



# **Análise do Desempenho de Sistemas LiDAR *Indoor* de Baixo Custo em Aplicações *Outdoor***

**Rafael da Silva Rei**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**  
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Miguel de Figueiredo Dinis Oliveira Gaspar

**Outubro de 2022**



## Declaração de Integridade

Eu, Rafael da Silva Rei, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição M11110 do Mestrado de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 07 / 10 / 2022



(assinatura conforme Cartão de Cidadão ou preferencialmente  
assinatura digital no documento original se naquele mesmo formato)



## **Agradecimentos**

Agradeço aos meus pais e irmãos, pelo apoio incondicional durante todo o meu percurso académico, com grande ênfase neste trabalho. Agradeço por não duvidarem de mim, acreditando e apoiando as minhas decisões.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Pedro Miguel de Figueiredo Dinis Oliveira Gaspar, no passar de conhecimentos e sabedoria, pela disponibilidade e ajuda na realização desta dissertação, sempre presente qualquer fosse o meio de contacto. Importante no alcançar deste objetivo, sem a sua ajuda, a realização do trabalho não seria possível.

Agradeço à Universidade da Beira Interior, em particular ao laboratório de robótica da Faculdade de Engenharias pela disponibilização de equipamentos e matérias para a realização deste trabalho, sem esta ajuda o mesmo não seria possível.

Agradeço aos meus amigos e família pelo apoio ao longo deste percurso académico.



## Resumo

Um desenvolvimento dos métodos de medição ao longo dos anos, deu fruto a uma tecnologia ótica de medição remota que estuda as propriedades da luz refletida a fim de calcular as distâncias do meio envolvente.

A tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) determina a distância a um objeto através do intervalo de tempo que um pulso laser leva desde a sua emissão à sua receção. Vários são as áreas de estudo onde esta tecnologia é aplicada. Consoante as mesmas, o equipamento LiDAR pode ser para uso *indoor* ou *outdoor*, e encontrar-se em sistemas de uma dimensão (1D), duas dimensões (2D) ou três dimensões (3D) fará que consiga elaborar gradualmente uma representação real do meio envolvente.

Este trabalho tem como objetivo o estudo do comportamento de um LiDAR 2D *indoor* de baixo custo nas adversidades de um ambiente *outdoor*, visando melhorar a captação de dados em aplicações onde a luz ambiente, temperatura, humidade e reflexões possa afetar negativamente os resultados. É proposta a obtenção de medições nos diversos ambientes mencionados anteriormente. O tratamento de dados em MATLAB permite estudar possíveis erros encontrados.

O primeiro estudo *indoor* com chapas a 90°, apresentou um erro médio de medição de 0,5%. Mantendo no mesmo ambiente de estudo, o aumento do erro médio para 1,04%, deveu-se à utilização de chapas a 70°. Aplicando a mesma ordem de ensaio dos objetos num ambiente *outdoor*, obtiveram-se erros médios de medição de 1,28% e 0,88%, respetivamente. Num terceiro grupo de estudo *outdoor*, sobre contexto real, resultou um ensaio com incidência solar direta, levando à não identificação dos objetos. Contudo, quando a incidência solar direta não estava presente, o erro médio de medição era de 1,85%, ainda que com poucos objetos identificados.

Para concluir, a adaptação de sistemas LiDAR *indoor* de baixo custo em aplicações *outdoor* não é aconselhado. Existem ainda muitos desafios a serem superados nesta tecnologia emergente e revolucionária.

## Palavras-chave

Sensor laser, RPLIDAR A1M8, light detection and ranging (LiDAR), time-of-flight (TOF), medições com LiDAR, LiDAR 2D, aplicações *outdoor*, LiDAR lowcost, LiDAR *indoor*



## Abstract

A development in measurement methods over the years has given rise to an optical remote measurement technology that studies the properties of reflected light to calculate distances from the surroundings.

LiDAR (Light Detection and Ranging) technology determines the distance to an object by the time interval that a laser pulse takes from its emission to its reception. Several are the areas of study where this technology is applied. Depending on them, LiDAR equipment can be for indoor or outdoor use, and being in one-dimensional (1D), two-dimensional (2D) or three-dimensional (3D) systems will gradually produce a true representation of the surrounding environment.

This work aims to study the behavior of a low-cost 2D indoor LiDAR in the adversities of an outdoor environment, aiming to improve data capture in applications where ambient light, temperature, humidity and reflections may negatively affect the results. It is proposed to obtain measurements in the various environments mentioned above. The data processing in MATLAB allows to study possible errors found.

The first indoor study with plates at  $90^\circ$ , showed an average measurement error of 0.5%. Maintaining the same study environment, the increase in the average error to 1.04%, was due to the use of  $70^\circ$  plates. Applying the same test order of the objects in an outdoor environment, we obtained average measurement errors of 1.28% and 0.88%, respectively. In a third outdoor study group, in a real context, a test with direct solar incidence resulted in no identification of objects, however, when direct solar incidence was not present, the average error of measurement was 1.85%, although with few objects identified.

To conclude, the adaptation of low-cost indoor LiDAR systems to outdoor applications is not advised. There are still many challenges to be overcome in this emerging and revolutionary technology.

## Keywords

Laser sensor, RPLIDAR A1M8, light detection and ranging (LiDAR), time of flight (TOF), LiDAR measurements, 2D LiDAR, *outdoor* applications, low cost LiDAR, *indoor* LiDAR,



# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>i</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>v</b>
<b>Índice</b> .....	<b>vii</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>ix</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Lista de Acrónimos</b> .....	<b>xv</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1. Enquadramento .....	1
1.2. O problema em estudo e a sua relevância .....	2
1.3. Objetivos e contribuição da dissertação .....	7
1.4. Visão geral e organização da dissertação.....	7
<b>2. Estado da Arte</b> .....	<b>9</b>
2.1. Estado da tecnologia LiDAR .....	9
2.1.1. Sensores LiDAR como variante 1D, 2D e 3D .....	10
2.2. Sensores de medição linear (1D).....	10
2.2.1. TF mini Plus (BENEWAKE) .....	10
2.3. Sensores de medição de superfícies (2D) .....	12
2.3.1. LiDAR Sensor 2D R2000 (Pepperl+Fuchs).....	12
2.4. Sensores de medição espacial (3D).....	14
2.4.1. Puck 3D (Velodyne Lidar).....	15
2.5. Estudo do comportamento de Sensores LiDAR integrados em ambientes com condições climatéricas adversas .....	18
2.6. Nota Conclusiva .....	21
<b>3. Materiais e Métodos</b> .....	<b>23</b>
3.1. Materiais.....	23
3.1.1. RPLIDAR A1M8 .....	23
3.1.2. Sensor Xiaomi de Temperatura e Humidade .....	25
3.1.3. Chapas Metálicas .....	26
3.1.4. Espelho.....	27
3.1.5. Vidro.....	28
3.1.6. Aplicação Frame Grabber .....	28
3.1.7. Termopar FLUKE 51 .....	30
3.2. Métodos.....	31
3.2.1. Disposição da sala para estudo <i>indoor</i> .....	31
3.2.2. Disposição do ambiente para estudo <i>outdoor</i> .....	33

3.2.3.	Disposição do ambiente para estudo em contexto real.....	35
3.2.4.	Medição da temperatura e humidade relativa.....	36
3.2.5.	Tratamento de dados .....	36
3.3.	Nota conclusiva.....	37
<b>4.</b>	<b>Análise e Discussão de Resultados .....</b>	<b>39</b>
4.1.	Estudo <i>indoor</i> .....	39
4.1.1.	Chapas metálicas 90° inclinação.....	39
4.1.2.	Chapas metálicas 70° inclinação.....	41
4.2.	Estudo <i>outdoor</i> .....	43
4.2.1.	Chapas metálicas 90° inclinação.....	43
4.2.2.	Chapas metálicas 70° inclinação.....	45
4.2.3.	Estudo contexto real .....	47
4.3.	Nota conclusiva.....	50
<b>5.</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>53</b>
5.1.	Conclusões gerais .....	53
5.1.1.	Enquadramento da dissertação.....	53
5.1.2.	Estudo <i>indoor</i> .....	54
5.1.3.	Estudo <i>outdoor</i> .....	55
5.2.	Conclusão do estudo.....	56
5.3.	Sugestões de trabalhos futuros .....	57
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>59</b>

## Lista de Figuras

Fig. 1. Cálculo da distância em função dos sistemas D-TOF e I-TOF, respectivamente (Nazmuz Sakib, 2021).....	2
Fig. 2. Princípios de funcionamento do time of flight e phase-shift (Wang <i>et al.</i> , 2020).....	2
Fig. 3. O efeito da luz ambiente sobre o recetor do equipamento LiDAR, adaptada de (Fenske & Bartlett, 2018).....	3
Fig. 4. Relação temperatura(°C)/tempo(ns) na medição a laser (Gao <i>et al.</i> , 2018).....	4
Fig. 5. Comportamento de um feixe de luz quando absorvido ( <i>Absorption</i> ), disperso ( <i>Scattering</i> ) e refletido ( <i>Reflection</i> ) (Baker-Campbell, 2021).....	5
Fig. 6. O impacto da humidade relativa (RH), da chuva (Rain) e do nevoeiro (Fog) no alcance de um equipamento a laser (Baker-Campbell, 2021).....	5
Fig. 7. Reflexão especular (A) e reflexão difusa (B) (Miguel Neta, 2021). ....	6
Fig. 8. Três casos de estudo, onde está presente um espelhos ao nível do chão (a-dados LiDAR, b- imagem real), janelas em vidro ao longo do corredor (c-dados LiDAR, d-imagem real) e um pilar espelhado (e-dados LiDAR, f-imagem real) (Yang & Wang, 2011). ....	6
Fig. 9. Princípio de funcionamento de um sensor LiDAR (Hutabarat <i>et al.</i> , 2019).....	9
Fig. 10. Sensor LIDAR 1D TF mini Plus, produzido por Benewake (Benewake Co., 2020).....	11
Fig. 11. Visão geral esquemática do sistema de previsão de transição de locomoção com reconhecimento de ambiente. O sensor laser TF mini aponta para o solo com um ângulo $\alpha=45^\circ$ (entre o feixe de laser e a linha vertical representada ao longo do abdômen do utilizador)(Almeida <i>et al.</i> , 2019). ....	12
Fig. 12. Sensor LiDAR 2D R2000, produzido por Pepperl+Fuchs (Pepperl+Fuchs Group, 2021). ....	13
Fig. 13. Testes de performance em ambientes com obstáculos estáticos (a) e em ambientes com obstáculos dinâmicos, pessoas a cruzar a linha de perseguição (b) (Jin <i>et al.</i> , 2020). ....	14
Fig. 14. Perceção de um sensor LiDAR com 4 níveis de varrimento (Harald Weber, 2018). ....	15
Fig. 15. Sensor LiDAR PUCK 3D, produzido pela Velodyne Lidar. ....	15
Fig. 16. Exemplo de uma aplicação do LiDAR PUCK 3D, promovendo soluções para aplicações robóticas com avançada mobilidade e autonomia requerida em terrenos desafiantes (Velodyne Lidar, 2021).....	16
Fig. 17. Veículo elétrico de tamanho real, John Deere TE Gator, equipado com Velodyne PUCK 3D LiDAR, assinalado a vermelho (Andreas Pfrunder <i>et al.</i> , 2017).....	17
Fig. 18. Sensor LiDAR 3D ibeo LUX, produzido pela Ibeo Automotive Systems. ....	19
Fig. 19. Implementação do LiDAR num poste de visibilidade no aeroporto de Sodankylä, Lapônia (Matti Kutila <i>et al.</i> , 2016).....	20
Fig. 20. Dados obtidos durante o teste de outono de 2015. As duas falhas do sistema identificadas assim como a perceção de diferentes capacidades de medição de distância conforme a densidade do nevoeiro (Matti Kutila <i>et al.</i> , 2016).....	20

Fig. 21. Sensor laser, LiDAR, RPLIDAR A1M8 (SLAMTEC, 2022). .....	23
Fig. 22. Esquema do sistema de medição de triangulação a laser do RPLIDAR A1M8 (SLAMTEC, 2020).....	24
Fig. 23. Esquema de ligações RPLIDAR A1M8 (UART)/adaptador (UART) e adaptador (Micro-USB)/computador (USB) (SLAMTEC, 2016). .....	24
Fig. 24. Sensor Xiaomi de Temperatura e Humidade 2 (Xiaomi Portugal, 2022).....	25
Fig. 25. Chapas metálicas, (A)-chapa de alumínio de cor preta, (B)-chapa de alumínio sem cor, (C)-chapa de alumínio de cor vermelha, (D)-chapa de inox esmerilado, (E)-chapa de alumínio de cor verde, (F)-chapa de ferro zincado, (G)-chapa de alumínio de cor azul, (H)-chapa de ferro, (I)-chapa de alumínio de cor branca.....	26
Fig. 26. Espelhos utilizados nos testes práticos. ....	27
Fig. 27. Vidros transparentes utilizados nos testes práticos. ....	28
Fig. 28. Aplicação Frame Grabber.....	28
Fig. 29. Interface de início da aplicação para escolha da porta de comunicação com o equipamento LiDAR. ....	29
Fig. 30. Podemos visualizar o diagrama 360°, e o botão identificado permite o início da aquisição de dados. ....	29
Fig. 31. Termopar FLUKE 51, equipamento de medição de temperatura. ....	30
Fig. 32. Disposição da sala de testes <i>indoor</i> , nesta imagem real podemos confirmar a existência de janelas do lado direito da sala, assim como a porta e armários do lado esquerdo da sala. ....	31
Fig. 33. Disposição da sala de testes <i>indoor</i> , as chapas metálicas, 90° e 70°, estão numeradas de A a I, o equipamento LiDAR está ilustrado no centro da sala, á direita (em amarelo) encontram-se as janelas, no canto inferior esquerdo são identificados dois armários e a porta de entrada da sala. ....	32
Fig. 34. Disposição da sala de testes <i>indoor</i> , contém os espelhos (A) e os vidros (B), o equipamento LiDAR está ilustrado no centro da sala, á direita (em amarelo) encontram-se as janelas no canto inferior esquerdo são identificados dois armários e a porta de entrada da sala. ....	33
Fig. 35. Disposição do ambiente de testes <i>outdoor</i> , equipamento LiDAR junto do computador no centro da imagem, chapas metálicas distribuídas aleatoriamente, possível identificação dos muros envolventes. ....	34
Fig. 36. Disposição do ambiente de testes <i>outdoor</i> , as chapas metálicas estão numeradas de A a I, o equipamento LiDAR está ilustrado ao centro. Foi tido em conta os muros da esquerda, identificados como M e M1 como referências de medição.....	34
Fig. 37. Disposição do ambiente de testes <i>outdoor</i> em contexto real, equipamento LiDAR junto do computador no centro da imagem, viaturas distribuídas aleatoriamente, possível identificação dos muros envolventes. ....	35
Fig. 38. Disposição do ambiente de testes <i>outdoor</i> em contexto real, equipamento LiDAR no centro da imagem, viaturas identificadas pela sua cor, orientação da exposição solar e	

---

proveniente sombra identificada pelo tracejado cinzento. Os círculos são pontos de referência para medição, as siglas ME, MF e MD significam muro direito, muro frontal e muro direito respetivamente. ....	36
Fig. 39. Leitura 360° do LiDAR sobre sala de estudo <i>indoor</i> com chapas metálicas a 90°, figura retirada do processamento de dados Matlab. ....	41
Fig. 40. Leitura 360° do LiDAR sobre sala de estudo <i>indoor</i> com chapas metálicas a 70°, figura retirada do processamento de dados Matlab. ....	43
Fig. 41. Leitura 360° do LiDAR sobre o ambiente de estudo <i>outdoor</i> com chapas metálicas a 90°, figura retirada do processamento de dados Matlab. ....	45
Fig. 42. Leitura 360° do LiDAR sobre o ambiente de estudo <i>outdoor</i> com chapas metálicas a 70°, figura retirada do processamento de dados Matlab. ....	47
Fig. 43. Leitura 360° do LiDAR sobre o ambiente de estudo <i>outdoor</i> em contexto real, os dados obtidos e apresentados pelo equipamento são tidos como interferências, em ponto algum detetou as referências de medição, figura retirada do processamento de dados Matlab.....	48
Fig. 44. Leitura 360° do LiDAR sobre o ambiente de estudo <i>outdoor</i> em contexto real, os dados obtidos e apresentam o lado esquerdo do ambiente de estudo, muro esquerdo, onde havia sombra proporcionada pelo mesmo, identificando assim duas das referências de medição, figura retirada do processamento de dados Matlab. ....	50



---

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Especificações técnicas e parâmetros do sensor LiDAR 1D TF mini PLUS.....	11
Tabela 2. Especificações técnicas e parâmetros do Sensor LiDAR 2D R2000.....	13
Tabela 3. Especificações técnicas e parâmetros do Sensor LiDAR 3D PUCK.....	16
Tabela 4. Especificações técnicas e parâmetros do Sensor LiDAR 3D ibeo LUX. ....	19
Tabela 5. Especificações técnicas e parâmetros do Sensor LiDAR 2D RPLIDAR A1M8. ....	25
Tabela 6. Especificações técnicas e parâmetros do Sensor Xiaomi de Temperatura e Humidade 2. .	26
Tabela 7. Resultados obtidos do estudo <i>indoor</i> sobre o comportamento do equipamento LiDAR em chapas metálicas com 90° de inclinação.....	40
Tabela 8. Resultados obtidos do estudo <i>indoor</i> sobre o comportamento do equipamento LiDAR em chapas metálicas com 70° de inclinação.....	42
Tabela 9. Resultados obtidos do estudo <i>outdoor</i> sobre o comportamento do equipamento LiDAR em chapas metálicas com 90° de inclinação.....	44
Tabela 10. Resultados obtidos do estudo <i>outdoor</i> sobre o comportamento do equipamento LiDAR em chapas metálicas com 70° de inclinação.....	46
Tabela 11. Resultados obtidos do estudo <i>outdoor</i> sobre o comportamento do equipamento LiDAR em contexto real com incidência solar direta. ....	48
Tabela 12. Resultados obtidos do estudo <i>outdoor</i> sobre o comportamento do equipamento LiDAR em contexto real sem incidência solar direta, céu nublado.....	49



## Lista de Acrónimos

<i>ABS</i>	Acrylonitrile Butadiene Styrene;
<i>AOL</i>	Atmospheric Oceanographic LiDAR;
<i>ATM</i>	Airbone Topographic Mapper;
<i>AV</i>	Autonomous Vehicles;
<i>DC</i>	Direct Current;
<i>D-TOF</i>	Direct Time of Flight;
<i>GPS</i>	Global positioning System;
<i>I-TOF</i>	Indirect Time of Flight;
<i>LaDAR</i>	Light Detection and Ranging;
<i>LASER</i>	Light Amplification by Stimulates Emission of Radiation;
<i>LCD</i>	Liquid Cristal Display;
<i>LED</i>	Light-Emitting Diode;
<i>LiDAR</i>	Light Detection and Ranging;
<i>MATLAB</i>	MATrix LABoratory;
<i>NASA</i>	National Aeronautics and Space Administration;
<i>PC</i>	Polycarbonate;
<i>PMMA</i>	Poly(methyl methacrylate);
<i>PRT</i>	Pulse Ranging Technology;
<i>RH</i>	Relative Humidity;
<i>TOF</i>	Time of Flight;
<i>UART</i>	Universal Asynchronous Receiver Transmitter;
<i>USB</i>	Universal Serial Bus.



