

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Benchmarking de nuvens de pontos 3D

Bruno Daniel Pereira da Silva

Relatório realizado no âmbito da Unidade Curricular PROJETO INTEGRADOR da
Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Cláudio Monteiro

Supervisor: Marcelo Petry

7 de julho de 2022

Resumo

Estando na base do desenvolvimento das cidades, as infraestruturas civis são fundamentais para garantir que uma população viva confortavelmente e que a economia possa prosperar. Apesar das estruturas serem projetadas para estarem em equilíbrio, ao longo do seu envelhecimento, são aplicadas forças na sua utilização normal, sendo introduzidas novas variáveis, daí a necessidade de averiguar as deformações em relação ao projetado, para avaliar a segurança operacional da estrutura. É crucial realizar supervisão constante de modo a evitar, por um lado, interrupções não planeadas - que implicam altos custos e, por outro lado, falhas estruturais catastróficas que podem levar à perda de vidas. Surge, portanto, necessidade de avaliar os métodos de supervisão usados e apontar possíveis erros a estes associados. A introdução de procedimentos robotizados é um caminho benéfico, em termos tempo e de precisão na supervisão, sendo uma opção viável e será, por isso, objeto de estudo neste estágio. A técnica usada será a construção de nuvens de pontos usando dois meios diferentes - laser scanner terrestre e sensor lidar 3D de alta resolução.

Abstract

Being at the base of cities development, civil infrastructures are fundamental to ensure that a population can live comfortably and the economy can prosper. Although structures are designed to be in equilibrium, as they age, forces are applied in their normal use, introducing new variables, hence the need to investigate the deformations in relation to the original design, to assess the operational safety of the structure. Constant supervision is crucial in order to avoid, on the one hand, unplanned outages - which incur high costs - and, on the other hand, catastrophic structural failures which can lead to lives lost. The need, therefore, arises to evaluate the supervision methods used and point out possible errors associated with them. The introduction of robotic procedures is a beneficial path, in terms of time and accuracy in supervision, being a viable option and will therefore be the object of study at this internship. The technique used will be the construction of point clouds using two different means - ground laser scanner and high-resolution 3D lidar sensor.

Agradecimentos

Após finalizar este Estágio no âmbito da UC Projeto Integrador, que irá rematar a minha licenciatura, não posso deixar de agradecer às pessoas que directa ou indirectamente, me ajudaram ao longo do percurso. Primeiramente, agradeço a orientação fundamental do supervisor do INESC TEC, Marcelo Petry, que sempre se mostrou disponível a auxiliar-me e direcionar-me no caminho mais correto. Foi um privilégio trabalhar consigo. Agradeço também a toda a equipa do iiLab, por me terem recebido com tanta simpatia e à-vontade e um obrigado especial à Cláudia Rocha. Um agradecimento ao orientador da FEUP, Cláudio Monteiro, por acompanhar todo o trabalho de perto. Por fim, um agradecimento muito especial à minha família, que me apoiou, incansavelmente, e me permitiu elevar os meus conhecimentos ao ensino superior.

Bruno Silva

“Não tenhamos pressa, mas não percamos tempo.”

José Saramago

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Objetivo do Estágio	1
1.2	Apresentação do INESC TEC	1
2	Atividades	3
2.1	Atividade I	3
2.1.1	Objetivos	3
2.1.2	Tarefas	3
2.1.3	Resultados	3
2.1.4	Competências	5
2.1.5	Horas de Trabalho	6
2.2	Atividade II	6
2.2.1	Objetivos	6
2.2.2	Tarefas	7
2.2.3	Resultados	7
2.2.4	Competências	7
2.2.5	Horas de Trabalho	8
2.3	Atividade III	8
2.3.1	Objetivos	8
2.3.2	Tarefas	8
2.3.3	Resultados	10
2.3.4	Competências	10
2.3.5	Horas de Trabalho	11
2.4	Atividade IV	11
2.4.1	Objetivos	11
2.4.2	Tarefas	11
2.4.3	Resultados	12
2.4.4	Competências	12
2.4.5	Horas de Trabalho	12
2.5	Atividade V	12
2.5.1	Objetivos	12
2.5.2	Tarefas	13
2.5.3	Resultados	13
2.5.4	Competências	13
2.5.5	Horas de Trabalho	14
3	Conclusões	17
3.1	Análise Crítica do Estágio	17

Lista de Figuras

2.1	Scanner Faro Focus S no tripé	4
2.2	Scan_011 realizado à sala de reuniões	5
2.3	Scan_014 realizado à sala de reuniões	5
2.4	Scan_013 realizado à entrada do iiLab	6
2.5	Scan_016 realizado à entrada do iiLab	6
2.6	Mapa de scans	7
2.7	Esquema aéreo dos locais de onde foram realizados os scans individuais	8
2.8	Conjunto drone, computador e LiDAR	9
2.9	Arquitetura do conjunto associado ao LiDAR	9
2.10	Scan 1 da sala de reuniões com LiDAR com erros de alinhamento	10
2.11	Scan 2 da sala de reuniões com LiDAR	11
2.12	Aparelhos usados	12
2.13	Clouds finais	13
2.14	Mapa da distância entre pontos das clouds	14
2.15	Secções das clouds	14
2.16	Mapa da distância entre pontos das secções	15

