                uart_putstr("prod_soma = ");    imprimirInt(prod_soma)
                    ; uart_putstr("; \n\r");
                uart_putstr("soma ener = ");    imprimirInt(soma_ener)
                    ; uart_putstr("; \n\r");
                if(mediaFotodiodo [i] > sinal_med)

```

```

        {
            sinal_med = mediaFotodiodo[i]*(3300/1023);
            fotod = i;
        }
    }
}

ang = prod_soma/(10*soma_ener);
switch(fotod)
{
    case 0:
        uart_putstr("\n\r  %Fotodiodo 1 = ["); frequencia(AN0
        ); uart_putstr("] Hz; Vmed = ");
        break;
    case 1:
        uart_putstr("\n\r  %Fotodiodo 2 = ["); frequencia(AN1
        ); uart_putstr("] Hz; Vmed = ");
        break;
    case 2:
        uart_putstr("\n\r  %Fotodiodo 3 = ["); frequencia(AN2
        ); uart_putstr("] Hz; Vmed = ");
        break;
    case 3:
        uart_putstr("\n\r  %Fotodiodo 4 = ["); frequencia(AN3
        ); uart_putstr("] Hz; Vmed = ");
        break;
    case 4:
        uart_putstr("\n\r  %Fotodiodo 5 = ["); frequencia(AN4
        ); uart_putstr("] Hz; Vmed = ");
        break;
    case 5:
        uart_putstr("\n\r  %Fotodiodo 6 = ["); frequencia(AN5
        ); uart_putstr("] Hz; Vmed = ");
        break;
    case 6:
        uart_putstr("\n\r  %Fotodiodo 7 = ["); frequencia(AN6
        ); uart_putstr("] Hz; Vmed = ");
        break;
    case 7:
        uart_putstr("\n\r  %Fotodiodo 8 = ["); frequencia(AN7
        ); uart_putstr("] Hz; Vmed = ");
        break;
    default:
        break;
}
imprimirInt(sinal_med); uart_putstr(" [mV];      Angulo = ");
imprimirInt(ang);      uart_putstr(" [graus];\n\r");
}
}

// Frequencia

```

```

void frequencia(unsigned short s[]){
    // Variaveis auxiliares
    unsigned int i;
    float f = 0;
    short p;
    unsigned int P[indmax];
    unsigned int N[indmax];
    unsigned short zp = 0;
    unsigned short zn = 0;
    unsigned short med = ((maximo(s,L) - minimo(s,L))/2) + minimo(s,L)
        ; // media do sinal recebido
    unsigned int U = 2;
    unsigned int tranP = 0;
    unsigned int tranN = 0;

    for(i = 0; i < indmax; i++ )
    {
        N[i] = 0;
        P[i] = 0;
    }
    // Condicao para verificar onde se encontra o sinal
    if(s[0] < med){
        p = -1;          // Positivo
    }
    else{
        p = 1;          // Negativo
    }

    //Contagem de valores
    for(i=0; i < L; i++)
    {
        // Transicao Negativa
        if(p == 1 && s[i] < med)
        {
            if(abs(s[i] - med) > U)
            {
                tranN++;
                p = -1;          // mudar de estado
            }
        }
        // Transicao Positiva
        if(p == -1 && s[i] > med)
        {
            if(abs(s[i] - med) > U)
            {
                tranP++;
                p = 1;          // mudar de estado
            }
        }
    }
    // CONTAGEM NEGATIVA DESCE A PRIMEIRA TRANSICAO
    if((tranN > 0) && (tranN < indmax))

```



```

    {
        N[tranN]++;
    }
    // CONTAGEM POSITIVA DESCE A PRIMEIRA TRANSIcao
    if((tranP > 0) && (tranP < indmax))
    {
        P[tranP]++;
    }
}

// Passou ate aqui!!! =D
for(i = 0; i < indmax; i++)
{
    if(N[i] != 0)
    {
        zn++;
    }
    if(P[i] != 0)
    {
        zp++;
    }
}

if(zn == 0 || zp == 0)
    uart_putstr("NaN");
else
{
    zn = (float)zn;
    zp = (float)zp;

    f = (2*Fs)/((soma(N,indmax)/zn) + (soma(P,indmax)/zp));
    imprimirInt((int)f);
}
}

// Soma de array
float soma(unsigned int s[], unsigned short len){
    float som = 0;
    unsigned int i;

    for(i = 0; i < len; i++)
    {
        som = som + (float)s[i];
    }

    return som;
}

// Leitura das ADCs
void time_for_read_voltage(void){

```

```

ANO[ind] = ADC1BUF0;
AN1[ind] = ADC1BUF1;
AN2[ind] = ADC1BUF2;
AN3[ind] = ADC1BUF3;
AN4[ind] = ADC1BUF4;
AN5[ind] = ADC1BUF5;
AN6[ind] = ADC1BUF6;
AN7[ind] = ADC1BUF7;