# 1. Introdução

Neste capítulo introdutório é dada uma perspectiva geral do estudo que envolve a dissertação.

## 1.1. Enquadramento

A tecnologia de medição utilizando LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), não tem uma terminologia oficial, pois as siglas comumente utilizadas são LiDAR (*Light Detection and Ranging*), assim como LaDAR (*Laser Detection and Ranging*). Ainda que LiDAR seja amplamente conhecido, especialmente no âmbito da sensorização remota, com aplicações na navegação autónoma, geologia marinha, agricultura, topografia entre outros (Pittman *et al.*, 2013), alguns autores preferem LaDAR pois expressa a utilização de um laser, sendo aplicado com mais frequência no campo militar (Siepmann, 2006)

No ano de 1958, Schawlow e Townes apoiados pelos fundamentos estabelecidos por Einstein em 1917 concretizaram a criação do primeiro laser (Schawlow and Townes, 1958). Durante a década de 1980, a qualidade de medição dos lasers ganhou visibilidade com o sucesso da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), desenvolvendo instrumentos aéreos, como o *Atmospheric Oceanographic Lidar* (AOL) e o *Airbone Topographic Mapper* (ATM) para calcular altimetria com tecnologia laser (Flood, 2001).

Na atualidade, com a presente evolução da tecnologia é possível obter dados em nuvem de pontos (*point cloud*) com precisão submétrica, o que possibilita o seu uso na engenharia civil, geologia, agronomia, topografia, engenharia florestal entre outras áreas (D'Oliveira *et al.*, 2014).

No mercado de equipamentos de medição, a tecnologia LiDAR tem apresentado resultados promissores. A medição de distância deve-se à reflexão de uma luz do laser sobre um objeto. O feixe de alta intensidade permite alcançar objetos em longas distâncias (Rivai *et al.*, 2020).

Um equipamento com tecnologia LiDAR consegue obter dados por três vias diferentes, podendo ser de forma terrestre, aéreo ou satélite, ainda que este último apenas possa usar altímetros e não executar mapeamento (Singh, 2018). Estes equipamentos têm na sua composição um emissor e um recetor de feixes de luz.

O princípio utilizado para o cálculo da distância é baseado no tempo de voo (TOF - *Time of Flight*), onde um laser pulsado ou modulado é emitido para o meio envolvente. Este princípio pode ser classificado como indireto (I-TOF - *Indirect Time of Flight*), ou direto (D-TOF - *Direct Time of Flight*). No sistema I-TOF, a informação da distância é estimada medindo-se o desfasamento da fase sinusoidal modulada, *phase-shift*, do laser pulsado em relação à sua emissão. No sistema D-TOF, é explorada a alta resolução da diferença de tempo entre a emissão e a receção para o cálculo

da distância (Tontini *et al.*, 2020). A Fig. 1 apresenta as equações para determinar a distância em ambos os sistemas. A Fig. 2 apresenta um esquema de ambos sistemas: tempo de voo e desfasamento de fase.

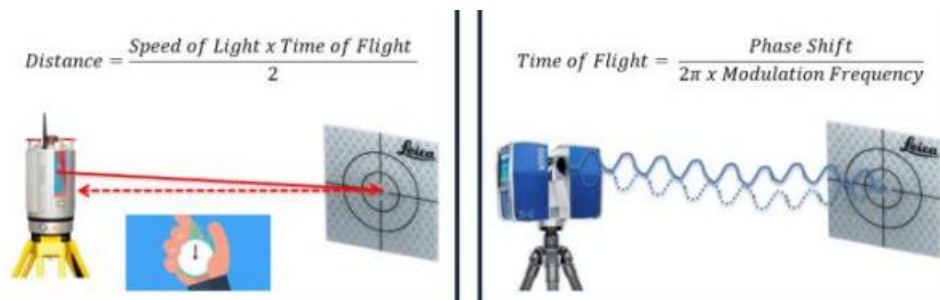


Fig. 1. Cálculo da distância em função dos sistemas D-TOF e I-TOF, respectivamente (Nazmuz Sakib, 2021).

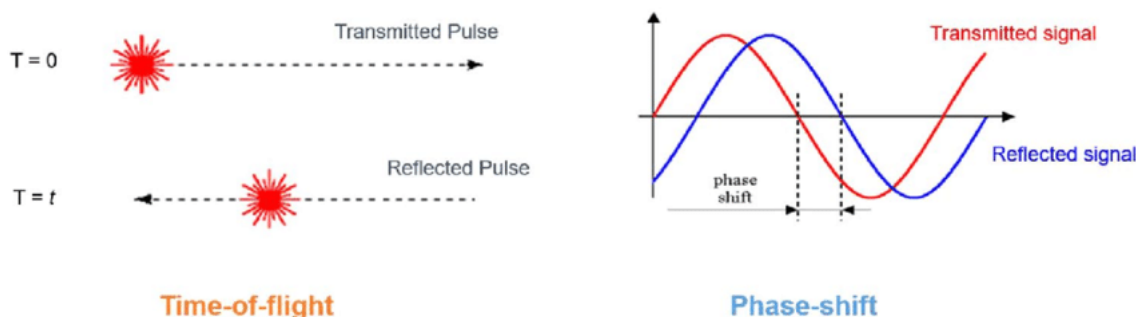


Fig. 2. Princípios de funcionamento do Time of Flight e Phase-Shift (Wang *et al.*, 2020).

## 1.2. O problema em estudo e a sua relevância

O LiDAR utiliza lasers para o cálculo de medições em relação ao solo, edifícios, florestação entre outros. Especialmente em aplicações externas, estão presentes as variáveis em estudo, tal como a luz ambiente, temperatura, humidade e reflexões existentes que possam afetar negativamente as medições obtidas. Todas estas variáveis são tidas em conta na emissão do pulso de laser do equipamento até à sua receção, o que pode causar falsas deteções, ainda que a probabilidade da mesma dependa da distância do objeto medido. Esta tecnologia assemelha-se ao radar que utiliza ondas de rádio no seu funcionamento e ao sonar que utiliza ondas sonoras, porém a utilização de uma fonte de luz remete para a variável que mais pode afetar o estudo, a luz ambiente. Esta variável irá ter impacto no feixe de luz do laser desde a sua emissão até à sua receção, conforme

demonstra a Fig. 3, pois o facto de tanto o laser como a luz ambiente possuírem fótons, poderá levar ao erro do recetor reconhecer fótons que não os do laser emitido (Beer *et al.*, 2018).

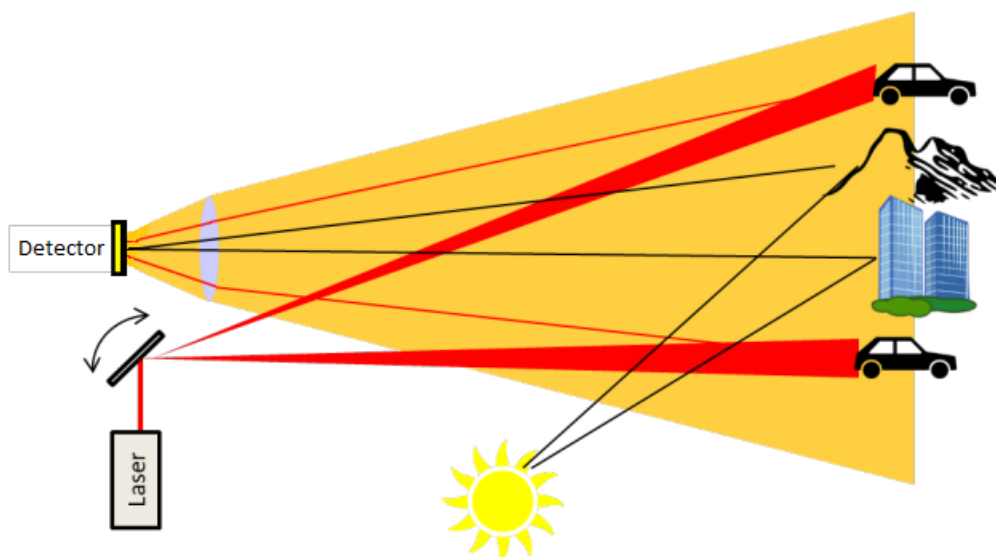


Fig. 3. O efeito da luz ambiente sobre o recetor do equipamento LiDAR, adaptada de (Fenske & Bartlett, 2018).

O estudo realizado por Gao *et al.* (2018) quanto à precisão de um LiDAR quando colocado em temperaturas adversas no espaço, tornou-se muito esclarecedor. Concluiu-se que com o aumento da temperatura, um erro crescente de medição fica associado, isto devido ao atraso entre a emissão e a receção do sinal ótico, conforme exposto na Fig. 4. As conclusões chegaram a um atraso de 6,8 ns, que resulta num aumento de 1,02 metros na distância final, sendo que este erro de medição poderá ter uma grande influência quando se trata de aplicações que requeiram muita precisão, como por exemplo encontros espaciais e ancoragem de equipamentos espaciais (Gao *et al.*, 2018). Será importante estudar o comportamento do equipamento quando colocado a diferentes temperaturas do meio ambiente.

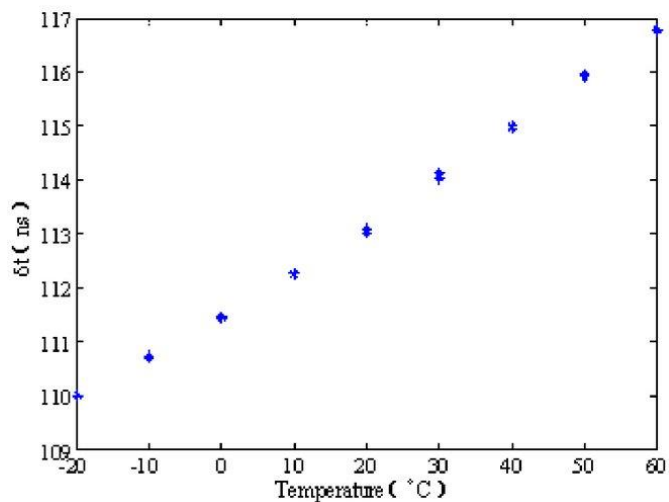


Fig. 4. Relação temperatura(°C)/tempo(ns) na medição a laser (Gao *et al.*, 2018).

A humidade pode trazer dificuldades principalmente quanto à impermeabilização do equipamento, visto ter eletrónica que se pode danificar devido à condensação. Em norma, os equipamentos para ambiente exterior (*outdoor*) são robustos o suficiente para operar em ambientes com elevada humidade, já os equipamentos para ambiente interior (*indoor*) podem sofrer com a condensação por não terem os seus circuitos protegidos. Ainda que a proteção da eletrónica seja um obstáculo a controlar, a humidade pode afetar a qualidade das medições obtidas, pois o laser é um feixe de luz que pode ser refratado ao passar por meios de diferentes massas específicas como o ar e a água, tal como exposto na Fig. 5. A presença de humidade entre o emissor e o recetor do laser pode resultar em leituras com erros associados ou até mesmo não se conseguir uma leitura (Matthews, 2021). Uma névoa espessa de minúsculas gotículas de água pode bloquear por completo um laser, pois são comparáveis ao comprimento de onda da luz, conforme indicado na Fig. 6, chegando a uma redução de aproximadamente 50%. A condensação extrema no emissor e recetor pode refratar o feixe levando ao erro, pois a gota de água absorve a luz. Uma experiência com esta variável pode auxiliar a estudar o quanto negativo pode afetar as medições.

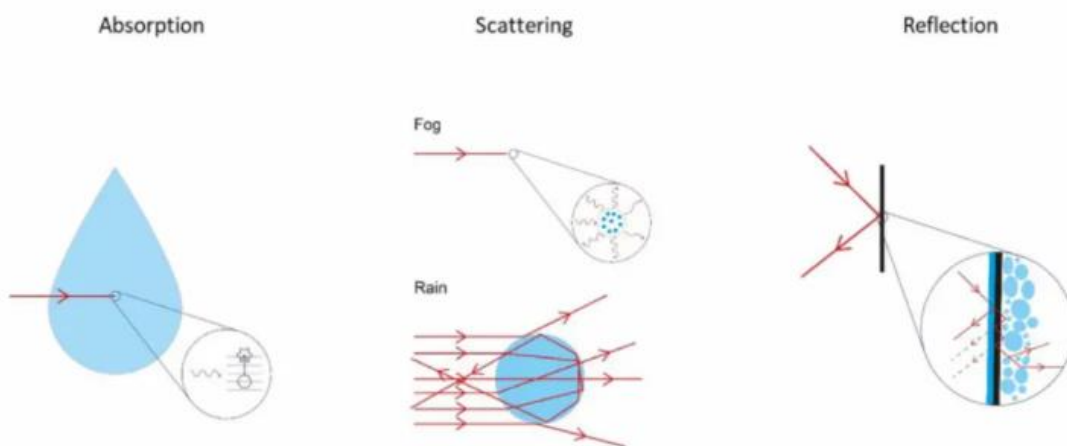


Fig. 5. Comportamento de um feixe de luz quando absorvido (*Absorption*), disperso (*Scattering*) e refletido (*Reflection*) (Baker-Campbell, 2021).

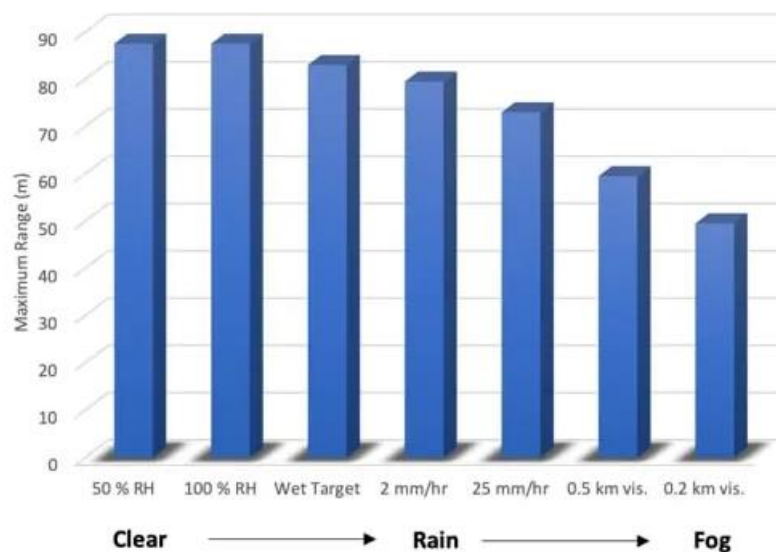


Fig. 6. O impacto da humidade relativa (RH), da chuva (Rain) e do nevoeiro (Fog) no alcance de um equipamento a laser (Baker-Campbell, 2021).

A última variável em estudo é a reflexão, um fenómeno em que uma onda de luz atinge uma superfície e muda de direção/sentido, mas continua no mesmo meio de propagação. Este é um processo fulcral pra a obtenção de dados. O laser emitido é refletido até ao recetor para que a medição seja validada, mas isto nem sempre acontece, tudo devido ao tipo de reflexões que podem existir consoante as superfícies dos objetos (Miguel Neta, 2021). Assumindo a existência de dois tipos de reflexão, obtemos uma reflexão difusa e reflexão especular. Numa reflexão difusa, a luz

incide em materiais de superfície irregular e é refletiva em todas as direções. Já uma reflexão especular, os raios incidem em direções paralelas e, devido à regularidade da superfície refletora, a sua reflexão mantém essas propriedades, de acordo com o exposto na Fig. 7.

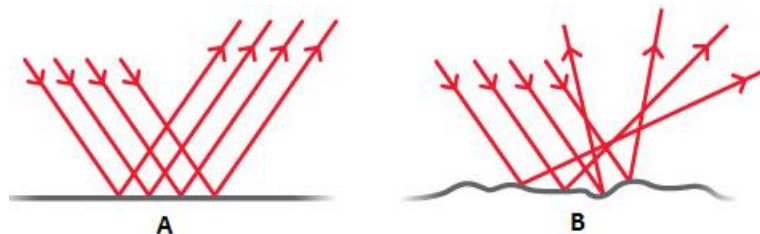


Fig. 7. Reflexão especular (A) e reflexão difusa (B) (Miguel Neta, 2021).