Abreviaturas e Símbolos

FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
iiLab	Industry and Innovation Lab of INESC TEC
UC	Unidade Curricular
LiDAR	Light Detection and Ranging
INESC TEC	Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência
WLAN	Wireless Local Area Network
ROS	Robot Operating System
SSH	Security Shell

Identificação do Estágio

Identificação da empresa

INESC TEC — Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência, com sede na Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, Portugal. O website da empresa é <https://www.inesctec.pt/pt>. O INESC pode ser contactado a partir do Tel. +351 222 094 000, ou via email, com info@inesctec.pt.

Caracterização do estágio

O estágio teve início a 3 de março de 2022 e terminou a 1 de julho de 2022, tendo uma duração de 162 horas. O orientador do INESC que me auxiliou foi o Marcelo Petry que pode ser contactado a partir do telefone 926698234 ou através do email marcelo.petry@inesctec.pt.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Objetivo do Estágio

Na área da construção civil, é fundamental manter uma avaliação periódica dos edifícios, com o objetivo de encontrar falhas estruturais que coloquem a sua segurança em risco. No entanto, este procedimento de avaliação tende a ser moroso, sendo pertinente a procura de métodos que agilizem o processo. No estágio, avaliou-se a possibilidade do uso de robótica para supervisão de superfícies de edifícios, nomeadamente, os scanners Faro FocusS 150 e LiDAR Ouster OS1-64 (equipado num veículo aéreo não tripulado). Atualmente, a nível de aparelhos de reconstrução 3D, os LiDAR - acrônimo para Light Detection and Ranging, ou em português, Deteção e Alcance de Luz - são os mais usados. Estes sensores são capazes de emitir raios laser em direção a objetos à sua volta, que são refletidos e retornam ao sensor. Tendo em conta o intervalo de tempo entre emissão e receção do feixe e a velocidade da luz é calculada a distância do objeto e é colocado um ponto nessa posição.

1.2 Apresentação do INESC TEC

O Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciência (INESC TEC) é uma associação privada sem fins lucrativos de desenvolvimento e pesquisa, que surgiu em 1985, devido às ligações entre o mundo académico e industrial. Reúne mais de 700 investigadores em 13 centros nas cidades do Porto, Braga e Vila Real. Os centros estão estruturados em quatro temas - Computer Science, Industrial and Systems Engineering, Networked Intelligent Systems, e Power and Energy. O INESC tem como valores a excelência em inovar, o design centrado nas pessoas, a liberdade de investigação, a cooperação e a responsabilidade social. Atualmente, o INESC tem como associados, a nível académico, a Universidade do Porto, o Instituto Politécnico do Porto, a Universidade do Minho e a Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Capítulo 2

Atividades

2.1 Atividade I

2.1.1 Objetivos

A primeira atividade iniciou-se com a apresentação do iiLab, através da introdução do ambiente de trabalho e o grupo profissional do laboratório. Após a familiarização com o iiLab, o Marcelo sugeriu começar por entender o modo de funcionamento do primeiro scanner, o Faro Focus S ([2.1](#)), e a plataforma SCENE, que permite analisar os scans realizados, no computador. Eventualmente, realizaram-se os primeiros scans na sala de reuniões.

2.1.2 Tarefas

Começou-se por entender o conceito de nuvem de pontos - como conjuntos de pontos dispostos num sistema de coordenadas, o modo como os scanners 3D realizam a aquisição dos pontos - os scanners emitem um laser que ao chegar ao objeto é refletido regressando ao recetor no scanner. Através do tempo entre emissor e recetor e a velocidade da luz, chega-se à distância a que o objeto se encontra do scanner e é colocado um ponto nessa coordenada. Repete-se isto para todos os pontos rodando a cabeça do scanner (para alterar a direção vertical) e rodando o próprio scanner (para alterar direção horizontal) de modo a construir um scan com uma intervalo horizontal de 0 a 360° e intervalo vertical de -60 a 90°. Compreendeu-se o funcionamento do Faros através da leitura do seu Guia de Início Rápido [[1](#)] e a importância do SCENE [[2](#)], que importa os scans do Faros para o computador para fazer o seu processamento. Depois de compreender os conceitos associados aos dois temas, realizou-se os primeiros scans, dois na sala de reuniões (interior) e dois na entrada do iiLab (exterior).

