



MARCELA DO VALLE MACHADO

**Sincronização por Pós-Processamento de um Sistema de  
Varredura a LASER embarcado em VANT**



Presidente Prudente  
2018

MARCELA DO VALLE MACHADO

## **Sincronização por Pós-Processamento de um Sistema de Varredura a LASER embarcado em VANT**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas da UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Presidente Prudente, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestra em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli

Presidente Prudente  
2018

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação - Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Campus de Presidente Prudente

M132s Machado, Marcela do Valle.  
Sincronização por Pós-Processamento de um Sistema de Varredura a LASER embarcado em VANT / Marcela do Valle Machado. - 2018  
121 f.

Orientador: Antonio Maria Garcia Tommaselli  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2018  
Inclui bibliografia

1. Sistema de Varredura a LASER (SVL). 2. Sistema GNSS/IMU. 3. Veículo Aéreo Não Tripulado. 4. Sincronização por Pós-Processamento. I. Machado, Marcela do Valle. II. Tommaselli, Antonio Maria Garcia. III. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. IV. Título.

Claudia Adriana Spindola  
CRB-8ª/5790

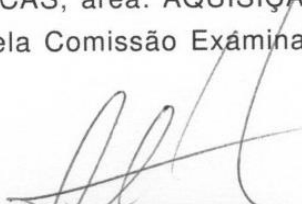
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: SINCRONIZAÇÃO POR PÓS-PROCESSAMENTO DE UM SISTEMA DE VARREDURA A LASER EMBARCADO EM VANT**

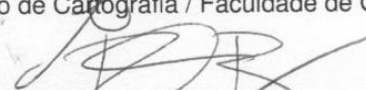
**AUTORA: MARCELA DO VALLE MACHADO**

**ORIENTADOR: ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI**

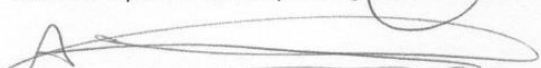
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, área: AQUISIÇÃO, ANÁLISE E REPRESENTAÇÃO DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI

Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

  
Dr. ROBERTO DA SILVA RUY

Sensormap / Sensormap Soluções em Geotecnologia e Aerolevantamentos Ltda EPP

  
Prof. Dr. ALUIR PORFIRIO DAL POZ

Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Presidente Prudente, 23 de fevereiro de 2018

**DEDICATÓRIA**

*À minha família, em especial, meus pais Valter  
e Claride, minha irmã Lídia e meu amor,  
Jefferson.*

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de fomento durante o desenvolvimento da pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento do projeto UAV\_4D\_Bio, (processo n 2013/50426-4), em conjunto com *Academy of Finland* (processo número 273806).

À empresa Sensormap, pelo suporte nas modificações implementadas no Sistema de Varredura a LASER. Em especial, ao engenheiro Thiago Tiedtke, pela disposição em auxiliar nos testes com o sistema.

À empresa Nuvem UAV, pela realização dos voos. Em especial, ao Alexandre Mainardi e Ricardo Affonso.

À Fernanda Torres, pela paciência em transmitir todo o conhecimento à respeito do Sistema de Varredura, e por ser essencial em minha adaptação à UNESP e à Presidente Prudente.

À profissional da computação, Carol Manzini, pelas implementações realizadas em benefício do sistema.

Ao Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli, pela notável orientação, por toda paciência e ensinamentos proporcionados durante o desenvolvimento da pesquisa, e por ser uma inspiração e referência de amor à profissão.

À banca examinadora, Prof. Dr. Aluir Porfírio Dal Poz e Dr. Roberto da Silva Ruy, pelas sugestões tanto no exame de qualificação, quanto na dissertação.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC), por todos os ensinamentos transmitidos durante o decorrer do mestrado.

Aos amigos do Grupo de Pesquisa em Fotogrametria, em especial, Marcus, Gabi, Lucas Dias, Mari Campos, André e Adilson, pelo suporte no desenvolvimento da pesquisa e em trabalhos de campo, além do apoio, incentivo e amizade.