Com isto pode-se admitir que a reflexão pode vir a ser um problema aquando da presença de materiais como espelhos. Sendo hoje muito comum em ambientes reais, pode confundir um equipamento LiDAR se uma superfície espelhada se trata de um objeto ou não. A Fig. 8 apresenta os resultados de um estudo utilizando equipamento LiDAR onde é indicado que a reflexão do espelho e a transparência de um vidro pode causar erros de medição.

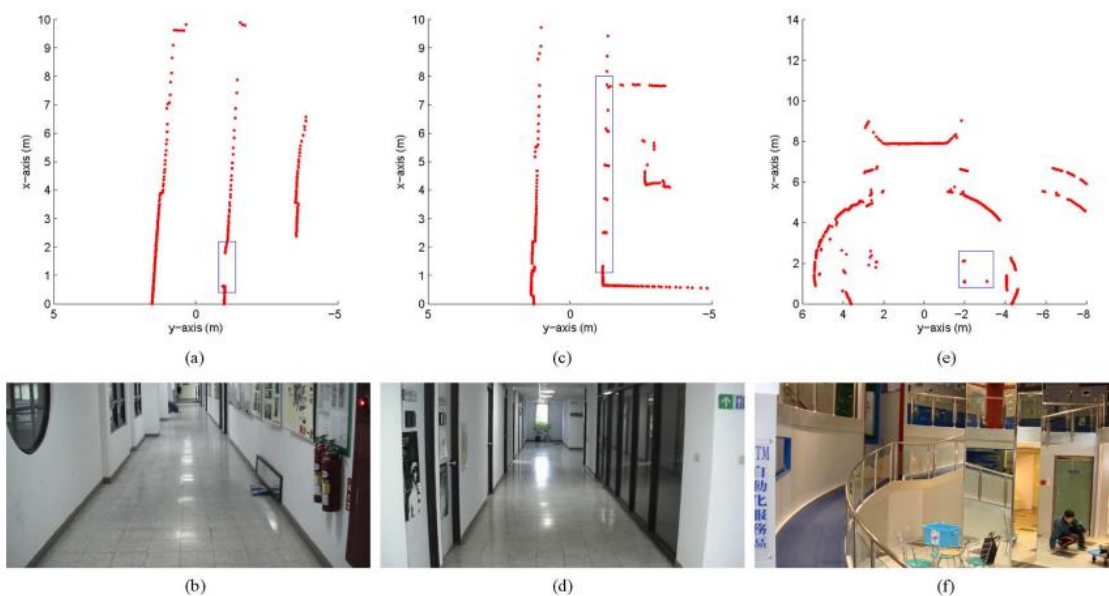


Fig. 8. Três casos de estudo, onde está presente um espelhos ao nível do chão (a-dados LiDAR, b-imagem real), janelas em vidro ao longo do corredor (c-dados LiDAR, d-imagem real) e um pilar espelhado (e-dados LiDAR, f-imagem real) (Yang & Wang, 2011).

### **1.3. Objetivos e contribuição da dissertação**

O objetivo desta dissertação consiste no estudo de variáveis como a luz ambiente, temperatura, humidade e reflexão podem afetar um equipamento com tecnologia LiDAR. Pretende-se analisar como a utilização de um equipamento *indoor* de baixo custo aplicado a um ambiente *outdoor* pode oferecer alguma resistência quanto à qualidade dos dados obtidos. É pretendido assim o estudo dos dados obtidos aquando das variáveis presentes e a sua interpretação.

A utilização de um equipamento de baixo custo irá permitir o desenvolvimento de projetos de investigação sem teor comercial, com intuito de estudar as capacidades da tecnologia LiDAR e as mais valias adjacentes. A aplicação deste estudo numa área como a robótica, irá ajudar a melhorar sistemas como a condução autónoma, mapeamento do meio envolvente, deteção de obstáculos entre outros.

### **1.4. Visão geral e organização da dissertação**

Esta dissertação está organizada em **cinco** capítulos, o primeiro capítulo é uma introdução da criação e evolução da tecnologia LiDAR. É descrito detalhadamente o problema em estudo e a relevância que tem num equipamento que utiliza LiDAR, os objetivos ambicionados são mencionados assim como o contributo que a dissertação para futuros projetos.

O segundo capítulo apresenta o estado de arte, onde são descritos vários tipos de equipamentos e as suas diferenças quando aplicados no mundo real, sendo acompanhados com informações técnicas dos fabricantes e uma imagem representativa dos mesmos. São dados exemplos reais onde a tecnologia já foi aplicada, assim como a taxa de sucesso que obtiveram. Esta dissertação apoia-se em alguns destes exemplos, visto que, o problema em estudo ser semelhante.

O terceiro capítulo descreve os materiais e métodos que foram utilizados na realização deste estudo, cada material retém uma breve explicação para a sua escolha assim como a sua participação no desenvolvimento da dissertação.

O quarto capítulo fornece o desenvolvimento de todo o estudo, os testes realizados e os dados obtidos. Os dados são interpretados conforme o objetivo final e discutido o seu sucesso.

Em suma, o quinto capítulo apresenta as conclusões do trabalho desenvolvido e uma apreciação do que pode ter falhado a fim de promover sugestões de melhoria para projetos futuros.



## 2. Estado da Arte

Este capítulo inicia-se com uma apresentação dos equipamentos com tecnologia LiDAR presentes no mercado e a sua empregabilidade em projetos de distintas finalidades. Uma maior ênfase em projetos semelhantes ao estudo também é tida em conta. A partir destes exemplos, torna-se clara a importância das aplicações LiDAR para a Indústria 4.0.

### 2.1. Estado da tecnologia LiDAR

O LiDAR é uma tecnologia de varrimento ótico que mede as propriedades da luz irradiada para determinar distâncias entre ele e um alvo. O disparo de pulsos de luz laser na superfície do objeto é um método para determinar a sua distância, como mostra a Fig. 9. A luz viaja a uma velocidade de cerca de 300.000 km/s no vácuo, como este é um valor constante, o LiDAR é assim capaz de calcular a distância ao alvo (Hutabarat *et al.*, 2019).

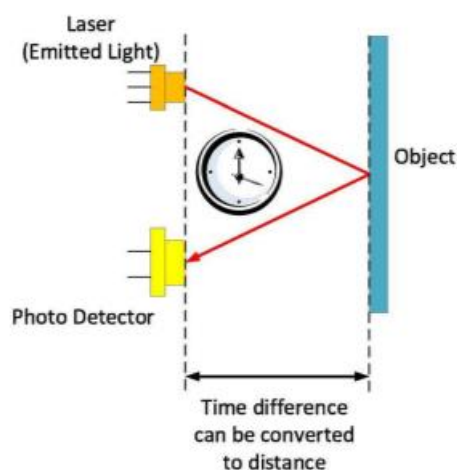


Fig. 9. Princípio de funcionamento de um sensor LiDAR (Hutabarat *et al.*, 2019)

Dependendo do equipamento, o LiDAR compreende dois tipos de medição, o “*single point-and-shoot*”, método onde apenas um pulso unidirecional realiza a medição, como também pode operar num modo de varrimento rotacional. No modo de varrimento, o LiDAR calcula valores contínuos dependendo da frequência de pulsação e da frequência de rotação, ou seja, LiDAR vai girando à frequência de rotação numa faixa angular até 360°, tirando amostras consoante a frequência de pulsação.

### **2.1.1. Sensores LiDAR como variante 1D, 2D e 3D**

Na sua versão simples, os sensores LiDAR operam como medidores de distância e em sensores como sistemas de medição de distância pontuais. Para a medição direta da distância, eles são direcionados para um alvo natural ou um refletor. Sensores que operam nesta base em uma dimensão (distância) são sensores unidimensionais, ou seja, sensores 1D.

Se o feixe de medição for movido ou girado em um plano, então será obtido um dado sobre a distância e o ângulo, portanto, duas dimensões. Geralmente, os sensores utilizados para este tipo de medição são denominados de *scanners* a laser 2D ou sensores 2D-LiDAR. Eles determinam valores medidos numa série sequencial dentro de um mesmo intervalo de tempo entre as medições, em casos normais.

Na terceira dimensão, trabalha-se com sensores LiDAR quando estes são inclinados. Neste caso, são obtidas informações sobre distância e posição na direção  $x$  como também sobre as posições na direção  $y$  e  $z$ . A mesma informação sobre os diversos parâmetros do espaço é obtida quando vários sistemas emissores ou receptores são movidos em diferentes ângulos horizontais em um sensor fazendo varrimento.

## **2.2. Sensores de medição linear (1D)**

Os sensores de distância fazem uso do alongamento linear unidimensional na direção do objeto de medição, a fim de determinar distâncias e alterações da distância sobre alvos naturais ou refletores. De seguida são apresentados alguns exemplos deste tipo de sensor e as suas especificações técnicas.

### **2.2.1. TF mini Plus (BENEWAKE)**

O TF mini Plus, é um sensor LiDAR de curto alcance unidirecional, exposto na Fig. 10. Apresenta características como ser de baixo custo, trinta e cinco dólares (\$35) pelo site do fabricante, tamanho pequeno e de baixo consumo. O equipamento apresenta IP65 o que expande os campos e cenários de aplicação. A Tabela 1 apresenta as especificações técnicas e parâmetros fornecidos pelo fabricante (Benewake Co., 2020).



Fig. 10. Sensor LIDAR 1D TF mini Plus, produzido por Benewake (Benewake Co., 2020).

Tabela 1. Especificações técnicas e parâmetros do sensor LiDAR 1D TF mini PLUS.

<b>Parâmetros de medição</b>	Distância de medição	0.1m~12m (90% Refletividade)
		0.1m~4m (10% Refletividade)
	Precisão	±5cm (0.1m-5m)
		±1% (5m-12m)
	Resolução	1cm
	Frequência de medição	1-1000Hz (Ajustável)
	Temperatura trabalho	-20°C~60°C
Nível Proteção	IP65	
<b>Parâmetros óticos</b>	Fonte Luz	LED
	Comprimento de onda	850nm
	Tensão de alimentação	5V ±0.5V
<b>Parâmetros elétricos</b>	Corrente média	≤110 mA
	Consumo de energia	550mW (Modo Poupança de Energia: <100mW)
	Dimensões	35mm*18.5mm*21mm
<b>Outros parâmetros</b>	Peso	12g±1g
	Material invólucro	PC/ABS

#### **2.2.1.1. Sistema de Previsão de Transição do Modo de Locomoção Sensível ao Ambiente**

Uma necessidade emergente de prever as transições do modo de locomoção para permitir uma resposta natural e suave de dispositivos auxiliares ativos de membros inferiores, como próteses para assistência de locomoção na vida, diária levou ao estudo de um sistema automático, independente do utilizador, usando uma estratégia de reconhecimento do ambiente em redor através do laser infravermelho TF mini, medindo a distância entre o utilizador e o terreno (Almeida *et al.*, 2019).

Neste exemplo foram utilizados indivíduos saudáveis para extrair parâmetros reais para as diferenças de comportamentos consoante os diferentes tipo de terreno, tais como, terreno plano, rampa ascendente e descendente e escadarias. A informação recolhida possibilitou a construção

de uma árvore de decisão heurística de 3 camadas consoante os dados obtidos pelo LiDAR TF mini, encontrando-se o esquema representativo exposto na Fig. 11. Os resultados mostram uma precisão de previsão acima de 80% para todas as transições de locomoção, alcançando 100% de sucesso de previsão para as transições rampa descendente/escada para terreno plano. Outro aspeto de elevada importância é o tempo de resposta do equipamento aquando das transições de locomoção, onde foram previstas com elevado tempo de previsão ( $> 0,73$  seg) o que potencializa a sua integração em estratégias de controlo de dispositivos assistidos (Almeida *et al.*, 2019).

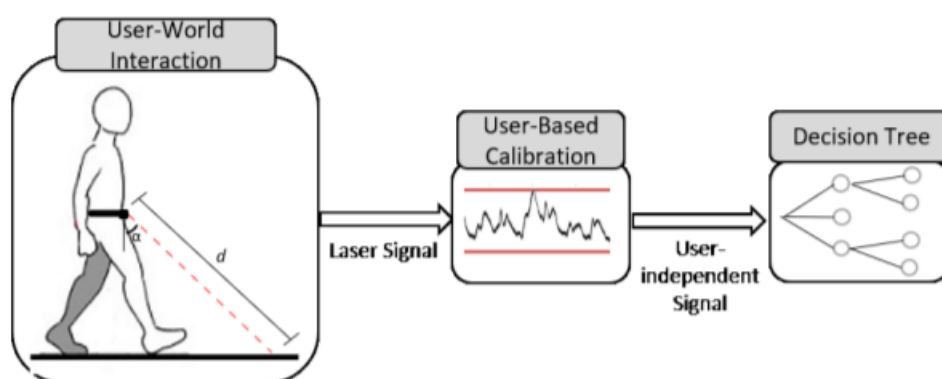


Fig. 11. Visão geral esquemática do sistema de previsão de transição de locomoção com reconhecimento de ambiente. O sensor laser TF mini aponta para o solo com um ângulo  $\alpha=45^\circ$  (entre o feixe de laser e a linha vertical representada ao longo do abdômen do utilizador)(Almeida *et al.*, 2019).

## 2.3. Sensores de medição de superfícies (2D)

O desenvolvimento de sensores 2D teve como objetivo manter as excelentes propriedades da medição com laser e aproveitá-las para um sensor de medição de superfícies.

Nos sensores LiDAR, a sequência dos disparos dos pulsos do laser é sincronizada com a frequência de rotação do motor e com a resolução angular desejada. Normalmente, a frequência máxima dos disparos da fonte do laser e a resolução angular desejada determinam a velocidade de rotação do motor.

### 2.3.1. LiDAR Sensor 2D R2000 (Pepperl+Fuchs)

Baseado na tecnologia de variação de pulso (PRT- *Pulse Ranging Technology*), o sensor é adequado para medições com um longo alcance e um pequeno ponto de luz. O dispositivo exposto na Fig. 12, realiza um varrimento ao ambiente em todo o ângulo de medição ( $360^\circ$ ). Devido à alta

frequência de varrimento, este tipo de sensor é adequado para aplicações avançadas. O dispositivo atende a classe de laser 1 e é seguro para os olhos, não sendo necessário proteção extra para os utilizadores do equipamento. Uma ampla gama de acessórios permite que o sensor seja usado em diferentes aplicações. A Tabela 2 apresenta as especificações técnicas e parâmetros fornecidos pelo fabricante (Pepperl+Fuchs Group, 2021).



Fig. 12. Sensor LiDAR 2D R2000, produzido por Pepperl+Fuchs (Pepperl+Fuchs Group, 2021).

Tabela 2. Especificações técnicas e parâmetros do Sensor LiDAR 2D R2000.

<b>Parâmetros de medição</b>	Distância de medição	0.3m~3m (10% Refletividade)
		0.2m~10m (90% Refletividade)
	Precisão	± 35mm
	Resolução	1mm
	Ângulo de resolução	0.014°
	Frequência de medição	250kHz
	Temperatura trabalho	-10°C~50°C
	Ângulo de trabalho	360°
<b>Parâmetros óticos</b>	Nível Proteção	IP65
	Fonte Luz	Laser Diodo
	Comprimento de onda	660nm
<b>Parâmetros elétricos</b>	Tensão de alimentação	10V~30V DC
	Corrente de alimentação	≤440 mA /24V DC
	Consumo de energia	<15W
<b>Outros parâmetros</b>	Dimensões	116.5mm*106mm*125.7mm
	Peso	0.8 kg
	Material invólucro	PC/ABS/Alumínio

### 2.3.1.1. *Seguimento autónomo para robôs móveis em ambientes dinâmicos*

O seguimento autónomo é uma das questões-chave em robótica móvel, com uma ampla gama de aplicações nas áreas comercial, industrial e militar. Para alcançar o seguimento autónomo, o robô precisa não apenas detetar e rastrear o alvo de maneira robusta, mas também o seguir com eficiência, evitando obstáculos. Jin *et al.* (2020) fizeram uso de um equipamento LiDAR R2000 com duas dimensões, isto permitiu identificar, rastrear e seguir a pessoa alvo em ambientes dinâmicos.

O método proposto considera não apenas a distância entre o robô e o alvo, mas também a diferença entre a direção do robô e a direção de referência fornecida pelo campo de gradiente de direção, para evitar cair no ótimo local. Para validar o desempenho do método proposto, uma série de ensaios experimentais de acompanhamento de pessoas são realizados em ambientes dinâmicos complexos. A Fig. 13 exemplifica os testes realizados.

Os resultados experimentais mostram que o algoritmo de seguimento proposto pode efetivamente lidar com o problema de oclusão e seguir de forma robusta a pessoa alvo, evitando rapidamente os obstáculos estáticos e dinâmicos (Jin *et al.*, 2020).