2.1.3 Resultados

Realizaram-se os dois scans, o Scan_011 - [2.2](#) e o Scan_014 - [2.3](#), no interior do iiLab. Ambos os scans efetuaram-se em cerca de 5 minutos, denotando a rapidez a que o Faro realiza um scan.



Figura 2.1: Scanner Faro Focus S no tripé

Em [2.3](#) é possível ver um círculo branco que não contem pontos devido ao limite de -60° no intervalo vertical. Efetuar scans nos dois ambientes ajudou a perceber de que modo as configurações do Faro - a resolução, a qualidade, o medidor de exposição, influenciam o scan obtido. Também foi importante compreender a calibração do inclinómetro. No entanto, os scans Scan_013 - [2.4](#) e Scan_16 - [2.5](#) demoraram cerca de 14 minutos, uma vez que os scans no exterior tem de ter uma qualidade e resolução maior. Comparando as figuras [2.4](#) e [2.5](#) é possível ver que o carro muda de posição: na primeira está à direita e na segunda está à esquerda. Esta mudança é interessante

para perceber de que modo a posição do scanner influencia na captação de pontos - em ambas as figuras, a parede que está atrás do carro em relação ao Faro, não é captada. Para uma captação de uma nuvem que contenha todos os pontos desejados vários scans de perspetivas diferentes devem ser realizados.



Figura 2.2: Scan_011 realizado à sala de reuniões



Figura 2.3: Scan_014 realizado à sala de reuniões

2.1.4 Competências

Nesta atividade, aprendeu-se o procedimento associado à realização de um scan. Por um lado, a parte relacionada com o Faro - a posição do scanner (que afeta a quantidade de pontos obtida), a sua interface, as suas configurações, a ligação computador - scanner através do SCENE. Por outro lado, o tratamento de dadas no SCENE - importar, processar e registar os scans.



Figura 2.4: Scan_013 realizado à entrada do iiLab



Figura 2.5: Scan_016 realizado à entrada do iiLab

2.1.5 Horas de Trabalho

Este atividade estendeu-se ao longo das três primeiras semanas, pelo que, teve um tempo aproximado de 24 horas.

2.2 Atividade II

2.2.1 Objetivos

A partir da quarta semana, usou-se o Faro para fazer um scan do interior de um andar inteiro de um edifício, de modo a obter um mapa que inclui as suas divisões.



Figura 2.6: Mapa de scans

2.2.2 Tarefas

Deslocamo-nos às possíveis futuras instalações do Centro de Robótica do INESC e realizamos o scan completo do andar do edifício, de modo a compreender como realizar um mapa de scans. Percebeu-se como conectar o computador ao FARO, de modo a poder controlá-lo remotamente aquando a realização de scans - conectando o Faro e o computador à mesma rede e no SCENE usando uma conexão WLAN. Pensou-se na escolha do posicionamento do Faro, de modo a que cada scan esteja na linha de visão do scan anterior, de modo a diminuir o erro. Após regressar ao laboratório, com o mapa de scans concretizado, fez-se a importação para o SCENE, desta vez através do cartão SD. No SCENE, realizou-se o processamento do mapa de scans de modo a que não houvesse erros de alinhamento e posicionamento nos scans quando em conjunto. Quando o processamento e registo foram acabados, usou-se uma ferramenta do SCENE chamada Video Pro¹ para fazer um vídeo que percorre o mapa do edifício.

2.2.3 Resultados

O mapa de scans, após processamento ficou constituído por 20 scans individuais. Na figura 2.6 é possível ver o mapa de um ponto de vista exterior do conjunto e na figura 2.7 é possível verificar o esquema aéreo que contem os locais onde decorreram os scans individuais (pontos azuis). O mapa ficou com um valor de erro bastante reduzido, sendo por isso uma representação bastante fidedigna no edifício real. Em relação ao vídeo feito, após a sua renderização, foi publicado na plataforma YouTube como vídeo não listado com o seguinte url:<https://youtu.be/RvjVu9WCCcU>, de modo a poder ser revisitado com facilidade.

2.2.4 Competências

Esta segunda atividade consolidou o conhecimento relativamente ao uso do Faro para a obtenção de mapas de scans de um edifício. Devido à elevada quantidade de scans individuais, a tarefa de processamento no SCENE foi complexa e demorada, pelo que essa parte da atividade ajudou a melhorar as competências relativamente ao pós-processamento, em específico o alinhamento de scans.

¹Aplicativo permite criar vídeos a partir de sucessivos pontos de vista do mapa de scans.



Figura 2.7: Esquema aéreo dos locais de onde foram realizados os scans individuais

2.2.5 Horas de Trabalho

Esta atividade durou duas semanas, pelo que teve um tempo de cerca de 16 horas.

2.3 Atividade III

2.3.1 Objetivos

Após cerca de metade do tempo do estágio a trabalhar com o Faro, a atenção virou-se para o LiDAR Ouster OS1-64. Assim, a terceira atividade incide no estudo teórico e prático deste scanner juntamente com o computador e drone a ele associados.