Aos amigos do PPGCC, em especial, Crislaine, Érika, Fabrício, Guilherme, Lara, Rodrigo e Roraí, por compartilharem os momentos desta caminhada, me incentivando e tornando meus dias na UNESP mais felizes.

À UNESP, pela infraestrutura, e aos funcionários do Departamento de Cartografia, que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

À minha família, por acreditar em mim, em meus sonhos e ser meu alicerce em todos os momentos.

Ao meu namorado, Jefferson, pelo amor e carinho, por estar comigo em cada momento e por me inspirar como pessoa e profissional.

## RESUMO

Devido ao elevado custo de Sistemas de Varredura a LASER Aerotransportados (SVLA) e a miniaturização de sensores, sistemas de varredura a LASER (SVL) de menor peso e custo têm sido uma alternativa para estudos florestais. Aliado a estes sistemas, a crescente utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) possibilita a aquisição de dados com maior flexibilidade e rapidez, o que permite a utilização de SVL mais leves neste tipo de plataforma. Todavia, a integração e sincronização dos dispositivos do sistema demanda árduo trabalho de conexão eletrônica e computacional. Em casos que não seja possível realizar a sincronização eletrônica entre os dispositivos do sistema, uma alternativa é a sincronização por pós-processamento, estabelecida por meio da relação entre os dados temporais obtidos com o LIDAR (*Light Detection and Ranging*) e com o GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), durante a trajetória de voo do SVL embarcado em VANT. Para relacionar estes dados, são realizadas manobras de voo na forma senoidal durante a decolagem e pouso com o sistema, a fim de gerar pontos de máximos e mínimos. Com isso, os dados LASER e as posições da plataforma, coletados pelos dispositivos LASER e GNSS/IMU em sistemas de tempo diferentes, são relacionados por meio da diferença de distância e altura em função do tempo. Posteriormente, o tempo dos dados LASER é corrigido para tempo GPS, caracterizando a sincronização por pós-processamento, e refinado pelo Método dos Mínimos Quadrado. Desse modo, a nuvem de pontos pode então ser gerada. O controle de qualidade altimétrico utilizando pontos de apoio coletados em campo, apresentou uma acurácia de 11,6 cm. Para o controle planimétrico foi verificada uma acurácia de 45 cm para a componente E e 62 cm para a componente N. A partir das acurácias encontradas para a nuvem de pontos, conclui-se que a técnica de sincronização empregada é uma alternativa viável para relacionar dispositivos desacoplados de um SVL e que a acurácia centimétrica do sistema permite que este seja empregado em diversas aplicações, dentre as quais estão estimativa de altura de árvores.

**Palavras – chave:** Sistema de Varredura a LASER (SVL), Sistema GNSS/IMU, Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), Sincronização por Pós-Processamento.

## ABSTRACT

Due to the high cost of Airborne LASER Scanning (ALS) and the miniaturization of sensors, low-cost and low-weight LASER systems have been an alternative for forestry studies. Together with these systems, the increasing use of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) platforms, also low cost, enables the acquisition of data with greater flexibility and speed, which allows the use of low-weight SVL in this type of platform. However, the integration and synchronization of the devices of the system demands specialised work for electronic and computational connections. In cases where it is not possible to perform electronic synchronization between the devices of the system, an alternative is the post-processing synchronization, established through the relationship between the signals obtained with LIDAR (Light Detection and Ranging) and GNSS (Global Navigation Satellite Systems), during the flight path of the SVL boarded in UAV. To relate these signals, flight maneuvers are performed in the a sinusoidal form shape during takeoff and landing with the system in order to obtain peaks of maximum and minimum. Thus, the LASER data and platform positions collected by the LASER and GNSS / IMU devices in different time systems are related by distance and height as a function of time. Subsequently, the LASER data time is corrected to match GPS time, characterizing the post-processing synchronization, and latter refined by the Least Square Method. In this way, the point cloud can then be generated. The quality control for altimetry, using control points collected in the field, achieved an obtained accuracy of 11.6 cm. The planimetric quality control achieve an accuracy of 45 cm the E component and 62 cm for the N component. From the accuracy achieved for the point cloud, it was concluded that the synchronization technique used is a viable alternative to relate decoupled devices of an ALS and that the centimetric accuracy of the system allows it to be used in several applications, such as tree height estimation.