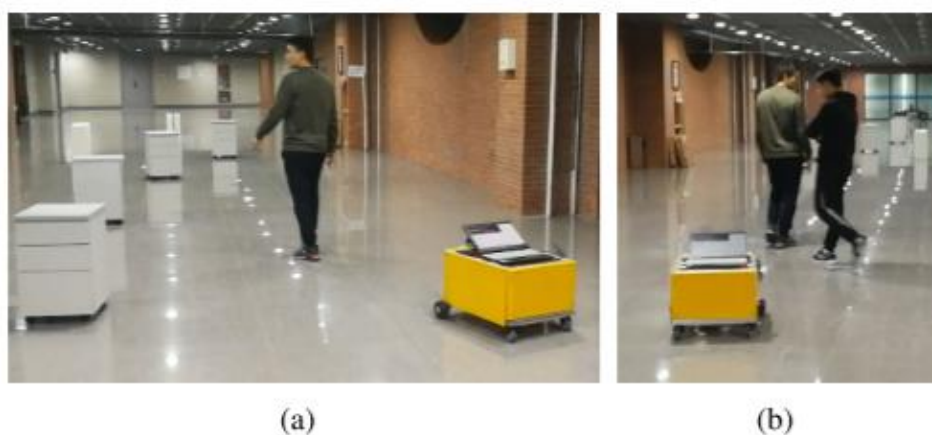


Fig. 13. Testes de performance em ambientes com obstáculos estáticos (a) e em ambientes com obstáculos dinâmicos, pessoas a cruzar a linha de perseguição (b) (Jin *et al.*, 2020).

## 2.4. Sensores de medição espacial (3D)

Partindo do princípio descrito dos sensores LiDAR que medem superfícies, existe a questão de como podem ser medidos objetos em três dimensões.

Em sensores 3D e no princípio de medição que funciona por via de um espelho, desviando o “ângulo de visão” do caminho de emissão-recepção, as vantagens da medição a laser ficam mantidas. Se, além disso, os módulos forem orientados para ângulos diferentes, então, ao medir objetos, adicionalmente à distância e ao ângulo da direção de varrimento, ainda podem ser determinados os ângulos no plano dos objetos, ou seja, as coordenadas  $x, y, z$  no espaço, de acordo com o exposto na Fig. 14. Para a medição em todos os planos, as vantagens da alta sensibilidade e do longo alcance ficam mantidas.

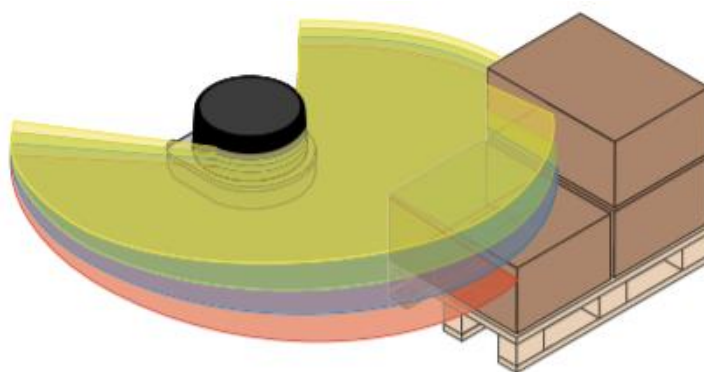


Fig. 14. Percepção de um sensor LiDAR com 4 níveis de varrimento (Harald Weber, 2018).

### 2.4.1. Puck 3D (Velodyne Lidar)

O Puck da Velodyne Lidar, exposto na Fig. 15, é um LiDAR pequeno e compacto com desempenho e energia otimizados para uso em uma variedade de aplicações, desde automóvel, mapeamento, robótica, segurança, cidades inteligentes e muito mais. Um exemplo da sua aplicação está representado na Fig. 16. O Puck tem um preço, permitindo em tempo real, visão ao seu redor, distância 3D e medições de refletividade calibradas.

O equipamento usa tecnologia de classe 1, uma certificação que assegura a proteção ocular aquando direcionado os olhos, esta certificação permite o Puck ser um sensor adequado para aplicações de veículos autónomos (AV) de baixa velocidade. A Tabela 3 apresenta as especificações técnicas e parâmetros fornecidos pelo fabricante (Velodyne Lidar, 2019).



Fig. 15. Sensor LiDAR PUCK 3D, produzido pela Velodyne Lidar.

Tabela 3. Especificações técnicas e parâmetros do Sensor LiDAR 3D PUCK.

<b>Parâmetros de medição</b>	Distância de medição	100m		
	Precisão	± 3cm		
	Ângulo de resolução	Vertical	2.0°	
		Horizontal	0.1°~0.4 °	
	Frequência de rotação	5Hz~20Hz		
	Temperatura trabalho	-10°C~60°C		
	Ângulo de trabalho	360°		
	Nível Proteção	IP67		
Comprimento de onda	903nm			
<b>Parâmetros elétricos</b>	Tensão de alimentação	9V~18V DC		
	Consumo de energia	8W		
	Dimensões	71.7mm* Ø103.3 mm		
<b>Outros parâmetros</b>	Peso	0.830 kg		

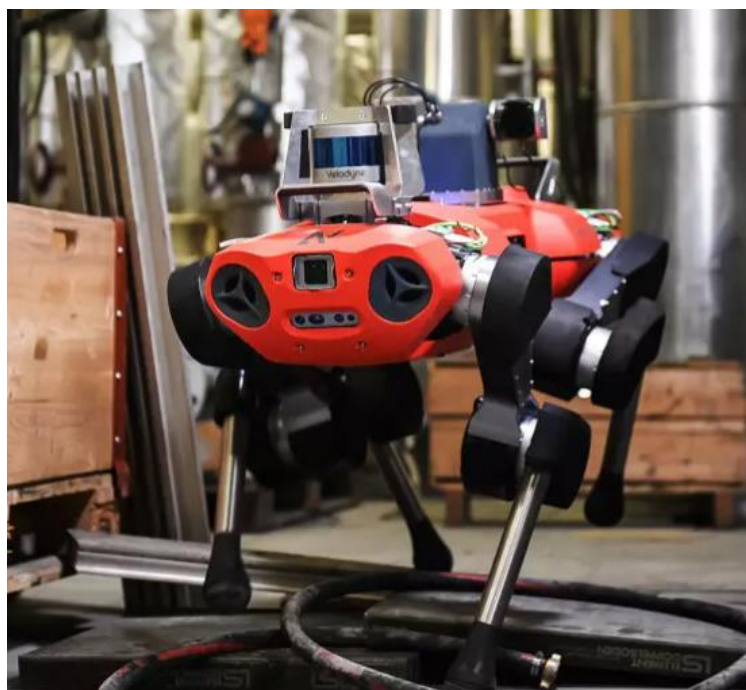


Fig. 16. Exemplo de uma aplicação do LiDAR PUCK 3D, promovendo soluções para aplicações robóticas com avançada mobilidade e autonomia requerida em terrenos desafiantes (Velodyne Lidar, 2021).

#### 2.4.1.1. Navegação autónoma de veículos terrestres em ambientes heterogéneos utilizando um LiDAR 3D

A capacidade de condução de forma autónoma em ambientes heterogéneos sem sistemas de posicionamento global (GPS - *Global Positioning System*), identificação de padrões (por exemplo, seguir estradas) ou pontos de referência artificiais, é fundamental para a robótica de campo. Para enfrentar esse desafio, o estudo realizado por Pfrunder *et al.* (2017) apresenta uma estrutura completa de navegação para veículos terrestres não tripulados. Velodyne PUCK LiDAR são montados num veículo autónomo exposto na Fig. 17. Contando com essa configuração, o veículo é capaz de navegar por um local complexo de forma totalmente autónoma. O local de teste tem áreas densas, mato, atividades industriais, pedestres e outros veículos tripulados ou não tripulados. Sem qualquer outros sensores para redundância de dados obtidos, este veículo assim que se desliga do sistema GPS, fica regido pelos seus sistemas LiDAR, o principal sendo o sensor 3D Velodyne PUCK LiDAR, e mais três sensores LiDAR 2D na periferia do veículo.



Fig. 17. Veículo elétrico de tamanho real, John Deere TE Gator, equipado com Velodyne PUCK 3D LiDAR, assinalado a vermelho (Andreas Pfrunder *et al.*, 2017).

Este projeto contou com mais de 60 km de condução totalmente autónoma sem uma única falha de sistema ou de navegação.

## **2.5. Estudo do comportamento de Sensores LiDAR integrados em ambientes com condições climatéricas adversas**

A condução autónoma é um dos principais alvos de desenvolvimento na indústria automóvel atual. Embora os recentes automóveis incluam vários sistemas de assistência ao condutor, eletrónicos e comunicações, os requisitos de automação estão a criar um nível totalmente novo de oferta. A transição de carros com direção manual para carros automáticos levará anos e precisará evoluir um passo de cada vez (Kutilla *et al.*, 2016).

Um desafio real são as diferentes condições climáticas, quando até mesmo um condutor pode ter dificuldade em condução, tal como nevoeiro, neve, gelo, chuva, entre outros. Isso torna-se um problema muito mais sério quando um software é criado para conduzir um carro automatizado que precisa ser capaz de se adaptar a várias condições externas, de maneira semelhante à dos humanos.

Kutilla *et al.* (2016) concentraram o seu estudo na melhoria do desempenho de um equipamento LiDAR em condições de nevoeiro, tendo em conta os custos dos componentes do sensor laser ao ponto de manter razoável a viabilidade na implementação em automóveis de passageiros no futuro.

Os equipamentos com tecnologia LiDAR utilizados na área automóvel são usados principalmente para travagens de emergência, prevenção de colisões frontais e ajuda no estacionamento automático. O seu desempenho diminui significativamente no caso de nevoeiro, chuva forte ou queda de neve.

Antes de fazer qualquer integração no veículo, foram realizados testes a fim de compreender o comportamento do equipamento LiDAR na deteção de nevoeiro. Para tal, foi escolhido um aeroporto na Lapónia com pouca visibilidade devido ao intenso nevoeiro.

O LiDAR utilizado foi Ibeo LUX, representado na Fig.18. Trata-se de um sensor com rotação contínua do espelho dentro do sensor. Em combinação com o laser, é gerada uma imagem completa do meio envolvente. Este equipamento tem uma vários potenciais campos de aplicações no setor automóvel, isto porque, o mesmo já se encontra configurado para condições climatéricas adversas e intensidades de tráfego (Ibeo Automotive Systems GmbH, 2022). A Tabela 4 apresenta as especificações técnicas e parâmetros fornecidos pelo fabricante (Ibeo Automotive Systems GmbH, 2017).



Fig. 18. Sensor LiDAR 3D ibeo LUX, produzido pela Ibeo Automotive Systems.

Tabela 4. Especificações técnicas e parâmetros do Sensor LiDAR 3D ibeo LUX.

<b>Performance do produto</b>	Distância de medição	30m		
	Precisão	± 10cm		
	Resolução da distância	4cm		
	Ângulo de resolução	Vertical	0.8°	
		Horizontal	Até 0.25°	
	Temperatura trabalho	-40°C~85°C		
	Ângulo de trabalho	110°		
	Taxa de atualização	25 Hz		
	Nível Proteção	IP68 (2m, 24h)		
		IP69K (conectores protegidos)		
<b>Parâmetros elétricos</b>	Comprimento de onda	905nm		
	Tensão de alimentação	9V~27V DC		
	Consumo de energia	7W		
<b>Outros parâmetros</b>	Dimensões	164.5mm* 93.2mm*88mm		

A implementação do sistema na detecção de nevoeiro foi colocada em prática durante o inverno. O fator neve também esteve presente. Durante este período, o equipamento estava instalado e a funcionar sem apresentar qualquer problema técnico. A Fig. 19 apresenta o sensor LiDAR implementado no terreno.



Fig. 19. Implementação do LiDAR num poste de visibilidade no aeroporto de Sodankylä, Lapônia (Matti Kutila *et al.*, 2016).

Foram realizados novos testes num período mais longo, durante três meses do outono de 2015. Durante esta experiência, o sistema obteve duas falhas interrompendo a obtenção de dados num espaço de três semanas, conforme apresentado na Fig. 20. Ainda assim, a fiabilidade do sistema não foi posta em causa, pois obteve mais de 90% de precisão na visibilidade real no local. Os resultados retratam claramente três intervalos de amostragem, com visibilidade de 110m, 50m e 0m, sendo sem nevoeiro, nevoeiro leve e nevoeiro denso, respetivamente.

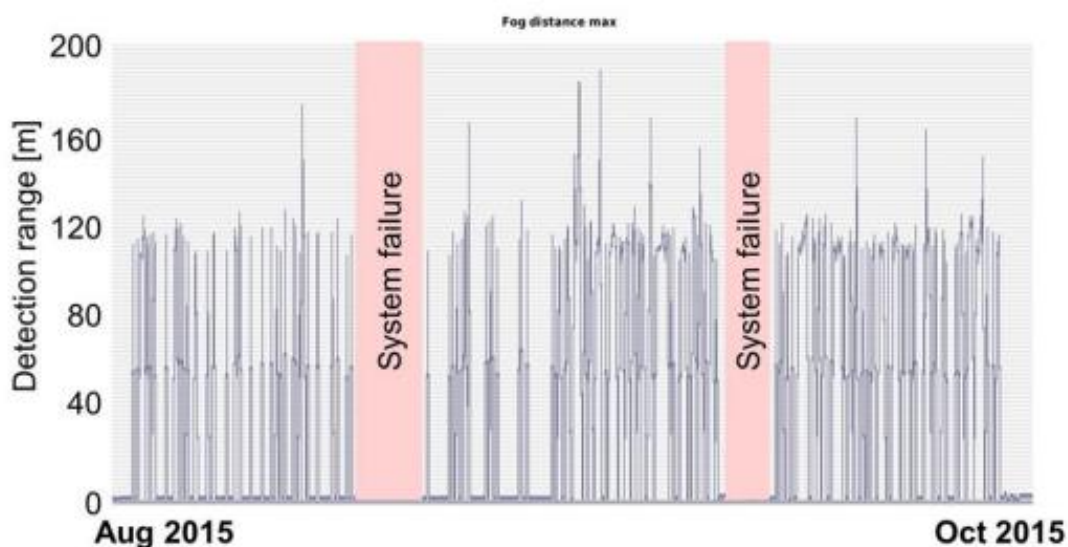


Fig. 20. Dados obtidos durante o teste de outono de 2015. As duas falhas do sistema identificadas assim como a perceção de diferentes capacidades de medição de distância conforme a densidade do nevoeiro (Matti Kutila *et al.*, 2016).

A avaliação de desempenho é baseada em informações sobre o quanto o desempenho do sensor é degradado em condições de nevoeiro. O principal desafio é permitir que carros automatizados e autônomos possam adaptar os seus recursos de vigilância em condições climáticas adversas.

Os resultados indicam que o equipamento LiDAR conseguiu uma precisão superior a 90% na detecção de nevoeiro. Este resultado permite supor que os resultados podem ser usados para o desenvolvimento de um sistema de percepção do ambiente de longo alcance.

## **2.6. Nota Conclusiva**

Neste capítulo foi aprofundado o estado da arte sobre a tecnologia LiDAR, enfatizando o modo de funcionamento da tecnologia e os equipamentos onde esta é empregue. Sobre as três dimensões que esta tecnologia pode operar, foi dado a conhecer um equipamento disponível no mercado sobre cada uma das dimensões apresentadas, assim como detalhes da sua aplicação.

No capítulo seguinte serão abordados os equipamentos, materiais e softwares utilizados para a realização dos estudos, desde as suas especificações técnicas e funcionalidades. Serão também apresentados os layouts dos ambientes utilizados para os estudos.



## 3. Materiais e Métodos

Este capítulo apresenta um conjunto de equipamentos, materiais, softwares e métodos que permitiram a realização do estudo. Uma revisão bibliográfica das soluções presentes na literatura ajudou para uma melhor seleção para o desenvolvimento do projeto.

### 3.1. Materiais

#### 3.1.1. RPLIDAR A1M8

O RPLIDAR A1M8, exposto na Fig. 21, é uma solução de scanner a laser 2D de 360°, LiDAR, de baixo custo desenvolvida pela SLAMTEC. O sistema pode realizar um varrimento de 360° dentro de um alcance de 12 metros. Os dados de nuvem de pontos 2D produzidos podem ser usados em mapeamento, localização e modelagem de objeto/ambiente (SLAMTEC, 2020).



Fig. 21. Sensor laser, LiDAR, RPLIDAR A1M8 (SLAMTEC, 2022).

O equipamento consiste num sistema de medição de triangulação a laser, conforme demonstra a Fig. 22. Pode operar em ambientes internos sem exposição direta à luz solar.

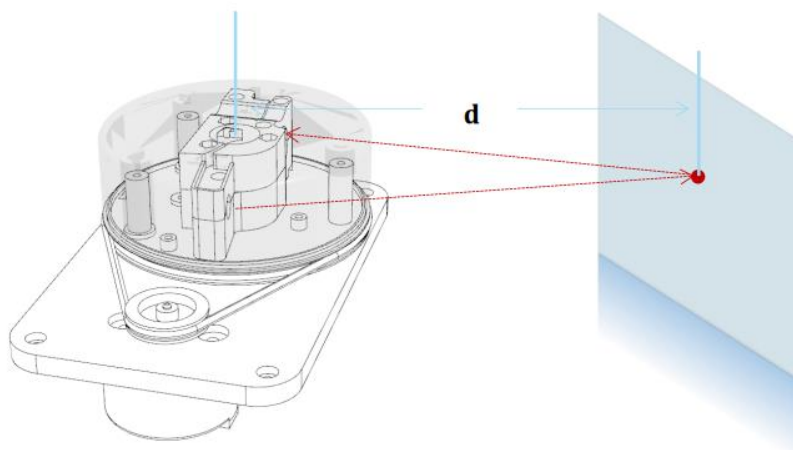


Fig. 22. Esquema do sistema de medição de triangulação a laser do RPLIDAR A1M8 (SLAMTEC, 2020)

O RPLIDAR A1M8 é conectado ao computador de uma forma simples. Esta ponte LiDAR/Software apenas encontra um intermediário, um adaptador que faz a conversão de dados UART para dados USB. Este módulo também fornece a alimentação ao equipamento LiDAR, de acordo com o esquema representativo de ligações exposto na Fig. 21. Assim que o equipamento estiver conectado ao computador, o mesmo contém um LED na parte inferior que irá acender, o que simboliza o início de digitalização. A Tabela 5 apresenta as especificações técnicas e parâmetros fornecidos pelo fabricante (SLAMTEC, 2020).