2.3.2 Tarefas

Com acesso ao GitLab do INESC, o objetivo foi entender o código que suporta o funcionamento do LiDAR, toda a burocracia por trás do uso de uma UAV - as regras de uso e o procedimento a repetir para cada missão. A arquitetura LiDAR, computador e drone encontra-se nas fotografias 2.8 e o seu esquema de ligações e dependências elétricas está em 2.9. O drone que se usou é o modelo Matrice 300 RTK [4]. Através do gráfico do tempo de voo máximo em relação ao peso do drone + carga, verificou-se que sem carga, o tempo de voo máximo é de 55 minutos. O conjunto computador e sensor tem um peso de 0,66 Kg, diminuindo o tempo de voo para cerca de 36 minutos. Esta relação não tem em conta que o computador e sensor alimentam-se através do drone, assim o tempo de voo máximo real é bastante menor. Em termos de hardware, o computador tem o ambiente Ubuntu 16.04 compatível com ROS. Neste ambiente, cada componente utilizada, desde a passagem de dados do LiDAR para o computador, até à cloud final pós-processada, chama-se nó. Recorreu-se a um nó - o reconstruction_3d, que inicia a aquisição temporal de pontos no LiDAR, que é guardada num ficheiro bag para futura reprodução. Também

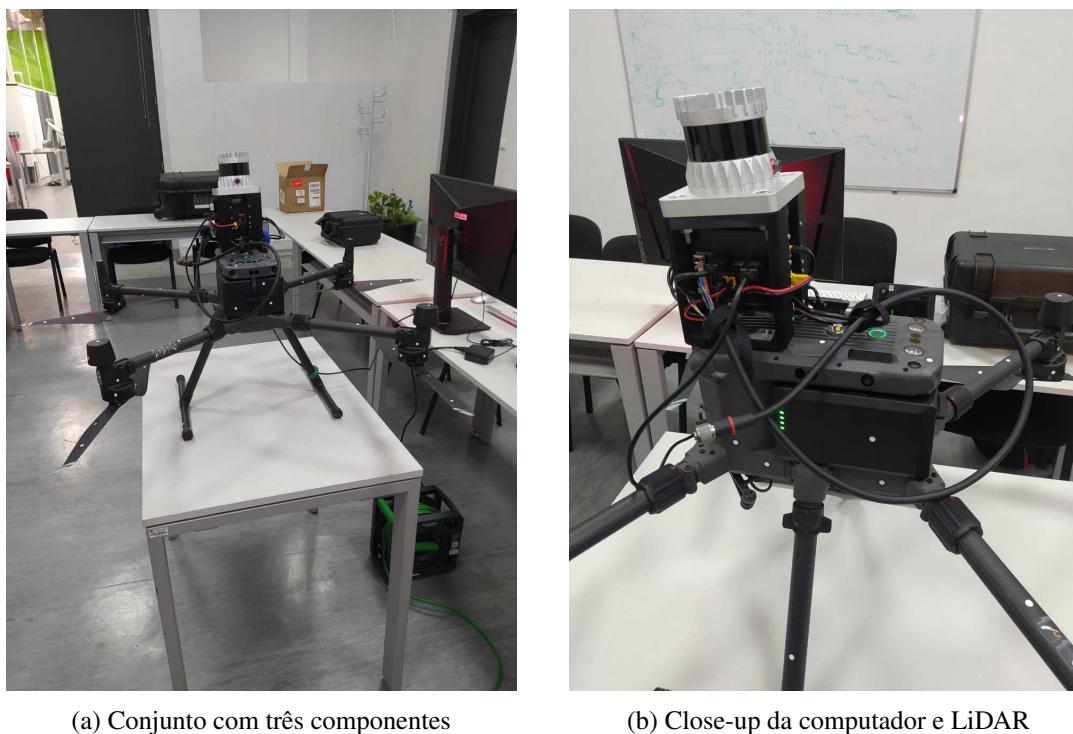


Figura 2.8: Conjunto drone, computador e LiDAR

se usou o nó `cloud_merge`, que ao longo da reprodução de uma bag, é capaz de gerar nuvens de pontos.