**Keywords:** Airborne LASER Scanning System (ALS), GNSS/IMU System, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Post-Processing Synchronization.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Princípios da medição de distância por (a) intervalo de tempo entre a emissão e recepção de pulso LASER e (b) diferença de fase. ....                                          | 25 |
| Figura 2 - Utilização de sistemas (a) GNSS/IMU e (b) LASER para aquisição de dados. ....                                                                                                  | 26 |
| Figura 3 - Mecanismos de Varredura: (a) espelho oscilante, (b) varredura palmer, (c) varredura com polígono de rotação, e (d) varredura por fibras ópticas. ....                          | 29 |
| Figura 4 - Elementos relacionados à geometria de aquisição. Representação de elementos relacionados a obtenção da largura da faixa de voo (a), e à obtenção do <i>footprint</i> (b). .... | 33 |
| Figura 5 - Sinais de retornos a partir de diferentes técnicas: P (pulso discreto) e FW(full waveform). ....                                                                               | 36 |
| Figura 6 - Múltiplos retornos e formato de onda completo. ....                                                                                                                            | 36 |
| Figura 7 - Sistemas referenciais envolvidos em um levantamento por SVL. ....                                                                                                              | 37 |
| Figura 8 - Alvos para controle externo de nuvem de pontos LASER: (a) modelo de alvo circular, (b) modelo de alvo plano sobre tripé. ....                                                  | 46 |
| Figura 9 – Estrutura física - <i>Payload</i> do SVL. ....                                                                                                                                 | 49 |
| Figura 10 - SVL embarcado em plataforma VANT. ....                                                                                                                                        | 50 |
| Figura 11 - Unidade LASER Ibeo LUX 2010. ....                                                                                                                                             | 50 |
| Figura 12 - Princípios da tecnologia multicamada. ....                                                                                                                                    | 52 |
| Figura 13 - Diferentes níveis da varredura a LASER do IbeoLUX. ....                                                                                                                       | 53 |
| Figura 14 - Múltiplos retornos a partir de um único pulso. ....                                                                                                                           | 53 |
| Figura 15 - Exemplo de resolução angular a uma frequência de 12,5 Hz. ....                                                                                                                | 54 |
| Figura 16 - IMU– SPAN–IGM–S1 ....                                                                                                                                                         | 55 |
| Figura 17 - Acessório Flexpak6. ....                                                                                                                                                      | 56 |
| Figura 18 – Exemplo de instalação de duas antenas GNSS, utilizando receptor FlexPak6. ....                                                                                                | 56 |
| Figura 19 – Exemplo do microcomputador <i>Raspberry Pi</i> . ....                                                                                                                         | 57 |
| Figura 20 – <i>Container</i> com <i>payload</i> e antenas GNSS. ....                                                                                                                      | 58 |
| Figura 21 - Plataforma VANT – Modelo SX8. ....                                                                                                                                            | 58 |
| Figura 22 - Interface gráfica do software <i>Ibeo LASER View</i> . ....                                                                                                                   | 59 |
| Figura 23 - Diagrama de conexões entre os componentes do SVL. ....                                                                                                                        | 61 |
| Figura 24 - Esquema elaborado para montagem do sistema em plataforma VANT. ....                                                                                                           | 61 |
| Figura 25 – Diagrama geral. ....                                                                                                                                                          | 65 |