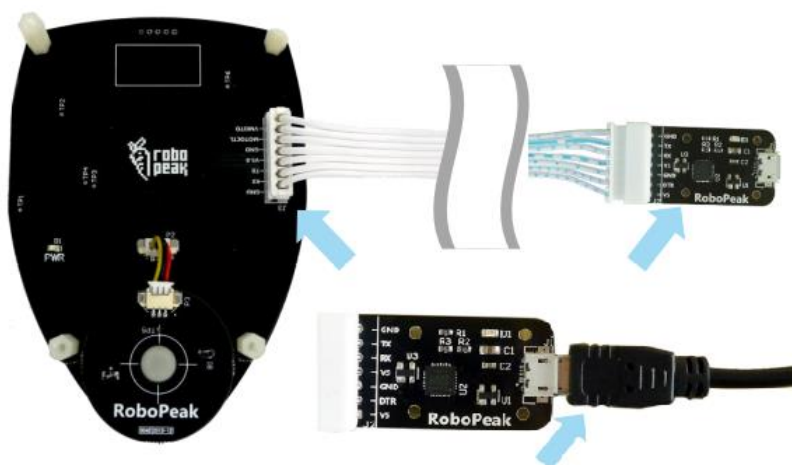


Fig. 23. Esquema de ligações RPLIDAR A1M8 (UART)/adaptador (UART) e adaptador (Micro-USB)/computador (USB) (SLAMTEC, 2016).

Tabela 5. Especificações técnicas e parâmetros do Sensor LiDAR 2D RPLIDAR A1M8.

<b>Performance do produto</b>	Distância de medição	0.15 m~12m
	Precisão	± 35mm
	Resolução	<0.5mm (<1.5 m)
		<1% da distância (todo a distância medida)
	Ângulo de resolução	≤1°
	Frequência de medição	5.5Hz
	Frequência Amostragem	8000Hz
	Temperatura trabalho	20°C~40°C
	Ângulo de trabalho	360°
Nível Proteção	IP65	
<b>Parâmetros óticos</b>	Fonte Luz	Laser infravermelho
	Comprimento de onda	785nm
	Potência do laser	3mW
<b>Parâmetros elétricos</b>	Tensão de alimentação do motor	5V~9V DC
	Tensão de alimentação do sensor	4.9V~5.5V DC
	Corrente de alimentação do sensor	80mA /5V (sleep mode)
		300mA /5V (work mode)
Corrente de alimentação do motor	100mA /5V	
<b>Outros parâmetros</b>	Dimensões	96.74mm*51mm*56mm
	Peso	0.170 kg
	Material invólucro	PC/ABS

### 3.1.2. Sensor Xiaomi de Temperatura e Humidade

o sensor Xiaomi de Temperatura e Humidade exposto na Fig. 24, irá permitir obter medições rigorosas das condições de temperatura e humidade em tempo real no ambiente de estudo. Desta forma será mais fácil realizar uma correlação dos dados obtidos para diferentes meios ambientes. Este sensor possui um ecrã LCD de 1,5 polegadas para a observação dos dados. Conta também com uma ligação Bluetooth para emparelhar com a aplicação do smartphone a fim de consultar e gravar o histórico das medições obtidas.



Fig. 24. Sensor Xiaomi de Temperatura e Humidade 2 (Xiaomi Portugal, 2022).

A Tabela 6 apresenta as especificações técnicas e parâmetros (Xiaomi, 2022)

Tabela 6. Especificações técnicas e parâmetros do Sensor Xiaomi de Temperatura e Humidade 2.

<b>Performance do produto</b>	Distância de medição	0,15 m~12m	
	Resolução	Temperatura	±0,1 °C
		Humidade	±1% HR
	Medição de Temperatura	0°C - 60°C	
Medição de Humidade	0% - 99% RH		
<b>Parâmetros Comunicação</b>	Wireless	Bluetooth 4.2 Low Energy	
	Frequência de medição	2402MHz – 2480MHz	
<b>Parâmetros elétricos</b>	Tensão de alimentação do motor	2,5V~3V DC	
	Bateria	CR2032	
<b>Outros parâmetros</b>	Dimensões	43mm*43mm*12.5mm	
	Peso	0,018 kg	
	Material invólucro	PMMA/ABS	

### 3.1.3. Chapas Metálicas

A utilização de chapas metálicas coloridas para simulação do meio ambiente é fulcral, pois pode-se realizar o teste de reflexão sobre o fator cor e temperatura. Na Fig. 25 é apresentado um conjunto de nove cores e tipologia de material diferentes, contando com cinco chapas de alumínio com 1,5mm de espessura coloridas e uma sem cor, chapa de inox esmerilado de 1mm, chapa de ferro zincado de 0,9mm e chapa de ferro de 1,5mm.

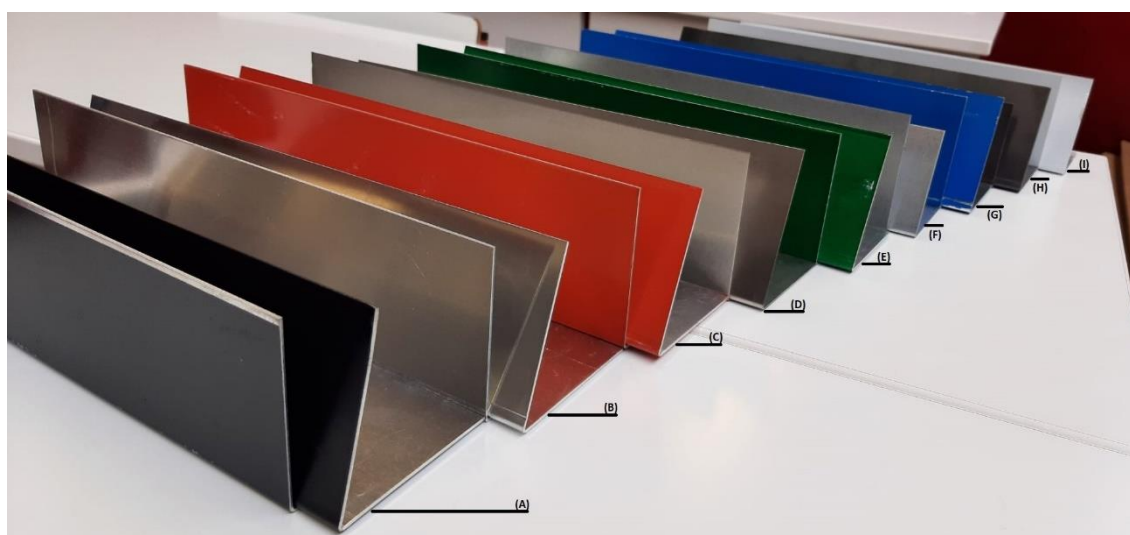


Fig. 25. Chapas metálicas, (A)-chapa de alumínio preto, (B)-chapa de alumínio sem cor, (C)-chapa de alumínio vermelha, (D)-chapa de inox esmerilado, (E)-chapa de alumínio verde, (F)-chapa de ferro zincado, (G)-chapa de alumínio azul, (H)-chapa de ferro, (I)-chapa de alumínio branco.

Na Fig. 25 são apresentadas duas chapas metálicas de cada cor, isto porque têm ângulos diferentes, sendo que uma se encontra com um ângulo de  $90^\circ$  e outra de  $70^\circ$ . Esta diferença é apresentada a fim de estudar o comportamento da reflexão para objetos que não estejam a  $90^\circ$  com o sensor LiDAR.

As diferenças de metais e cores levam a uma melhor semelhança do meio ambiente *outdoor*, ou seja, diferentes cores e materiais sujeitos a luminosidade e irradiação solar irão comportar-se de maneira diferente.

### 3.1.4. Espelho

Como já introduzido, existem conclusões suficientes que apontem para a implicação de objetos refletores na medição a laser. Visto que objetos refletores do tipo espelho são materiais que se encontram presente nos meios ambientes diários, a sua utilização é importante a fim de estudar as possíveis perdas de sinal e como mitigar esses acontecimentos.

Os espelhos utilizados foram adquiridos numa reciclagem municipal, o que leva que a sua forma seja irregular e de diferentes medidas, ainda que isto não venha a alterar o objetivo do estudo, conforme ilustra a Fig. 26.



Fig. 26. Espelhos utilizados nos testes práticos.

### 3.1.5. Vidro

Os vidros transparentes presentes em janelas domésticas ou automóveis podem ser um problema na medição a laser devido à sua permeabilidade que leva à refração e não à reflexão. Este fenómeno pode resultar numa perda de sinal após a sua incisão no material. Sobre as mesmas circunstâncias que os espelhos, a aquisição numa reciclagem municipal fez com que a sua forma regular não fosse possível, ainda que não comprometa o estudo, Fig. 27.

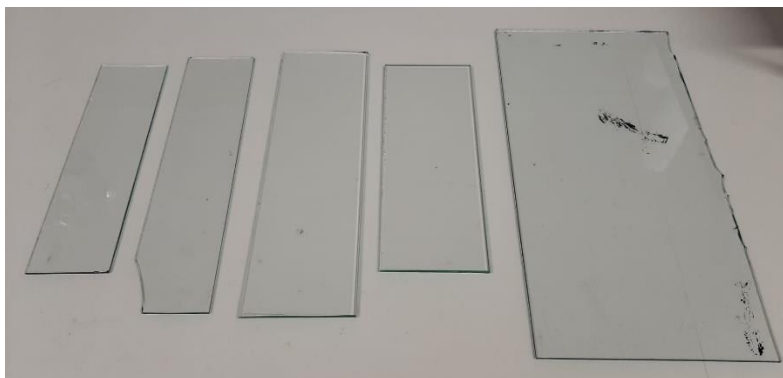


Fig. 27. Vidros transparentes utilizados nos testes práticos.

### 3.1.6. Aplicação Frame Grabber

Esta aplicação demo demonstra em tempo real os dados que o laser está a medir, num diagrama representativo do meio ambiente com um varrimento de 360°, conforme indicado na Fig. 28.

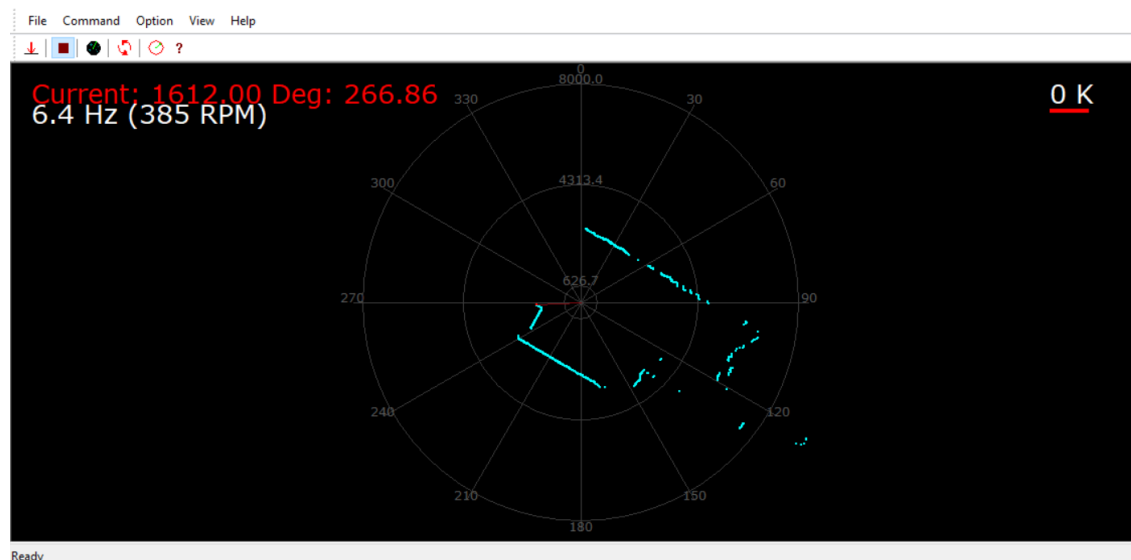


Fig. 28. Aplicação Frame Grabber.

A sua utilização apenas necessita que o equipamento LiDAR esteja conectado via USB. A esta porta de comunicação é atribuída um número que tem de ser selecionado na interface da

aplicação, a fim do programa saber qual a porta que carrega as informações e assim as processar. Esta interface de seleção está identificada na Fig. 29.

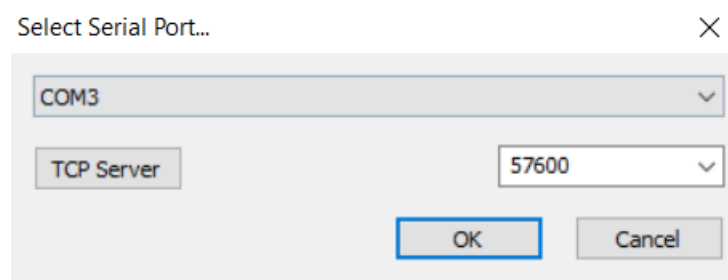


Fig. 29. Interface de início da aplicação para escolha da porta de comunicação com o equipamento LiDAR.

Assim que a porta de comunicação seja reconhecida, a aplicação abre o diagrama 360°. Apenas é necessário premir o botão Start, e o LiDAR começa a adquirir dados que são ilustrados no Frame Grabber, conforme exposto na Fig. 30.

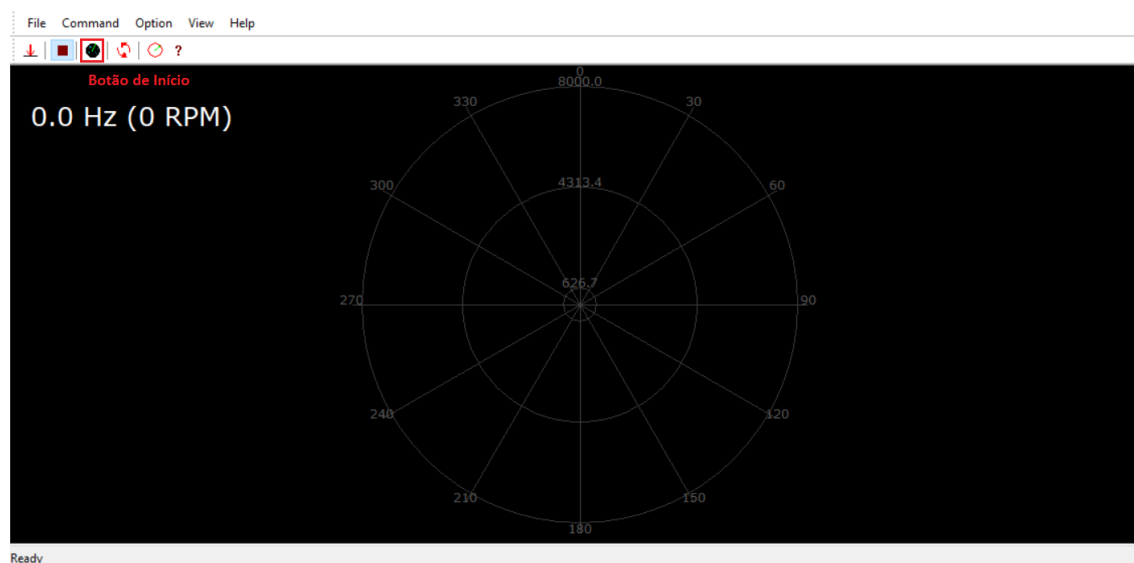


Fig. 30. Visualização do diagrama 360°, e o botão identificado permite o início da aquisição de dados.

Após a aquisição de dados é possível guardar as medições obtidas num ficheiro de texto que conta com uma medição em milímetros para cada ângulo medido. Posteriormente, estes dados poderão ser tratados em outros softwares.

### 3.1.7. Termopar FLUKE 51

A temperatura nos objetos presentes no meio ambiente é muito importante para o estudo da precisão de um equipamento de medição a laser. Um objeto ao dissipar a sua energia calorífica, pode interferir nos feixes do laser.

Assim sendo, a utilização de um termopar para a medição da temperatura de cada objeto permite estudar o comportamento de diferentes temperaturas para a mesma distância, podendo assim ser associado um erro de medição.

Esta medição foi realizada pelo equipamento termopar FLUKE 51, exposto na Fig. 31. O contato entre a sonda de medição e o objeto a medir irá determinar uma temperatura (em °C) a ser ilustrada no seu visor.



Fig. 31. Termopar FLUKE 51, equipamento de medição de temperatura.

## 3.2. Métodos

### 3.2.1. Disposição da sala para estudo *indoor*

A fim de criar um ambiente de testes *indoor*, foi escolhida uma sala de aulas da Universidade da Beira Interior, sendo consideradas duas disposições da sala para testes diferentes. A primeira visa a medição sobre chapas metálicas e de seguida a medição sobre espelhos e vidros. Ambas as medições foram feitas com o equipamento LiDAR localizado no centro da sala. Na primeira disposição, foram dispostas as chapas metálicas num formato espelho ao longo da sala, ou seja, o lado esquerdo da sala era simétrico ao lado direito. Esta disposição permite aferir se a luz solar tinha interferência ao refletir nas chapas do lado direito, já que esse mesmo lado conta com janelas, conforme demonstra a Fig. 32. A Fig. 33 apresenta uma versão simplificada da disposição da sala, em conformidade com a Fig. 32. Uma segunda disposição permite estudar o comportamento do equipamento LiDAR perante espelhos e vidros. A Fig. 34 demonstra a distribuição destes.



Fig. 32. Disposição da sala de testes *indoor*. Nesta imagem em panorâmica podemos confirmar a existência de janelas do lado direito da sala, assim como a porta e armários do lado esquerdo da sala.