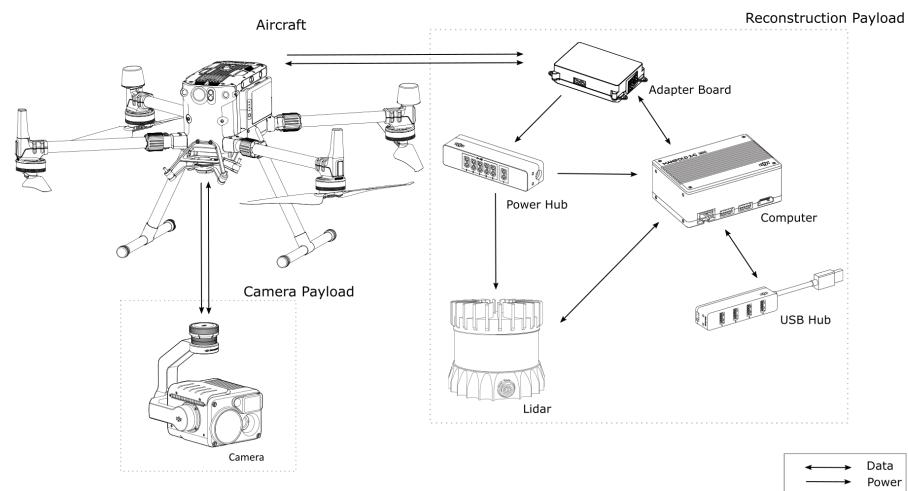


Figura 2.9: Arquitetura do conjunto associado ao LiDAR

Foi possível usar o conjunto computador e sensor em dois contextos diferentes:

- Conectar o computador (o sensor alimenta-se a partir do computador) diretamente à tomada elétrica e ligar monitor, teclado e rato para aceder à consola diretamente para introduzir

comandos.

- Conectar o computador ao drone e através de uma ligação SSH a partir de outro computador, aceder, remotamente à consola para introduzir os comandos necessários para realizacão do scan.

Começou-se a usar o software CloudCompare [3] para visualização das nuvens obtidas através do LiDAR. Analogamente à atividade em 2.1, foi usado o LiDAR para fazer scans na sala de reuniões do iiLab (interior), no entanto, surgiram umas complicações, descritas nos Resultados.

2.3.3 Resultados

Inicialmente, os scans continham erros de alinhamento e sobreposição de conjuntos de pontos, notórios na figura 2.10. Após alterar as definições do nó cloud_merge, nomeadamente diminuindo a frequência de aquisição de nuvens, com o objetivo de diminuir os erros conseguiu-se alcançar o resultado na figura 2.11 que contem bastante menos ruído.

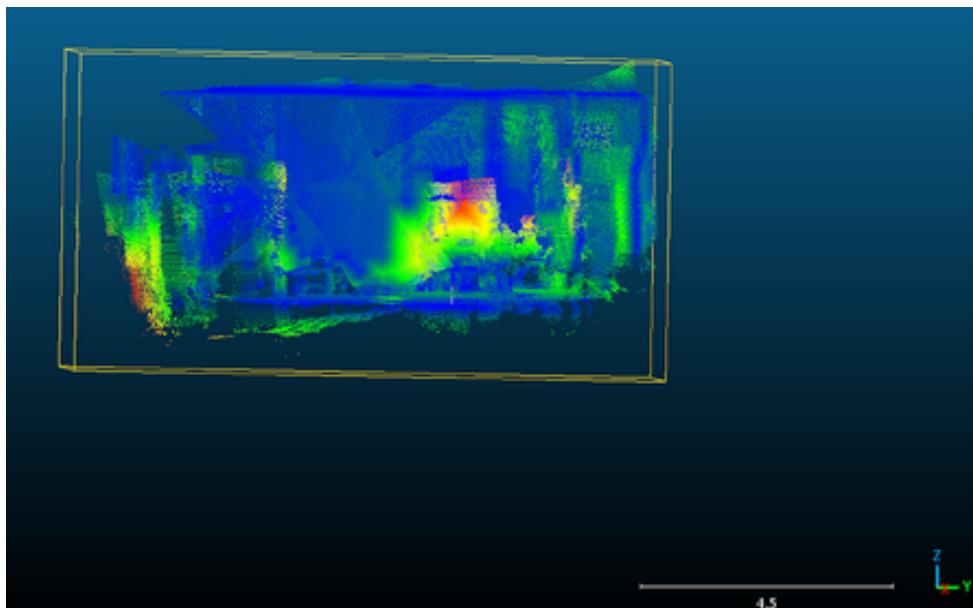


Figura 2.10: Scan 1 da sala de reuniões com LiDAR com erros de alinhamento

Após realizar scans em ambiente interior, com os dois aparelhos, denota-se que o Faro é bastante mais apto para realizar o scan, tanto em termos de qualidade do scan obtido como em complexidade do uso do scanner e processamento da nuvem.

2.3.4 Competências

Nesta atividade, ficou-se a conhecer todo o processo necessário para realizar scans com o LiDAR, desde os comandos, o pós-processamento e as suas configurações.