|                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 26 - Manobras para aquisição de dados dos dispositivos do SVL embarcados em VANT.                                                   | 66 |
| Figura 27 – Distâncias verticais medidas pelo LASER durante a decolagem e pouso do sistema, apresentando pontos de máximo e mínimo locais. | 66 |
| Figura 28 - Fluxograma das etapas necessárias ao desenvolvimento da técnica de sincronização por pós-processamento.                        | 69 |
| Figura 29 - Gráfico de sinais dos dados LASER (a) e dos dados GNSS (b).                                                                    | 70 |
| Figura 30 - Área de estudo – UNESP/Presidente Prudente.                                                                                    | 75 |
| Figura 31 - Faixas de voo obtidas com o SVL embarcado na plataforma VANT.                                                                  | 76 |
| Figura 32 - Alvos para controle do SVL: (a) piramidal e (b) plano sobre o tripé.                                                           | 77 |
| Figura 33- Distribuição de pontos de apoio para controle de qualidade da nuvem de pontos LASER.                                            | 79 |
| Figura 34 - Comparativo entre dados inerciais processados.                                                                                 | 80 |
| Figura 35 – Análise visual no <i>Software Ibeo LASER View</i> .                                                                            | 81 |
| Figura 36 - Comparação entre os gráficos de sinais dos dados LASER (a) e dos dados GNSS(b).                                                | 84 |
| Figura 37 - Nuvens de pontos da área do “MUSEU”: (a) faixa 2, (b) faixa 3, (c) nuvem de pontos da área e (d) vista tridimensional (3D).    | 86 |
| Figura 38 - Amostras de árvores utilizadas para avaliar a penetrabilidade de pulsos LASER.                                                 | 88 |
| Figura 39 - Análise comparativa entre as nuvens de pontos com e sem ajustamento, em relação ao ponto de controle 3D, levantado em campo.   | 90 |
| Figura 40- Nuvem de pontos gerada pelo <i>Photoscan</i> , com as imagens RGB da câmara A6000.                                              | 91 |
| Figura 41 - Análise de distâncias entre a nuvem <i>Photoscan</i> e a faixa 2 (a) e faixa 3(b), com ajustamento.                            | 92 |
| Figura 42 - Análise de distâncias entre a nuvem <i>Photoscan</i> e a faixa 2 (a) e faixa 3(b), sem ajustamento.                            | 93 |
| Figura 43 - Nuvem de pontos SVLA, de voo realizado sobre área do “MUSEU”.                                                                  | 94 |
| Figura 44 - Análise de distâncias entre a nuvem SVLA e a faixa 2 (a) e faixa 3(b), com ajustamento.                                        | 95 |
| Figura 45 - Análise de distâncias entre a nuvem SVLA e a faixa 2 (a) e faixa 3(b), sem ajustamento.                                        | 95 |