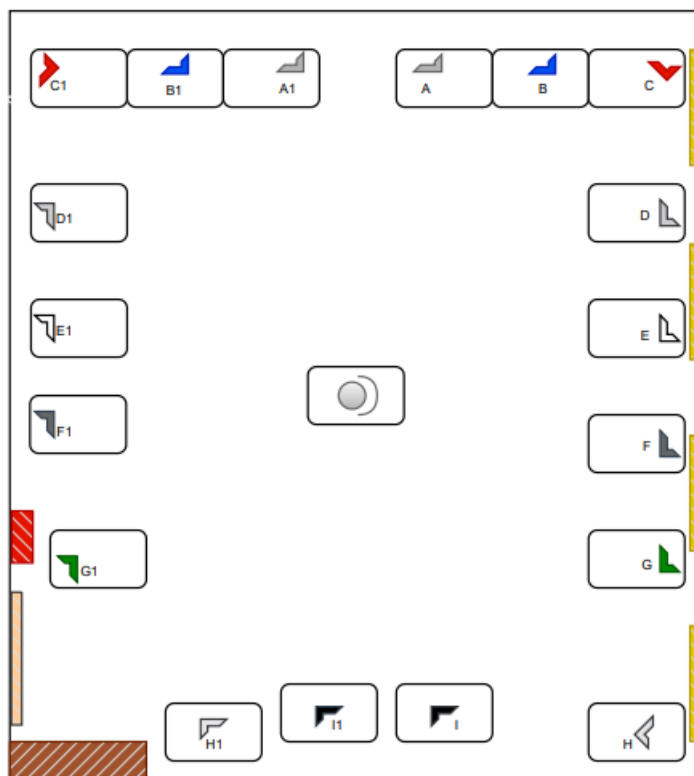


Fig. 33. Disposição da sala de testes *indoor*, as chapas metálicas, 90° e 70°, estão numeradas de A a I, o equipamento LiDAR está ilustrado no centro da sala, à direita (em amarelo) encontram-se as janelas, no canto inferior esquerdo são identificados dois armários e a porta de entrada da sala.

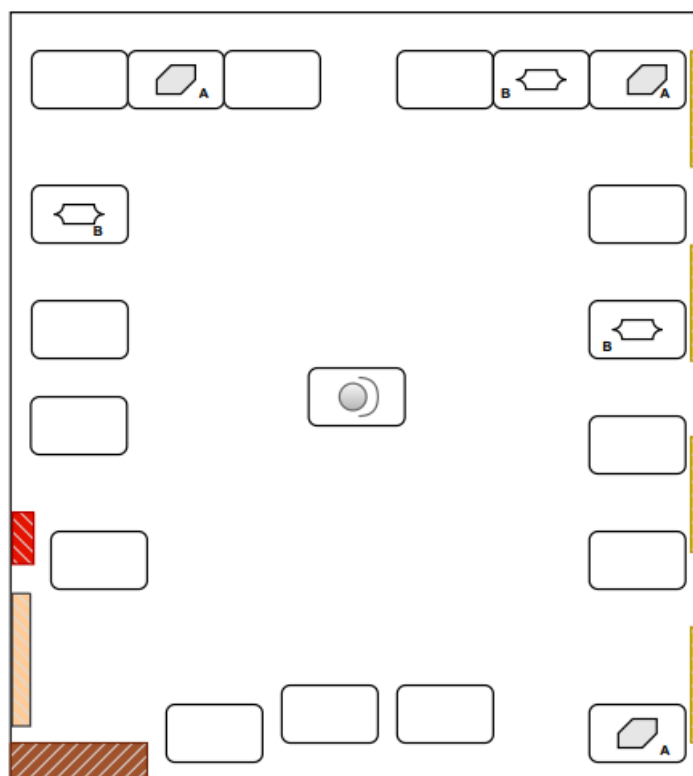


Fig. 34. Disposição da sala de testes *indoor*, contém os espelhos (A) e os vidros (B), o equipamento LiDAR está ilustrado no centro da sala, à direita (em amarelo) encontram-se as janelas no canto inferior esquerdo são identificados dois armários e a porta de entrada da sala.

### 3.2.2. Disposição do ambiente para estudo *outdoor*

A fim de criar um ambiente de testes *outdoor*, foi escolhido um parque de estacionamento da Universidade da Beira Interior, onde foram dispostas as diversas chapas metálicas ao longo deste e em volta do equipamento LiDAR, conforme exposto na Fig. 35. A escolha desta área deve-se à exposição solar direta assim como ao terreno plano, o que facilita no alinhamento das chapas com o laser do equipamento. A Fig. 36 apresenta uma representação do ambiente para melhor identificação das chapas metálicas.



Fig. 35. Disposição do ambiente de testes *outdoor*, equipamento LiDAR junto do computador no centro da imagem, chapas metálicas distribuídas aleatoriamente, possível identificação dos muros envolventes.

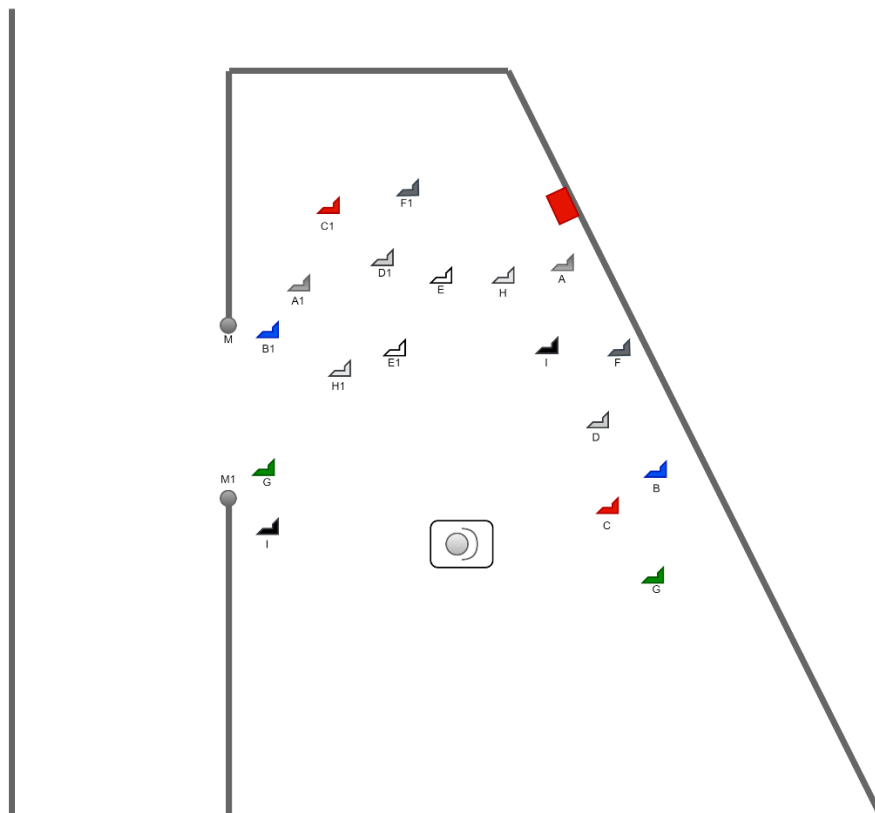


Fig. 36. Disposição do ambiente de testes *outdoor*, as chapas metálicas estão numeradas de A a I, o equipamento LiDAR está ilustrado ao centro. Foi tido em conta os muros da esquerda, identificados como M e M1 como referências de medição.

### 3.2.3. Disposição do ambiente para estudo em contexto real

Num último estudo ao equipamento, foi interessante ver a sua adaptação a diferentes alterações climáticas para o qual não foi concebido, ou seja, ambiente exterior. Foi considerado um dia de precipitação, ou seja, um ambiente com uma humidade relativa elevada e com alterações onde o céu estava encoberto e de seguida uma exposição solar substancial, isto de forma cíclica. Neste estudo foram utilizados carros de diferentes cores, branco, azul e verde, num parque murado, conforme exposto na Fig. 37. A Fig. 38 é uma representação do ambiente para melhor identificação das viaturas e do meio envolvente.



Fig. 37. Disposição do ambiente de testes *outdoor* em contexto real, equipamento LiDAR junto do computador no centro da imagem, viaturas distribuídas aleatoriamente, possível identificação dos muros envolventes.

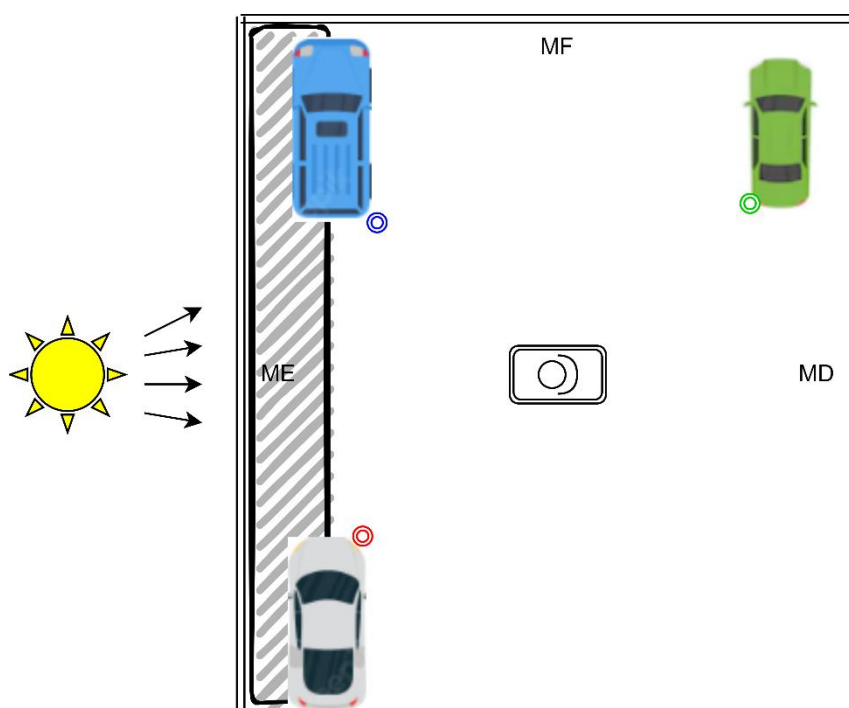


Fig. 38. Disposição do ambiente de testes *outdoor* em contexto real, equipamento LiDAR no centro da imagem, viaturas identificadas pela sua cor, orientação da exposição solar e proveniente sombra identificada pelo tracejado cinzento. Os círculos são pontos de referência para medição, as siglas ME, MF e MD significam muro direito, muro frontal e muro direito respetivamente.

### 3.2.4. Medição da temperatura e humidade relativa

A obtenção da temperatura ambiente assim como da humidade relativa foi realizada pelo sensor Xiaomi de Temperatura e Humidade. Estes dados foram guardados e serão apresentados juntamente com os resultados de cada teste prático. No entanto, a medição da temperatura das chapas metálicas foi estabelecida pelo equipamento FLUKE 51, um termopar de medição por contacto. Todas as medições foram realizadas com os objetos no local de estudo após um período de estabilização.

### 3.2.5. Tratamento de dados

Os dados obtidos dos diferentes estudos foram processados com intenção de estudar o erro de medição do equipamento em relação à medição real.

### **3.3. Nota conclusiva**

Neste capítulo, Materiais e Métodos, iniciámos com os diversos equipamentos e softwares utilizados para a realização do estudo prático. Foram apresentadas especificações técnicas dos equipamentos e a sua empregabilidade nos estudos práticos. Numa segunda fase, apresentamos os métodos utilizados na realização do estudo prático, ou seja, a disposição dos ambientes de estudo devidamente identificando os equipamentos e materiais.



## 4. Análise e Discussão de Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos dos testes práticos elaborados em ambiente *indoor* e *outdoor*, após seguir todas as diretrizes mencionadas no capítulo anterior, de forma a conseguir os resultados mais precisos possíveis.

### 4.1. Estudo *indoor*

O estudo *indoor* contou com a disposição de chapas metálicas com diferentes inclinações em referência com o equipamento LiDAR, assim como vidros e espelhos. Os resultados apresentados foram tratados assim como as imagens para melhor visualização.

#### 4.1.1. Chapas metálicas 90° inclinação

A Tabela 7 apresenta as medidas obtidas pelo LiDAR, a temperatura ambiente, humidade relativa e a temperatura das chapas metálicas. Neste estudo, todas os objetos foram identificados, conforme exposto na Fig. 39, que apresenta a leitura 360° do LiDAR após tratamento de dados pelo Matlab. A Fig. 39 representa a disposição em tempo real do exemplo de disposição da Fig. 33. Com um aproveitamento de 100% na captura os objetivos, a média do erro de medição é de 0.5%.

Tabela 7. Resultados obtidos do estudo *indoor* sobre o comportamento do equipamento LiDAR em chapas metálicas com 90° de inclinação.

Temperatura ambiente 20°/ Humidade relativa 50%						
Chapas Metálicas	Detectável	Temperatura (C°)	Distância Detectada (mm)	Distância Real (mm)	Erro absoluto (mm)	Erro relativo (%)
Ferro Zincado (A)	Sim	18,1	3660	3730	70	0,7
Ferro Zincado (A1)	Sim	18,1	3800	3840	40	0,4
Alumínio Azul (B)	Sim	18,1	4360	4450	90	0,9
Alumínio Azul (B1)	Sim	18,1	4360	4390	30	0,3
Alumínio Vermelha (C)	Sim	18	5056	5150	94	0,94
Alumínio Vermelha (C1)	Sim	18	5056	5100	44	0,44
Inox (D)	Sim	18	4200	4260	60	0,6
Inox (D1)	Sim	18	4080	4200	120	1,2
Alumínio Branca (E)	Sim	18	3648	3700	52	0,52
Alumínio Branca (E1)	Sim	18	3440	3470	30	0,3
Ferro (F)	Sim	17,8	3828	3860	32	0,32
Ferro (F1)	Sim	17,8	3412	3455	43	0,43
Alumínio Verde (G)	Sim	17,8	4200	4220	20	0,2
Alumínio Verde (G1)	Sim	17,8	4104	4135	31	0,31
Alumínio (H)	Sim	17,8	5440	5500	60	0,6
Alumínio (H1)	Sim	17,8	4192	4200	8	0,08
Alumínio Preto (I)	Sim	17,9	4352	4310	42	0,42
Alumínio Preto (I1)	Sim	17,9	3908	3940	32	0,32

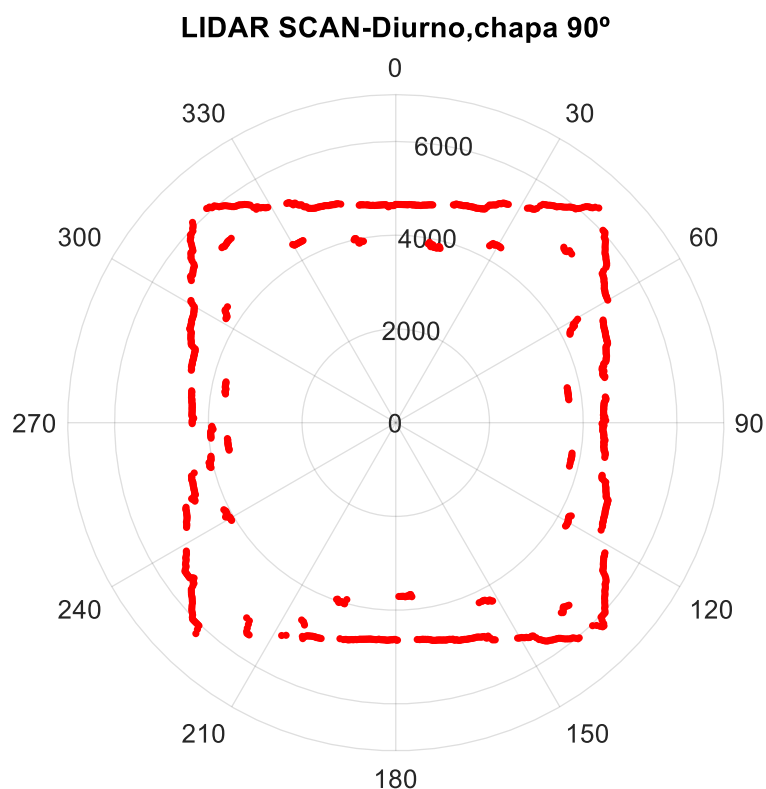


Fig. 39. Leitura 360° do LiDAR sobre sala de estudo *indoor* com chapas metálicas a 90°, figura retirada do processamento de dados Matlab.

#### 4.1.2. Chapas metálicas 70° inclinação

A Tabela 8 apresenta as medidas obtidas pelo LiDAR, a temperatura ambiente, humidade relativa e a temperatura das chapas metálicas. Neste estudo nem todos os objetos foram identificados, isto pode ser comprovado com a Fig. 40, que apresenta a leitura 360° do LiDAR após tratamento de dados pelo Matlab. A Fig. 40 é a disposição em tempo real do exemplo de disposição da Fig. 33. Com um aproveitamento de aproximadamente 44% na captura os objetivos, a média do erro de medição é de 1,04%, sobre os objetos identificados.

Tabela 8. Resultados obtidos do estudo *indoor* sobre o comportamento do equipamento LiDAR em chapas metálicas com 70° de inclinação.