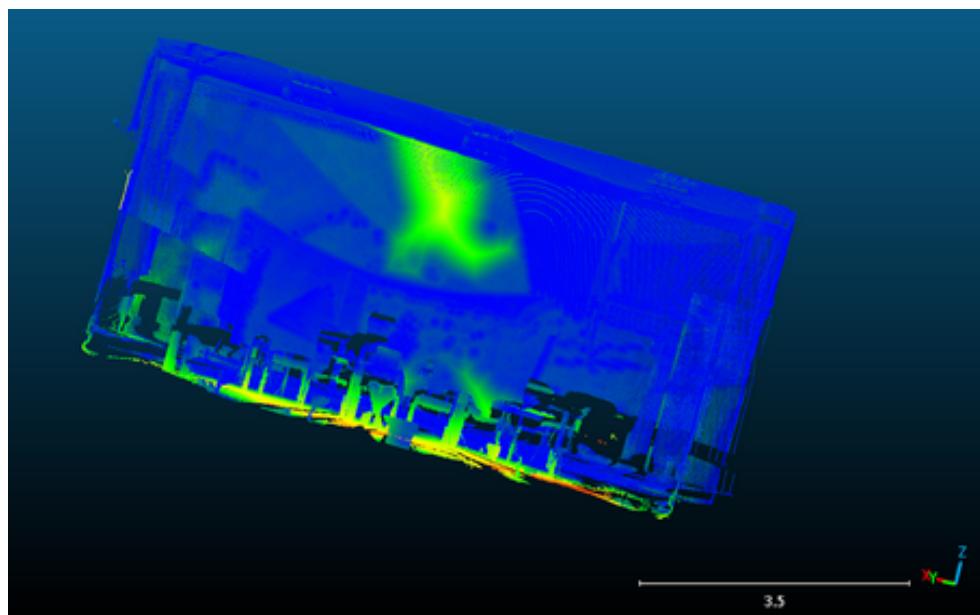


Figura 2.11: Scan 2 da sala de reuniões com LiDAR

2.3.5 Horas de Trabalho

Esta atividade foi bastante demorada, devido à complexidade associada ao LiDAR. Decorreu ao longo de cinco semanas, cerca de 40 horas.

2.4 Atividade IV

2.4.1 Objetivos

Após perceber o funcionamento do LiDAR, conhecer as precauções a ter durante o voo com o drone e como realizar a ligação SSH para enviar comandos remotamente, a preparação para a missão estava realizada. Fez-se assim um voo na entrada do iiLab a fim de obter uma nuvem de pontos do local.

2.4.2 Tarefas

Realizaram-se dois voos, cada um com cerca de 4 minutos. Os voos cobriram um numero alto de posições em termos de altura e plano horizontal com o objetivo de captar o maior número de pontos possível. Usou-se uma antena [2.12a](#) para realizar a calibração geográfica do drone. Apesar de não ser estritamente necessário, o uso da antena diminuiu, consideravelmente, o erro relativo à posição do drone. Tirou-se uma fotografia [2.12b](#) do conjunto drone, computador e LiDAR.



(a) Antena usada para calibração do drone

(b) Conjunto drone, computador e LiDAR no exterior

Figura 2.12: Aparelhos usados

2.4.3 Resultados

No final do dia, regressou-se ao interior do iiLab e conectou-se o monitor, rato e teclado ao computador. Após reprodução das bags que resultaram dos dois voos, observou-se que o objetivo da missão foi comprido com sucesso e a ligação SSH funcionou.

2.4.4 Competências

Esta atividade contribui para conhecer todos os passos que envolvem realizar um missão com um UAV, assim como controlar remotamente o LiDAR durante o voo.

2.4.5 Horas de Trabalho

A atividade durou apenas uma semana, cerca de 8 horas.

2.5 Atividade V

2.5.1 Objetivos

Após realização de voos na atividade anterior (2.4), foi necessário fazer o processamento dos dados obtidos de modo a ter uma cloud final do LiDAR, para depois comparar com a cloud obtida com o Faro na atividade 2.1.

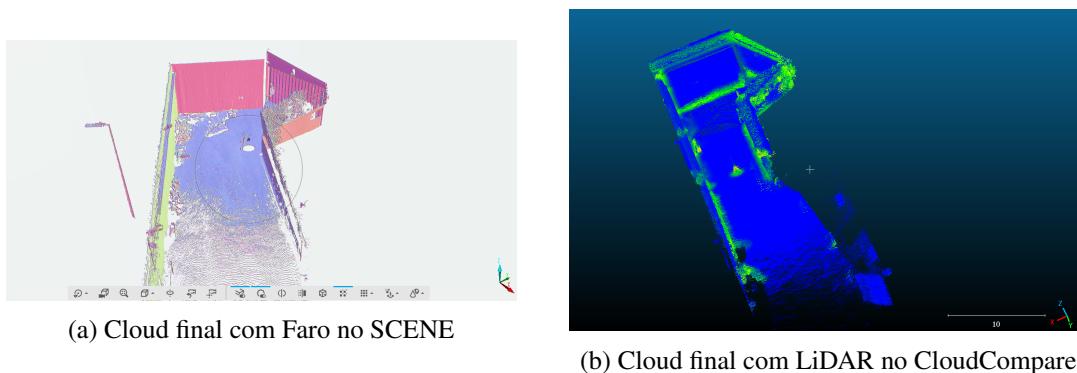


Figura 2.13: Clouds finais

2.5.2 Tarefas

Começou-se por usar o nó já mencionado, `cloud_merge`, para obter uma `cloud` 2.13b a partir das bags dos voos. Após obter a `cloud`, enviou-se para o mesmo computador onde estava a `cloud` final do Faro 2.13a. Recorreu-se ao CloudCompare para formatar as duas `clouds`, nomeadamente, recortá-las excluindo pontos não relevantes e alinhá-las após recorte.