|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 46 - Gráfico de agulhas, para verificação de tendência no controle de qualidade altimétrico – nuvem de pontos com ajustamento. ....  | 99  |
| Figura 47 - Gráfico de agulhas, para verificação de tendência no controle de qualidade altimétrico – nuvem de pontos sem ajustamento.....   | 101 |
| Figura 48 - Pontos da nuvem LASER para controle de qualidade planimétrico – “seção horizontal”. ....                                        | 101 |
| Figura 49 - Exemplo de interseção de retas no AutoCAD utilizando pontos de apoio como referência para a nuvem LASER. ....                   | 102 |
| Figura 50 - Gráfico de agulhas, para verificação de tendência no controle de qualidade planimétrico – nuvem de pontos com ajustamento. .... | 104 |
| Figura 51 - Gráfico de agulhas, para verificação de tendência no controle de qualidade planimétrico – nuvem de pontos sem ajustamento.....  | 105 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Características físicas da unidade LASER <i>Ibeo LUX</i> . ....                                                                   | 51  |
| Tabela 2 - Especificações técnicas da SPAN-IGM-S1. ....                                                                                      | 55  |
| Tabela 3 – Cálculo do $\Delta T$ (intervalo entre o $t_{LS}$ e $t_{GPS}$ ) para correção do tempo LASER. ....                                | 85  |
| Tabela 4 - Análise de pontos LASER que penetraram copas de árvores. ....                                                                     | 87  |
| Tabela 5 - Refinamento do tempo por ajustamento pelo MMQ. ....                                                                               | 88  |
| Tabela 6 - Amostra dos tempos do LASER, antes e após o refinamento pelo MMQ. ....                                                            | 89  |
| Tabela 7 - Controle de Qualidade Altimétrico: discrepâncias entre pontos de apoio no terreno e pontos da nuvem LASER com ajustamento. ....   | 98  |
| Tabela 8 - Controle de Qualidade Altimétrico: discrepâncias entre pontos de apoio no terreno e pontos da nuvem LASER sem ajustamento. ....   | 100 |
| Tabela 9 - Controle de Qualidade Planimétrico: discrepâncias entre pontos de apoio no terreno e pontos da nuvem LASER com ajustamento. ....  | 103 |
| Tabela 10 – Análise estatística T-Student para discrepâncias planimétricas - com ajustamento. ....                                           | 103 |
| Tabela 11 - Controle de Qualidade Planimétrico: discrepâncias entre pontos de apoio no terreno e pontos da nuvem LASER sem ajustamento. .... | 104 |
| Tabela 12 - Análise estatística T-Student para discrepâncias planimétricas - sem ajustamento. ....                                           | 105 |

## LISTA DE SIGLAS

|         |                                                                  |
|---------|------------------------------------------------------------------|
| AGB     | – <i>Aboveground Biomass</i>                                     |
| CAN     | – <i>Controller Area Network</i>                                 |
| CHM     | – <i>Canopy Height Model</i>                                     |
| CEMAARQ | – Centro de Museologia, Antropologia e Arqueologia               |
| DGPS    | – <i>Differential Global Positioning System</i>                  |
| FAPESP  | – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo           |
| FGI     | – <i>Finnish Geodetic Institute</i>                              |
| FRP     | – Frequência de Repetição de Pulso                               |
| GNSS    | – <i>Global Navigation Satellite System</i>                      |
| GPS     | – <i>Global Positioning System</i>                               |
| HDMI    | – <i>High-Definition Multimedia Interface</i>                    |
| IAF     | – Índice de Área Foliar                                          |
| IMU     | – <i>Inertial Measurement Unit</i>                               |
| INS     | – <i>Inertial Navigation System</i>                              |
| LASER   | – <i>Light Amplification by Stimulated Emission Of Radiation</i> |
| LIDAR   | – <i>Light Detection and Ranging</i>                             |
| MDC     | – Modelo Digital de Copas                                        |
| MDE     | – Modelo Digital de Elevação                                     |
| MDS     | – Modelo Digital de Superfície                                   |
| MDT     | – Modelo Digital de Terreno                                      |
| MEMS    | – <i>Micro Electromechanical Systems</i>                         |
| MLS     | – <i>Mobile Laser Scanning</i>                                   |
| MMQ     | – Método dos Mínimos Quadrados                                   |
| NASA    | – <i>National Aeronautics and Space Administration</i>           |
| NMEA    | – <i>National Marine Electronic Association</i>                  |
| PPS     | – Posicionamento por Ponto Simples                               |
| PPS     | – <i>Pulse Per Second</i>                                        |
| PPP     | – Posicionamento por Ponto Preciso                               |
| RADAR   | – <i>Radio Detection and Ranging</i>                             |
| RAM     | – <i>Random Access Memory</i>                                    |
| RINEX   | – <i>Receiver Independent Exchange Format</i>                    |

|       |                                                 |
|-------|-------------------------------------------------|
| RMSE  | – <i>Root Mean Square Error</i>                 |
| SVL   | – Sistema de Varredura a LASER                  |
| SVLA  | – Sistema de Varredura a LASER Aerotransportado |
| UNESP | – Universidade Estadual Paulista                |
| USB   | – <i>Universal Serial Bus</i>                   |
| UTM   | – <i>Universal Transverse of Mercator</i>       |
| VANT  | – Veículo Aéreo Não Tripulado                   |
| WGS   | – <i>World Geodetic System</i>                  |