Temperatura ambiente 20°/ Humidade relativa 50%						
Chapas Metálicas	Detectável	Temperatura (C°)	Distância Detectada (mm)	Distância Real (mm)	Erro absoluto (mm)	Erro relativo (%)
Ferro Zincado (A)	Não	18,1	-	3730	-	-
Ferro Zincado (A1)	Não	18,1	-	3840	-	-
Alumínio Azul (B)	Sim	18,1	4360	4450	90	0,9
Alumínio Azul (B1)	Sim	18,1	4360	4390	30	0,3
Alumínio Vermelha (C)	Sim	18	5176	5150	26	0,26
Alumínio Vermelha (C1)	Sim	18	5312	5100	212	2,12
Inox (D)	Não	18	-	4260	-	-
Inox (D1)	Não	18	-	4200	-	-
Alumínio Branca (E)	Sim	18	3732	3700	32	0,32
Alumínio Branca (E1)	Sim	18	3704	3470	234	2,34
Ferro (F)	Não	17,8	-	3860	-	-
Ferro (F1)	Não	17,8	-	3455	-	-
Alumínio Verde (G)	Não	17,8	-	4220	-	-
Alumínio Verde (G1)	Não	17,8	-	4135	-	-
Alumínio (H)	Sim	17,8	5416	5500	84	0,84
Alumínio (H1)	Sim	17,8	4076	4200	124	1,24
Alumínio Preto (I)	Não	17,9	-	4310	-	-
Alumínio Preto (I1)	Não	17,9	-	3940	-	-

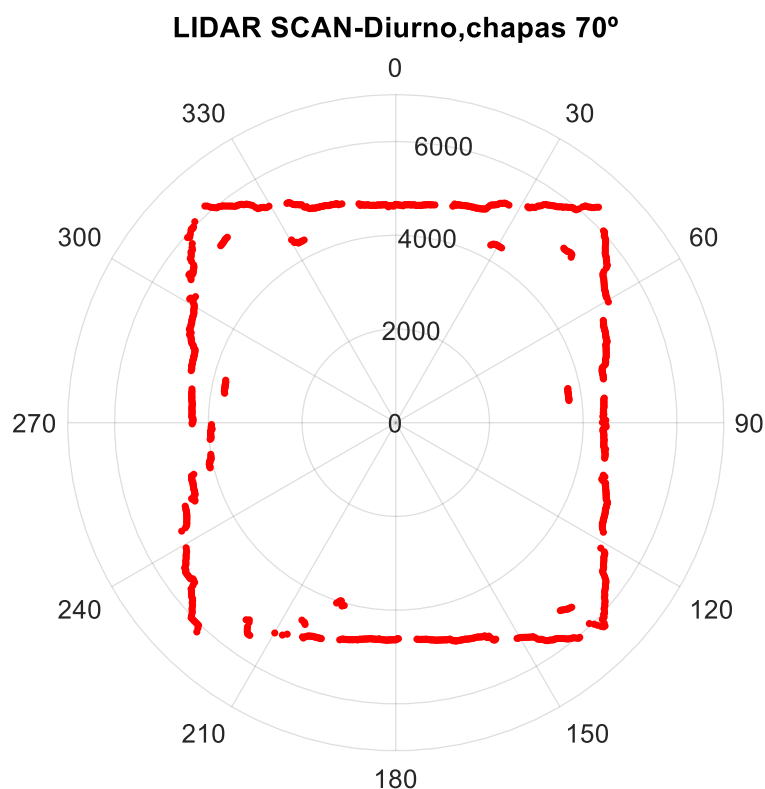


Fig. 40. Leitura 360° do LiDAR sobre sala de estudo *indoor* com chapas metálicas a 70°, figura retirada do processamento de dados Matlab.

## 4.2. Estudo *outdoor*

O estudo *outdoor* contou com a disposição de chapas metálicas com diferentes inclinações em referência com o equipamento LiDAR, assim como vidros e espelhos. Os resultados apresentados foram tratados assim como as imagens para melhor visualização.

### 4.2.1. Chapas metálicas 90° inclinação

A Tabela 9 apresenta as medidas obtidas pelo LiDAR, temperatura ambiente, humidade relativa e a temperatura das chapas metálicas. Neste estudo apenas um objeto não foi identificado, isto pode ser comprovado com a Fig. 41, que apresenta a leitura 360° do LiDAR após tratamento de dados pelo Matlab. A Fig. 41 é a disposição em tempo real do exemplo de disposição da Fig. 36. Com um aproveitamento de 95% na captura dos objetivos, a média do erro de medição é de 1,28%, sobre os objetos identificados.

Tabela 9. Resultados obtidos do estudo *outdoor* sobre o comportamento do equipamento LiDAR em chapas metálicas com 90° de inclinação.

Temperatura ambiente 23.6°/ Humidade relativa 36%						
Chapas Metálicas 90°	Detectável	Temperatura (C°)	Distância Detectada (mm)	Distância Real (mm)	Erro absoluto (mm)	Erro relativo (%)
Ferro Zincado (A)	Sim	22	6352	6540	188	1,88
Ferro Zincado (A1)	Sim	22,2	6200	6400	200	2
Alumínio Azul (B)	Sim	22,4	5840	6020	180	1,8
Alumínio Azul (B1)	Sim	22,5	7280	7500	220	2,2
Alumínio Vermelha (C)	Não	22	-	3250	-	-
Alumínio Vermelha (C1)	Sim	22	7760	7920	160	1,6
Inox (D)	Sim	22,5	5008	5100	92	0,92
Inox (D1)	Sim	22,5	4904	5010	106	1,06
Alumínio Branca (E)	Sim	22	4720	4810	90	0,9
Alumínio Branca (E1)	Sim	22	2512	2530	18	0,18
Ferro (F)	Sim	22,3	6632	6750	118	1,18
Ferro (F1)	Sim	22,4	7656	7900	244	2,44
Alumínio Verde (G)	Sim	22,2	6304	6400	96	0,96
Alumínio Verde (G1)	Sim	22,2	7296	7500	204	2,04
Alumínio (H)	Sim	22,1	5072	4900	172	1,72
Alumínio (H1)	Sim	22	3988	4050	62	0,62
Alumínio Preto (I)	Sim	23	4304	4330	26	0,26
Alumínio Preto (I1)	Sim	23	6200	6400	200	2
Muro (M)	Sim	-	8808	8800	8	0,08
Muro (M1)	Sim	-	7608	7650	42	0,42

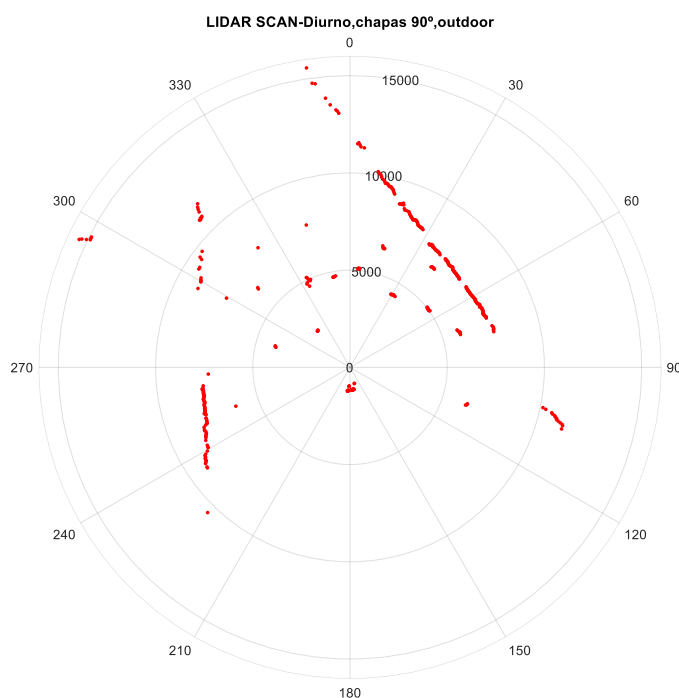


Fig. 41. Leitura 360° do LiDAR sobre o ambiente de estudo *outdoor* com chapas metálicas a 90°, figura retirada do processamento de dados Matlab.

#### 4.2.2. Chapas metálicas 70° inclinação

A Tabela 10 apresenta as medidas obtidas pelo LiDAR, temperatura ambiente, humidade relativa e a temperatura das chapas metálicas. Neste estudo nem todos os objetos foram identificados, isto pode ser comprovado com a Fig. 42, que apresenta a leitura 360° do LiDAR após tratamento de dados pelo Matlab. A Fig. 42 é a disposição em tempo real do exemplo de disposição da Fig. 36. Com um aproveitamento de 60% na captura dos objetivos, a média do erro de medição é de 0,88%, sobre os objetos identificados.

Tabela 10. Resultados obtidos do estudo *outdoor* sobre o comportamento do equipamento LiDAR em chapas metálicas com 70° de inclinação.

Temperatura ambiente 19.8° / Humidade relativa 43%						
Chapas Metálicas	Detectável	Temperatura (C°)	Distância Detectada (mm)	Distância Real (mm)	Erro absoluto (mm)	Erro relativo (%)
Ferro Zincado (A)	Não		-	6460	-	-
Ferro Zincado (A1)	Sim		6280	6400	120	1,2
Alumínio Azul (B)	Sim		5960	5960	0	0
Alumínio Azul (B1)	Sim		7320	7500	180	1,8
Alumínio Vermelha (C)	Sim		3128	3100	28	0,28
Alumínio Vermelha (C1)	Sim		7288	7320	32	0,32
Inox (D)	Sim		4864	5000	136	1,36
Inox (D1)	Sim		5024	4920	104	1,04
Alumínio Branca (E)	Sim		4616	4700	84	0,84
Alumínio Branca (E1)	Sim		2520	2460	60	0,6
Ferro (F)	Não		-	6290	-	-
Ferro (F1)	Não		-	7870	-	-
Alumínio Verde (G)	Não		-	6380	-	-
Alumínio Verde (G1)	Não		-	7000	-	-
Alumínio (H)	Não		-	4820	-	-
Alumínio (H1)	Sim		-	4000	-	-
Alumínio Preto (I)	Não		-	4280	-	-
Alumínio Preto (I1)	Sim		6024	6180	156	1,56
Muro (M)	Sim		8912	8800	112	1,12
Muro (M1)	Sim		7608	7650	42	0,42

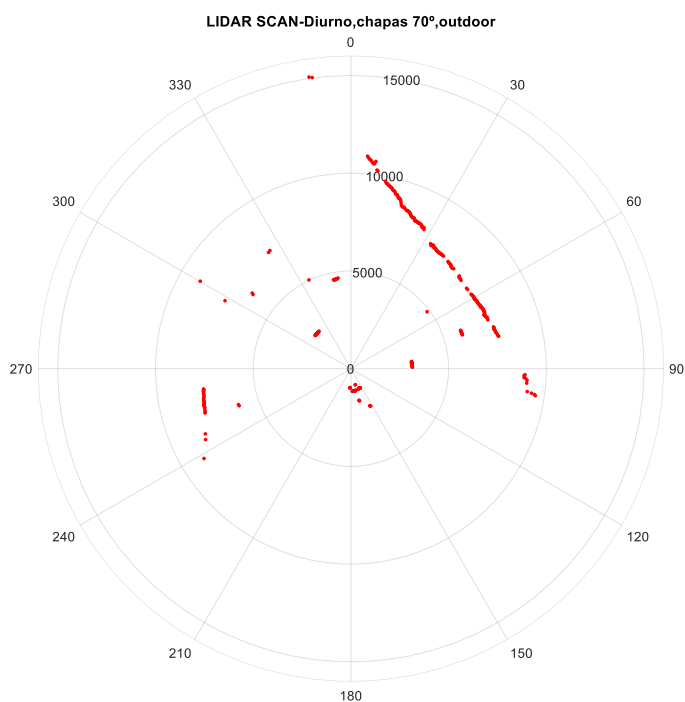


Fig. 42. Leitura 360° do LiDAR sobre o ambiente de estudo *outdoor* com chapas metálicas a 70°, figura retirada do processamento de dados Matlab.

### 4.2.3. Estudo contexto real

Neste estudo foram retirados dois grupos de dados, um com incidência solar direta aquando de uma aberta do céu e outro aquando do sol encoberto, não havendo incidência solar direta no ambiente de estudo.

#### 4.2.3.1. Ambiente de estudo com incidência solar direta

A Tabela 11 apresenta as medidas obtidas pelo LiDAR, temperatura ambiente e humidade relativa. Neste estudo foram tidos diversos aspetos como, viaturas de diferentes cores, dia enublado com exposição solar direta e humidade relativa mais elevada, isto pode ser comprovado com a Fig. 43, que apresenta a leitura 360° do LiDAR após tratamento de dados pelo Matlab. Nenhum dos pontos de referência para medição foi identificado, impossível assim de calcular erros associados.

Tabela 11. Resultados obtidos do estudo *outdoor* sobre o comportamento do equipamento LiDAR em contexto real com incidência solar direta.

Temperatura ambiente 21.2°/ Humidade relativa 64%					
Referências de medição	Detectável	Distância Detectada (mm)	Distância Real (mm)	Erro absoluto (mm)	Erro relativo (%)
Muro Esquerdo (ME)	Não	-	5590	-	-
Muro Frontal (MF)	Não	-	9740	-	-
Muro Direito (MD)	Não	-	6560	-	-
Círculo Vermelho	Não	-	3800	-	-
Círculo Azul	Não	-	4950	-	-
Círculo Verde	Não	-	6800	-	-

LIDAR SCAN-Diurno, contexto real com incidência solar direta, outdoor

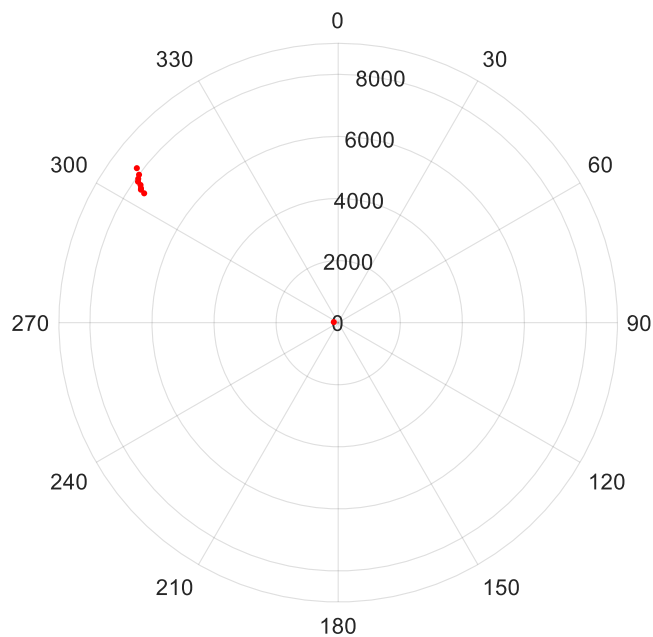


Fig. 43. Leitura 360° do LiDAR sobre o ambiente de estudo *outdoor* em contexto real, os dados obtidos e apresentados pelo equipamento são tidos como interferências, em ponto algum detetou as referências de medição, figura retirada do processamento de dados Matlab.

#### 4.2.3.2. Ambiente de estudo sem incidência solar direta, céu nublado

A Tabela 12 apresenta as medidas obtidas pelo LiDAR, temperatura ambiente e humidade relativa. Neste estudo foram tidos diversos aspetos como, viaturas de diferentes cores, dia nublado sem exposição solar direta e humidade relativa mais elevada, isto pode ser comprovado com a Fig. 44, que apresenta a leitura 360° do LiDAR após tratamento de dados pelo Matlab. A Fig. 44 é a disposição em tempo real do exemplo de disposição da Fig. 38. Com um aproveitamento de 33,3% na captura os objetivos, a média do erro de medição é de 1,85%, sobre os objetos identificados.

Tabela 12. Resultados obtidos do estudo *outdoor* sobre o comportamento do equipamento LiDAR em contexto real sem incidência solar direta, céu nublado.

Temperatura ambiente 21.2°/ Humidade relativa 64%					
Referências de medição	Detectável	Distância Detectada (mm)	Distância Real (mm)	Erro absoluto (mm)	Erro relativo (%)
Muro Esquerdo (ME)	Sim	5880	5590	290	2,9
Muro Frontal (MF)	Não	-	9740	-	-
Muro Direito (MD)	Não	-	6560	-	-
Círculo Vermelho	Sim	3880	3800	80	0,8
Círculo Azul	Não	-	4950	-	-
Círculo Verde	Não	-	6800	-	-

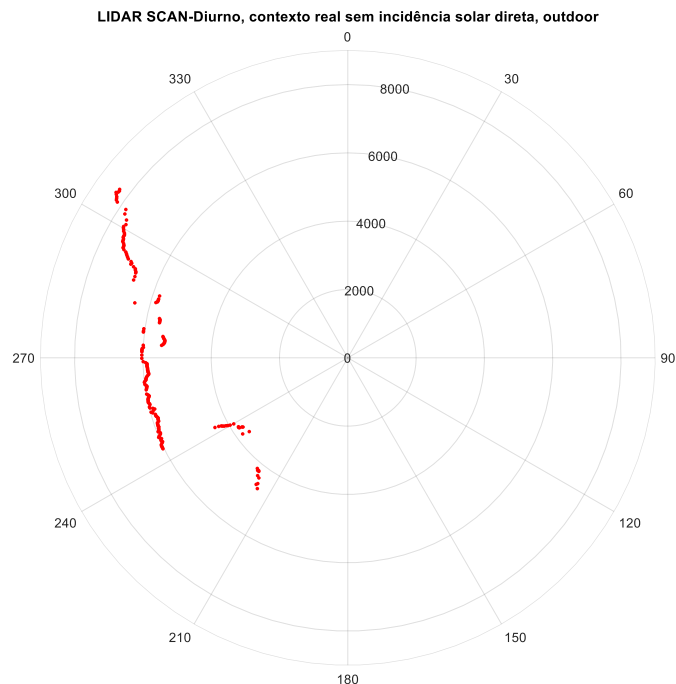


Fig. 44. Leitura 360° do LiDAR sobre o ambiente de estudo *outdoor* em contexto real, os dados obtidos e apresentam o lado esquerdo do ambiente de estudo, muro esquerdo, onde havia sombra proporcionada pelo mesmo, identificando assim duas das referências de medição, figura retirada do processamento de dados Matlab.