2.5.3 Resultados

O CloudCompare possuí uma ferramenta chamada "Compute cloud/cloud distance" que como o nome indica, permite calcular a distância média entre pontos das duas `clouds` alinhadas. Para além da distância média de 0,169m, a ferramenta também gera uma figura 2.14 que nos mostra os resultados. Com a ajuda do gradiente blue>green>yellow>red é possível ver que a maioria dos pontos encontra-se no azul, o que indica um erro inferior a 0,54m. Nota-se também que as zonas verdes encontram-se em locais que apenas o LiDAR atingiu, por poder voar, enquanto que o Faro esteve parado na mesma posição no tripé. Voar é uma das grandes vantagens do LiDAR, podendo atingir pontos que o Faro não consegue. Para além da ferramenta de distância entre pontos, usou-se a ferramenta de corte para obter uma secção de área igual para as duas `clouds` 2.15. Através da vista superior das secções 2.15b, é possível observar que a secção do LiDAR contém uma dispersão de pontos maior em relação à secção do Faro. Recorrendo mais uma vez à ferramenta de cálculo de distância de pontos e usando a secção da `cloud` do Faro como referência, há uma distância média de 0,036m entre as secções 2.16.

Para scans no exterior de edifícios, o LiDAR, por estar montado no drone é bastante mais versátil a captar nuvens de pontos. Apesar das nuvens que origina serem menos precisas em relação às nuvens do Faro, o LiDAR é capaz de fazer varreduras completas (incluindo a cobertura do edifício) de edifícios em bastante menos tempo.

2.5.4 Competências

Esta parte final do estágio reforçou o meu conhecimento na manipulação de `clouds` de pontos, em específico recorrendo ao CloudCompare para fazer comparações entre `clouds` e verificar os

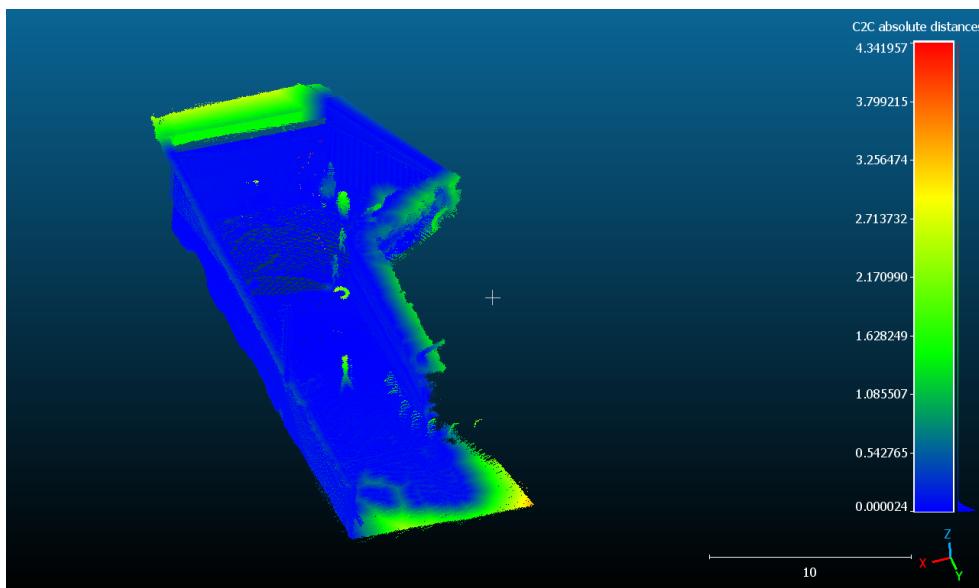
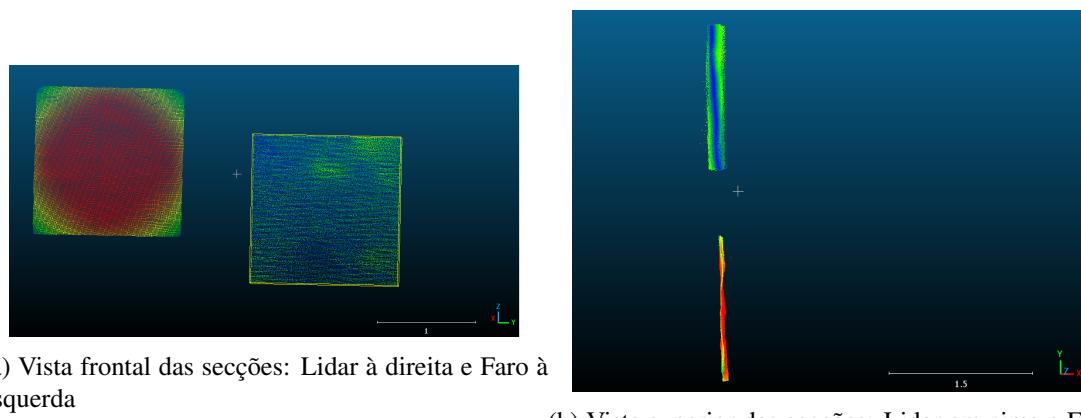