## SUMÁRIO

|          |                                                                |           |
|----------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                        | <b>16</b> |
| 1.1      | Justificativa.....                                             | 18        |
| 1.2      | Objetivos.....                                                 | 19        |
| 1.3      | Estrutura do Trabalho .....                                    | 19        |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>                             | <b>21</b> |
| 2.1      | Estado da Arte .....                                           | 21        |
| 2.2      | Fundamentação Teórica.....                                     | 24        |
| 2.2.1    | Componentes do Sistema de Varredura a LASER.....               | 27        |
| 2.2.1.1  | Sistema de Varredura.....                                      | 28        |
| 2.2.1.2  | Sistema de Posicionamento .....                                | 29        |
| 2.2.1.3  | Sistema de Navegação Inercial.....                             | 30        |
| 2.2.2    | Sincronização do Sistema de Varredura a LASER .....            | 31        |
| 2.2.3    | Geometria de Aquisição .....                                   | 32        |
| 2.2.4    | Modelo Matemático do Sistema de Varredura a LASER .....        | 36        |
| 2.2.5    | Fontes de erro do Sistema de Varredura a LASER.....            | 39        |
| 2.2.5.1  | Solução de Navegação (GNSS/IMU) .....                          | 40        |
| 2.2.5.2  | Calibração do sensor LASER.....                                | 41        |
| 2.2.5.3  | Calibração entre sensores .....                                | 42        |
| 2.2.5.4  | Outras importantes fontes de erros .....                       | 43        |
| 2.2.6    | Métodos de Calibração para o Sistema de Varredura a LASER..... | 44        |
| 2.2.7    | Controle de Qualidade do Sistema de Varredura a LASER.....     | 45        |
| <b>3</b> | <b>SISTEMA DE VARREDURA A LASER EMBARCADO EM VANT.....</b>     | <b>48</b> |
| 3.1      | O Sistema de Varredura a LASER - SVL .....                     | 48        |
| 3.1.1    | Componentes do SVL – <i>Hardware</i> .....                     | 50        |
| 3.1.1.1  | Unidade de varredura a LASER – Ibeo LUX 2010.....              | 50        |
| 3.1.1.2  | GNSS/IMU – SPAN-IGM-S1.....                                    | 54        |
| 3.1.1.3  | Receptor FlexPak6.....                                         | 55        |
| 3.1.1.4  | <i>Raspberry Pi</i> .....                                      | 56        |
| 3.1.1.5  | <i>Container</i> do Sistema de Varredura a LASER.....          | 57        |
| 3.1.1.6  | Plataforma de Aquisição – VANT SX8 .....                       | 58        |
| 3.1.2    | Componentes do SVL – <i>Software</i> .....                     | 59        |