IFS1bits.AD1IF = 0;
}

// Valor maximo do array
unsigned short maximo(unsigned short s[], unsigned short len){
    unsigned int i,m = 0;
    for(i=0; i < len; i++)
        if(s[i]>m)
            m = s[i];

    return m;
}

// Valor minimo do array
unsigned short minimo(unsigned short s[], unsigned short len){
    unsigned int i,m = 5000;
    for(i=0; i < len; i++)
        if(s[i]<m)
            m = s[i];

    return m;
}

// str_invert(unsigned char): inverte string
void str_invert(unsigned char *str){
    unsigned char aux;
    unsigned char len;
    unsigned char i;
    unsigned char temp;
    len = str_length(str);
    aux= len >> 1;
    len--;
    for(i= 0; i< aux; i++)
    {
        temp= *(str + len - i);
        *(str + len - i)= *(str + i);
        *(str + i)= temp;
    }
}

// str_length(unsigned char): devolve o tamanho da string
unsigned char str_length(unsigned char *str){

```

```

    unsigned char len= 0;

    while(*str != 0)
    {
        len++;
        str++;
    }
    return(len);
}

// str_int2string(int,unsigned char): converter um inteiro para string
. Zero a esquerda sao omitidos.
void str_int2string(int i, unsigned char *b){
    char const digit[] = "0123456789";
    char* p = b;
    if(i<0){
        *p++ = '-';
        i *= -1;
    }
    int shifter = i;
    do{ //Move to where representation ends
        ++p;
        shifter = shifter/10;
    }while(shifter);
    *p = '\0';
    do{ //Move back, inserting digits as u go
        *--p = digit[i%10];
        i = i/10;
    }while(i);
}

// Imprimir inteiros
void imprimirInt(int num){
    unsigned char str[10];
    str_int2string(num,str);
    uart_putstr(str);
}

```

### D.3 *uart\_control.h*

```

/*
 * File:    uart_control.h
 * Author:  Filipe Duarte
 *
 * Created on 14 de Junho de 2015, 21:31
 */
#include <xc.h>
#include <plib.h>
#include <p32xxxx.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

```

```

#include <stdint.h>
#include <time.h>

#ifndef UART_CONTROL_H
#define UART_CONTROL_H

#define PBUSCLK 40000000L // Peripheral bus clock
#define SYSCLK 80000000L // System clock frequency, in Hz

#ifdef __cplusplus
extern "C" {
#endif

/* baud rate (baud > 600 && baud < 115200), parity='N'/'O'/'E',
   stopbits = 1(==0)/2(==1) */
void configUart(unsigned int baud, char parity, unsigned int stopbits);

/* waits for the character and receive it */
unsigned char get_c(void);

/* send one character */
void put_c(char c);

/* send string */
void uart_putstr (unsigned char *str);

#ifdef __cplusplus
}
#endif

#endif /* UART_CONTROL_H */

```

## D.4 *uart\_control.c*

```

/*
 * File:    uart_control.c
 * Author:  Filipe Duarte
 *
 * Created on 14 de Junho de 2015, 21:31
 */

#include "globalFunction.h"
#include "uart_control.h"

#include <xc.h>
#include <plib.h>
#include <p32xxxx.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdint.h>
#include <time.h>

```

```

void configUart(unsigned int baud,char parity,unsigned int stopbits){
    if((baud<600|baud>115200)|(parity!='N'&parity!='O'&parity!='E')|(
        stopbits<1|stopbits>2))
    {
        baud = 115200;
        parity = 0;
        stopbits = 0;
    }
    else{
        if(stopbits == 1) stopbits = 0;
        if(stopbits == 2) stopbits = 1;
        if(parity == 'N') parity = 0;
        if(parity == 'O') parity = 2;
        if(parity == 'E') parity = 1;
    }
    // configure BaudRate Generator
    U1BRG=((PBUSCLK+8*baud)/(16*baud))-1;
    U1MODEbits.BRGH=0;

    // Configure number of data bits (8), parity and number of stop
    bits
    U1MODEbits.PDSEL=parity;           //paridade numero de bits
    U1MODEbits.STSEL=stopbits;        // stopbits

    // Enable the transmitter and receiver modules
    U1STAbits.UTXEN=1;                 // UART1 transmit bit
    enable
    U1STAbits.URXEN=1;                 // UART1 bit enable

    // enable UART1
    U1MODEbits.ON=1;
}

void put_c(char c) {
    while (U1STAbits.UTXBF);           // Wait till buffer
    available (TX Buffer Full)
    U1TXREG = c;                       // Put char in Tx buffer
    return;
}

unsigned char get_c(void){
    unsigned char c;
    while (!U1STAbits.URXDA);
    c = U1RXREG;
    return c;
}

void uart_putstr(unsigned char *str){
    while (*str != 0)
    {

```

```
||      put_c(*str);  
||      str++;  
||    }  
||  }
```