Figura 2.14: Mapa da distância entre pontos das clouds

erros associados à posição dos pontos.

2.5.5 Horas de Trabalho

Esta atividade ocorreu durante três semanas, cerca de 24 horas.



(a) Vista frontal das secções: Lidar à direita e Faro à esquerda

(b) Vista superior das secções: Lidar em cima e Faro em baixo

Figura 2.15: Secções das clouds

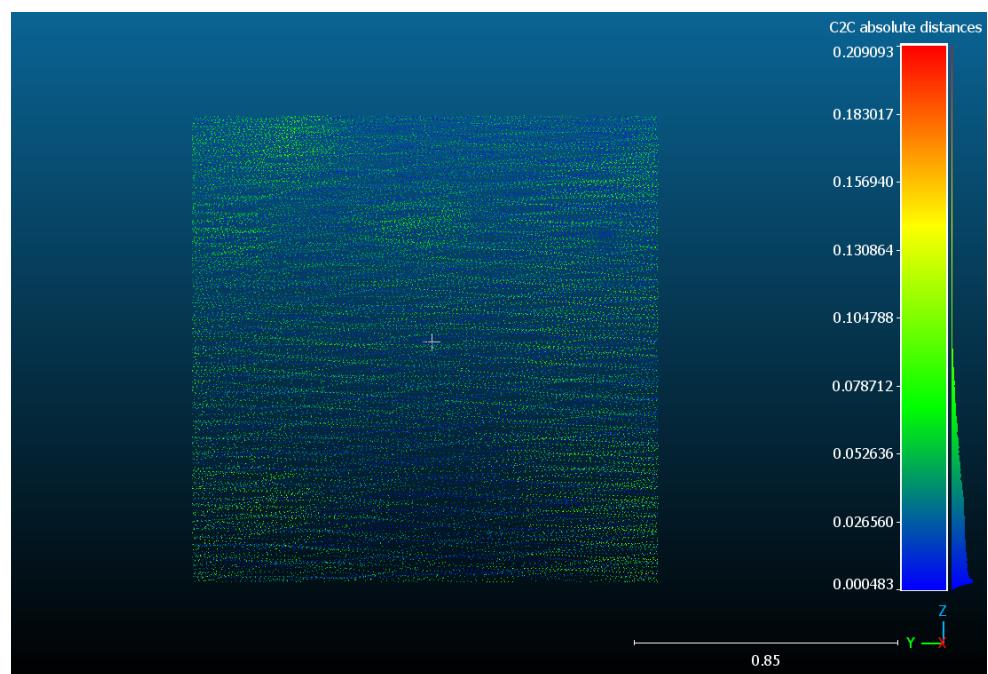


Figura 2.16: Mapa da distância entre pontos das secções

Capítulo 3

Conclusões

3.1 Análise Crítica do Estágio

Estou bastante satisfeito com a forma como o estágio curricular se desenvolveu. Foi uma excelente oportunidade para por em prática os conhecimentos teóricos prévios aliados com o conhecimento adquirido ao longo do projeto. Em certas alturas, o estágio foi desafiador - especialmente devido à elevada quantidade de informação do LiDAR. Em relação ao iiLab, senti-me sempre bem acolhido por um grupo profissional muito prestável e simpático. Um dos melhores aspectos foi estar num ambiente rodeado de robótica, algo bastante inspirador para o futuro. Dito isto, ter um contacto com o ambiente de investigação no INESC TEC, no terceiro ano, foi uma experiência bastante enriquecedora para a minha formação académica.

Referências

- [1] (2020) *FocusM e FocusS Guia de Início Rápido*, Disponível em: <https://downloads.faro.com/index.php/s/Qj2s4qCDBMdPj9r>.
- [2] (2021) *SCENE User Manual*, Disponível em: https://knowledge.faro.com/Software/FARO_SCENE/SCENE/User_Manual_for_SCENE.
- [3] *Cloud Compare User Manual*, Disponível em: <https://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>.
- [4] *UAV Matrice 300 RTK*, Disponível em: <https://www.dji.com/pt/matrice-300>.