|          |                                                                                                                  |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.2.1  | Ibeo LASER View.....                                                                                             | 59        |
| 3.1.2.2  | Inertial Explorer 8.6.....                                                                                       | 60        |
| 3.2      | Ferramentas desenvolvidas para o SVL .....                                                                       | 60        |
| <b>4</b> | <b>DESENVOLVIMENTO .....</b>                                                                                     | <b>65</b> |
| 4.1      | Sincronização do SVL pela comparação dos sinais gerados pela trajetória vertical e pela distância vertical ..... | 65        |
| 4.1.1    | Aquisição de Dados Brutos - Manobras de Voo .....                                                                | 65        |
| 4.1.2    | Processamento de dados de voo .....                                                                              | 67        |
| 4.1.2.1  | Processamento de dados LASER .....                                                                               | 67        |
| 4.1.2.2  | Processamento de dados inerciais – GNSS/IMU .....                                                                | 68        |
| 4.1.3    | Sincronização por Pós-Processamento .....                                                                        | 69        |
| 4.1.4    | Refinamento do tempo pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) .....                                               | 71        |
| 4.1.5    | Geração de Nuvem de Pontos .....                                                                                 | 73        |
| 4.1.6    | Controle de Qualidade.....                                                                                       | 74        |
| <b>5</b> | <b>EXPERIMENTOS REALIZADOS E RESULTADOS OBTIDOS.....</b>                                                         | <b>75</b> |
| 5.1      | Nuvem de Pontos – VOO “MUSEU” .....                                                                              | 75        |
| 5.1.1    | Área de Estudo .....                                                                                             | 75        |
| 5.1.2    | Aquisição de dados brutos e dados de apoio .....                                                                 | 76        |
| 5.1.3    | Processamento dos dados .....                                                                                    | 79        |
| 5.1.3.1  | Processamento de dados inerciais – GNSS/IMU .....                                                                | 79        |
| 5.1.3.2  | Processamento de dados LASER .....                                                                               | 80        |
| 5.1.3.3  | Processamento de dados – Photoscan, SVLA e pontos de apoio .....                                                 | 82        |
| 5.1.4    | Sincronização por Pós- Processamento .....                                                                       | 83        |
| 5.1.4.1  | Geração dos gráficos altura x tempo para o LASER e GNSS.....                                                     | 83        |
| 5.1.4.2  | Determinação da correspondência para cálculo da correção de tempo .....                                          | 83        |
| 5.1.5    | Geração de Nuvem de Pontos .....                                                                                 | 85        |
| 5.2      | Controle de Qualidade .....                                                                                      | 90        |
| 5.2.1    | Controle de Qualidade – Nuvem <i>Photoscan</i> .....                                                             | 90        |
| 5.2.1.1  | Nuvem de pontos com ajustamento.....                                                                             | 91        |
| 5.2.1.2  | Nuvem de pontos sem ajustamento .....                                                                            | 93        |
| 5.2.2    | Controle de Qualidade – Nuvem SVLA.....                                                                          | 94        |
| 5.2.2.1  | Nuvem de pontos com ajustamento.....                                                                             | 94        |
| 5.2.2.2  | Nuvem de pontos sem ajustamento .....                                                                            | 95        |

|          |                                                                                                                 |            |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.2.3    | Controle de Qualidade – Pontos de apoio .....                                                                   | 96         |
| 5.2.3.1  | Controle de Qualidade Altimétrico .....                                                                         | 97         |
| 5.2.3.2  | Controle de Qualidade Planimétrico .....                                                                        | 101        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                                                                          | <b>107</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS... ..</b>                                                                                        | <b>110</b> |
|          | Apêndice A – Trecho do arquivo de “Processamento de dados inerciais”. .....                                     | 115        |
|          | APÊNDICE B – Arquivo .csv* .....                                                                                | 117        |
|          | APÊNDICE C – Arquivo da nuvem de pontos LASER para ordenação do pacote de dados e<br>interpolação de tempo..... | 118        |
|          | APÊNDICE D – Pontos de apoio – GNSS.....                                                                        | 119        |
|          | APÊNDICE E – Pontos de apoio – ESTAÇÃO TOTAL.....                                                               | 120        |
|          | APÊNDICE F – Processo para geração da nuvem de pontos. ....                                                     | 121        |

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de tecnologias para mapeamento da biodiversidade e aquisição de parâmetros biofísicos possibilita o avanço de pesquisas relacionadas à conservação e manejo florestal, contribuindo para o monitoramento de recursos naturais e elaboração de inventário florestal. De acordo com Wehr e Lohr (1999), a obtenção de parâmetros biofísicos como biomassa, densidade e altura de árvores, diâmetro de tronco, efeitos de borda e degradação de florestas, está entre as diferentes aplicações de Sistemas de Varredura a LASER Aerotransportado (SVLA).