### 4.3. Nota conclusiva

Este capítulo iniciou-se com os estudos práticos em ambiente *indoor*, o ambiente para qual o equipamento LiDAR foi desenvolvido. A utilização de chapas de diferentes inclinações ajuda a compreender o comportamento do laser quando a reflexão ao objeto não é perpendicular. Ainda que materiais como espelho e vidro foram utilizados em todos os estudos, em nenhum momento a sua presença foi identificada. Para chapas a 90°, foi obtido uma média de erro de 0,5%, enquanto para chapas de 70°, aumentou para 1,04%.

Nas duas fases do estudo em ambiente *outdoor*, tenta-se replicar um ambiente *indoor*, ou seja, com a mínima luz solar, para que não houvesse sombras. Voltando a aplicar as chapas de diferentes inclinações, o resultado foi muito positivo na sua identificação. Para chapas a 90°, foi obtido uma média de erro de 1,28%, enquanto para chapas de 70°, aumentou para 1,04%.

Com a imprevisibilidade das condições climáticas no dia a dia, fomos ao encontro dessas adversidades a fim de testar as capacidades do equipamento já fora dos seus limites de operação. Os resultados foram esclarecedores, no entanto não muito favoráveis, onde só são obtidas leituras no ambiente sem exposição solar direta, com uma média de erro de 1,85%.

No capítulo seguinte encontram-se as diversas conclusões acerca dos valores obtidos e a previsão que pode ter num futuro projeto a que seja aplicado.



## 5. Conclusões

Neste capítulo são apresentadas conclusões para os mais diversos estudos e o que contextualiza com o objetivo desta dissertação. Breves apreciações sobre os capítulos acima e a sua influência na linha de desenvolvimento do projeto.

### 5.1. Conclusões gerais

#### 5.1.1. Enquadramento da dissertação

Nesta dissertação começamos por identificar o seu cerne, tecnologia LiDAR, e a sua proveniência, tecnologias anteriores são apresentadas assim como a sua participação para o desenvolvimento da tecnologia a laser.

O princípio de funcionamento de um equipamento LiDAR é explorado ao detalhe, com isto, conseguimos compreender as suas limitações, tais como a reflexão, luz ambiente, temperatura e humidade. A pesquisa de artigos científicos semelhantes ao tema revela que estas mesmas limitações estão presentes em outros estudos, o que levou a uma pesquisa de cada limitação e até que ponto podemos gerir a mesma.

O facto de utilizar um equipamento desenvolvido para meios *indoor* em meios *outdoor*, iria aumentar as limitações da tecnologia ainda mais, e é neste estudo do comportamento do equipamento no limiar das suas limitações que o trabalho se baseia.

Para tal, uma pesquisa de artigos resultou no capítulo do estado de arte, foi apresentado ao detalhe um equipamento LiDAR para cada dimensão de obtenção de dados e como suporte um estudo onde esse mesmo equipamento tenha sido utilizado, as sua empregabilidade e as dificuldades que encontraram na sua utilização.

Os equipamentos e materiais utilizados neste trabalho foram escolhidos ao encontro de identificar e colmatar as limitações do LiDAR, com isto, o acesso ao laboratório de robótica e ao seu inventário de equipamentos e materiais foi um apoio importante. O único equipamento adquirido no mercado foi o RPLIDAR A1M8, devido ao facto de ser um equipamento específico, para ambientes *indoor*, e de baixo custo, cerca de oitenta euros.

### **5.1.2. Estudo *indoor***

No contexto de ambiente *indoor*, onde o equipamento tem a obrigação de ter um bom desempenho segundo as especificações do fabricante, foram criadas duas experiências. A primeira fez uso de chapas metálicas com 90° de inclinação, ou seja, perpendicular ao emissor de laser e recetor, otimizando a reflexão do mesmo. A fim de criar adversidades, as chapas metálicas foram substituídas por outras com 70° de inclinação com intuito de eliminar a reflexão perfeita.

#### **5.1.2.1. Conclusões sobre as chapas metálicas 90° de inclinação**

Os resultados obtidos neste teste *indoor* vão de encontro das especificações técnicas do equipamento, ou seja, todas as referências de medidas, chapas metálicas, foram identificadas e apenas uma ficou acima do erro previsto pelo fabricante, 1%, com o valor de 1,2%.

Esta chapa metálica que ultrapassou o limite pretendido é uma chapa de aço inoxidável polida, o que potencializa uma maior reflexão difusa do laser. É evidente nos resultados obtidos que as chapas metálicas posicionadas no lado direito da sala de aula junto as janelas, apresentam um erro maior de medição, atingindo um máximo de 0,94%, mais uma das limitações em estudo, exposição solar, mesmo sendo num ambiente *indoor*, as condições *outdoor* podem afetar.

Concluimos então que, este primeiro teste foi um sucesso. A identificação de todas as chapas metálicas e maioritariamente um erro de medição abaixo de 1% traduz que o equipamento operou plenamente e cumpriu a sua função.

#### **5.1.2.2. Conclusões sobre as chapas metálicas 70° inclinação**

Este teste demonstra que, para objetos que não potencializem uma reflexão perfeita, o equipamento perde precisão, ou seja, das dezoito chapas metálicas apenas oito foram identificadas, 44% de aproveitamento na identificação, com uma média de erro de 1,04%.

Das dez chapas não identificadas, seis são chapas polidas sem cor, como no caso anterior, o que potencializa a reflexão difusa e se agrava com uma inclinação de 70°.

A Tabela 8 apresenta um erro de medição máximo de 2,34%, quase o dobro do único erro no teste anterior, o que nos leva a concluir que a reflexão difusa provocada por superfícies que não se encontrem perpendiculares ao laser emitido, leva à não deteção do objeto ou ao erro de medição maior.

### **5.1.2.3. Conclusões sobre vidros e espelhos**

A implementação de materiais como vidro e espelho, segue mais um teste à reflexão e refração em objetos muito presentes no cotidiano. Esta limitação foi apresentada num artigo presente no estado de arte.

Nenhum dos dois objetos foi identificado conforme esperado, isto porque, um vidro transparente é permeável ao feixe luminoso, que leva a refração do mesmo perdendo assim o sinal. O mesmo acontece quando o laser incide numa superfície espelhada. A sua alta taxa de reflexão leva mais uma vez à perda de sinal.

### **5.1.3. Estudo *outdoor***

O estudo *outdoor* é um no ambiente para qual o equipamento LiDAR utilizado não foi desenvolvido. No meio exterior há mais condicionantes que podem criar limitações ao funcionamento correto do equipamento. Pode-se contar com exposição solar direta sobre a área de estudo e o equipamento, nevoeiro ou até mesmo precipitação.

Visto que o equipamento não tem proteção contra a água, tendo mesmo os seus circuitos elétricos expostos ao meio, nunca foi questão tentar realizar um teste sobre precipitação. O mesmo teria de estar revestido por algo que o protegesse podendo vir a comprometer as leituras efetuadas. Devido à falta de oportunidade, não foi feito nenhum teste com a influência de nevoeiro sobre o equipamento. Um artigo presente no estado de arte demonstra que um equipamento LiDAR desenvolvido para o exterior encontrou dificuldades em obter dados sobre forte nevoeiro, podendo por associação acreditar que o RPLIDAR A1M8 não iria ter sucesso num teste semelhante, ainda que não possamos confirmar.

### **5.1.3.1. Conclusões sobre as chapas metálicas de 90° de inclinação**

A utilização do parque de estacionamento da Faculdade de Engenharia da Universidade da Beira Interior apresenta um amplo espaço para dispor as chapas metálicas espaçadas entre si. O clima fechado aquando deste teste, proporcionou a inexistência de sombras e sem exposição solar sobre o equipamento e as referências a medir.

Apenas uma chapa metálica não foi identificada, o que inicialmente é bom para um equipamento fora do seu habitat de operação. Ainda assim, os erros associados às leituras em função da distância real aumentaram, maioritariamente ultrapassaram o 1% de erro estipulado pelo fabricante, obtendo um erro máximo de 2,44% em função do valor da leitura. De referir que o meio de estudo em muito se assemelha ao ambiente *indoor* anterior, o que traduz num bom comportamento do equipamento.

### **5.1.3.2. Conclusões sobre as chapas metálicas de 70° de inclinação**

Este teste em muito se assemelha ao estudo *indoor* sobre as mesmas chapas. A identificação foi de apenas dez chapas em dezoito possíveis, tendo um aproveitamento de 55%. Os erros associados às leituras não foram muito exagerados, sempre a rondar 1%. Ainda assim, a não identificação de oito referências de medição é um mau resultado.

### **5.1.3.3. Conclusões sobre o ambiente de estudo com incidência solar direta**

Das possíveis limitações conhecidas que podíamos encontrar, segundo o estado de arte, a exposição solar direta sempre mostrou ser a mais importante, visto que o LiDAR é alimentado via USB, a sua potência de laser é de 3mW, a radiação solar consegue superiorizar-se ao equipamento.

Neste ensaio é evidenciada a inoperabilidade deste equipamento sobre incidência solar direta, onde não consegue obter nenhuma leitura.

### **5.1.3.4. Conclusões sobre o ambiente de estudo sem incidência solar direta, céu nublado**

Com o céu nublado e aberturas significativas ao longo do dia, foi importante entender o comportamento do RPLIDAR A1M8 na existência destas diferenças climatéricas. O caso anterior expressa a existência de céu aberto, assim que o céu fecha, a incidência solar não era tão forte, originando assim uma zona de sombra do lado direito.

Em seis referências de medição, apenas duas foram mapeadas, ambas na zona com sombra. Isto traduz que áreas com sombra são passíveis de ser identificadas, desde que não haja incidência solar direta sobre o equipamento.

## **5.2. Conclusão do estudo**

Comparando todos os dados obtidos ao longo dos diversos testes feitos, é possível assumir que este equipamento não se encontra preparado para operar fora do ambiente para o qual foi desenvolvido, *indoor*.

Avaliando o desempenho do RPLIDAR A1M8 nos testes *indoor* e *outdoor* para chapas de 90°, é conclusivo que tem um bom comportamento, sempre no limiar de erro esperado, nunca esquecer que foram ambientes controlados, que aumenta o aproveitamento do equipamento. A utilização em ambiente *outdoor* está fora de questão, a impressibilidade das condições climatéricas conduz

a inoperabilidade do equipamento, fazendo do mesmo um problema em qualquer atividade utilizado.

Para concluir, a adaptação de sistemas LiDAR *indoor* de baixo custo em aplicações *outdoor* não é aconselhado. Existem ainda muitos desafios a serem superados nesta tecnologia emergente e revolucionaria.

### **5.3. Sugestões de trabalhos futuros**

A fim de reconhecer a qualidade dos equipamentos LiDAR face ao valor de mercado, este estudo deveria ser repetido por um mais oneroso e de especificações técnicas mais elevadas. A conclusão desse trabalho iria confirmar a possibilidade de utilização de equipamentos desenvolvidos para atividades *indoor* em *outdoor*.

O caminho a seguir seria uma maior utilização destes equipamentos no quotidiano, levaria a uma maior produção e sucessivamente a um valor de mercado menor, neste momento são ativos muito caros e com áreas de empregabilidade muito seletivas.



---

## Referências Bibliográficas

- Schawlow, A.L. & Townes, C.H. (1958). *Infrared and Optical Masers*.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1103/PhysRev.112.1940>
- Almeida, L., Reis, L. P., Moreira, A. P., Universidade do Porto. Faculty of Engineering, Sociedade Portuguesa de Robótica, IEEE Robotics and Automation Society. Portuguese Chapter, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Portugal Section, Institute of Electrical and Electronics Engineers, & International Conference on Autonomous Robot Systems (2019 : Gondomar, P. (2019). *19th IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC 2019) : April 24-26, 2019, Gondomar, Porto, Portugal*.
- Singh, A.R. (2018). *What is LiDAR and how does it work?*  
<https://www.Geospatialworld.Net/Blogs/What-Is-Lidar-and-How-Does-It-Work/>.
- Pfrunder, A., Borges, P.V.K., Romero, A.R., & Gavin Catt, A.E. (2017). *IROS Vancouver 2017 : IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems : Vancouver, BC, Canada, September 24 - 28, 2017*.
- Baker-Campbell, A. (2021). *Fair Weather Friend: How Do LiDAR Systems Cope In Rain & Fog?*  
<https://www.Autovision-News.Com/Sensing/Sensor-Technology/Lidar-Systems-Rain-Fog/>.
- Beer, M., Haase, J. F., Ruskowski, J., & Kokozinski, R. (2018). Background light rejection in SPAD-based LiDAR sensors by adaptive photon coincidence detection. *Sensors (Switzerland)*, 18(12). <https://doi.org/10.3390/s18124338>
- Benewake Co., L. (2020). *TFmini Plus LiDAR Module Datasheet SJ-PM-TFmini Plus A07*.
- Fenske, J., & Bartlett, T. (2018). *DLP® DMD Technology: LIDAR ambient light reduction White Paper DLP® DMD Technology: LIDAR ambient light reduction*. [www.ti.com](http://www.ti.com)
- Flood, M. (2001). *LIDAR ACTIVITIES AND RESEARCH PRIORITIES IN THE COMMERCIAL SECTOR*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.
- Giongo, M., Koehler, H. S., Machado, S. do A., Kirchner, F. F., & Marchetti, M. (2010). LiDAR: princípios e aplicações florestais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 30(63), 231–244.  
<https://doi.org/10.4336/2010.pfb.30.63.231>
- Weber, H. (2018). *Sick AG. Artigo técnico. Modo de funcionamento e variantes dos sensores*

*LiDAR, Sick AG.*

Hutabarat, D., Rivai, M., Djoko, P., & Hutomo Harjuno. (2019). *Lidar-baser Obstacle Avoidance for the Autonomous Mobile Robot.*

Ibeo Automotive Systems GmbH. (2017). *DATA SHEET ibeo LUX 4L / ibeo LUX 8L / ibeo LUX HD.* www.ibeo-as.com

Ibeo Automotive Systems GmbH. (2022, February 9). *The Ibeo Lux LiDAR sensor.* <https://www.ibeo-as.com/en/products/sensors/ibeolux>.

Siepmann, J.P. (2006). Fusion of current technologies with real-time 3D MEMS lidar for novel security and defense applications. *Laser Radar Technology and Applications.* <https://doi.org/10.1117/12.665349>

Jin, D., Fang, Z., & Zeng, J. (2020). A Robust Autonomous following Method for Mobile Robots in Dynamic Environments. *IEEE Access*, 8, 150311–150325. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016472>

Kutilla, M., Pyykönen, P., Ritter, W., Sawade, O., & Schäufele, B. (2016). *Automotive LIDAR Sensor Development Scenarios for Harsh Weather Conditions.* <https://doi.org/10.1109/ITSC.2016.7795565>

Neta, M. (2021). *Reflexão da luz.* <https://www.fq.pt/luz/reflexao-da-luz>.

Pepperl+Fuchs Group. (2021). *Dimensions Technical Data.* www.pepperl-fuchs.com

Pittman, S. J., Costa, B., & Wedding, L. M. (2013). LiDAR Applications. In *Coral Reef Remote Sensing* (pp. 145–174). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-9292-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9292-2_6)

Rivai, M., Hutabarat, D., & Jauhar Nafis, Z. M. (2020). 2D mapping using omni-directional mobile robot equipped with LiDAR. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 18(3), 1467–1474. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v18i3.14872>

S M Nazmuz Sakib. (2021). “*LiDAR with Pulsed Time of Flight.*” <https://orcid.org/0000-0001-9310-3014>

SLAMTEC. (2016). *Development Kit User Manual.* www.slamtec.com

- 
- SLAMTEC. (2020). *Introduction and Datasheet*.  
<https://www.slamtec.com/en/Support#rplidar-a-series>
- SLAMTEC. (2022, February 11). *RPLIDAR-A1 360° Laser Range Scanner*.  
<https://www.Slamtec.Com/En/Lidar/A1>.
- Matthews, S. (2021). *Laser Alignment and the Effects of High Humidity*.  
<https://acoem.us/blog/other-topics/laser-alignment-and-the-effects-of-high-humidity/>.
- Gao, T. Gao, F. Zhang, G., Liang, L., Song, Y., Du, J. & Dai, W. (2018, August 9). *Effects of temperature environment on ranging accuracy of lidar*.
- Tontini, A., Gasparini, L., & Perenzoni, M. (2020). Numerical model of spad-based direct time-of-flight flash lidar CMOS image sensors. *Sensors (Switzerland)*, 20(18), 1–19.  
<https://doi.org/10.3390/s20185203>
- Velodyne Lidar. (2021, October 27). *Puck Lidar Sensor, High-Value Surround Lidar*.  
<https://velodynelidar.com/products/puck/>.
- Velodyne Lidar, I. (2019). *Puck*.
- D'oliveira, M.V.N., Orfanó Figueiredo, E., & de Almeida Papa, D. (2014). *Uso do Lidar como Ferramenta para o Manejo de Precisão em Florestas Tropicais*.
- Wang, Q., Tan, Y., & Mei, Z. (2020). Computational Methods of Acquisition and Processing of 3D Point Cloud Data for Construction Applications. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(2), 479–499. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09320-4>
- Xiaomi. (2022). *Mi Temperature and Humidity Monitor 2 User Manual*.
- Xiaomi Portugal. (2022, March 31). *Sensor Mi Temperature and Humidity Monitor 2*.  
<https://mistoreportugal.pt/pt/Produtos/Sensor-Mi-Temperature-and-Humidity-Monitor-2>.
- Yang, S. W., & Wang, C. C. (2011). On solving mirror reflection in LIDAR sensing. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 16(2), 255–265.  
<https://doi.org/10.1109/TMECH.2010.2040113>
-