Ao contrário de sensores ópticos e de micro-ondas, os SVLA, também conhecidos pelo acrônimo LIDAR (*Light Detection and Ranging*), medem a distribuição da vegetação ao longo do eixo vertical (altimetria), fornecendo informações tridimensionais, volumétricas e de características da estrutura da vegetação, além de possibilitar a geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT), largamente utilizados para mapeamentos topográficos e complementares aos estudos florestais (LEFSKY et al., 1999; KRAUS e PFEIFER, 2001). Como o SVLA possibilita a geração de MDT e Modelo Digital de Superfície (MDS) a partir dos dados processados, torna-se uma importante fonte de aquisição de dados para geração de Modelo Digital de Copas (MDC) (em inglês, *Canopy Height Model – CHM*), obtido a partir da subtração do MDT pelo MDS (HYYPÄ et al., 2004).

De acordo com Montaghi et al. (2013), o interesse pelo uso de SVLA vem crescendo nos últimos anos devido ao fato de ser uma tecnologia que possibilita a aquisição de dados tridimensionais precisos, tanto de solo, quanto de copas das árvores. Skovsgaard e Vanclay (2008) citam o crescente uso principalmente para obtenção de variáveis dendrométricas de difícil acesso, como a altura das árvores, importante para o cálculo do volume de madeira da floresta. Para Vosselman e Maas (2010), o uso do SVLA é relevante sobretudo pela característica de “penetração” do pulso LASER em dossel de árvores e capacidade de gravação multirretorno, que possibilita a extração de informações de camadas inferiores e a representação tridimensional de alta qualidade da geometria da floresta, em relação a outras fontes de aquisição, como a Fotogrametria.

No entanto, segundo Jaakkola et al. (2010), o custo elevado de um SVLA convencional não permite a aquisição de dados multitemporais com frequência, o que implica em limitação, por exemplo, na detecção de mudanças de biomassa. De acordo com Lin et al. (2011), um suporte dado por MLS (Varredura a LASER Terrestre Móvel, do inglês *Mobile*

*Laser Scanning*), poderia auxiliar na densidade de pontos, no entanto, devido às restrições no acesso a florestas densas, este sistema também é limitado quanto à extração de informações.

Em contrapartida, a utilização de Sistemas de Varredura a LASER (SVL) embarcados em plataformas de baixo peso, como o Veículo Aéreos Não Tripulado (VANT), torna-se viável por permitir medidas multissensoriais e multitemporais com maior frequência e menor custo quando comparado a sistemas convencionais, originando um novo conceito de mapeamento (JAAKKOLA et al., 2010). Desta forma, o desenvolvimento tecnológico associado ao VANT e a miniaturização de sistemas de posicionamento, como o Sistema de Navegação Global por Satélite (*Global Navigation Satellite System* - GNSS), e de orientação, como o Sistema de Navegação Inercial (*Inertial Navigation System* - INS), possibilitaram a utilização de um SVL embarcado em plataforma VANT (JAAKKOLA, 2015).

Em Jaakkola et al. (2010) é apresentado um sistema utilizando SVL acoplado a um VANT de baixo peso (20 - 25 kg) para aquisição de informações tridimensionais, que permite a estimativa da altura de árvores, por meio da geração de MDC. Em pesquisas posteriores, outros sistemas similares foram desenvolvidos por Wallace et al. (2012.a); Glennie et al. (2013); Kuhnert Kuhnert (2013); Adler et al. (2014); Torres (2016); Tommaselli e Torres (2016), e Guo et al. (2017).

Dos sistemas descritos, Torres (2016) e Tommaselli e Torres (2016) testaram a aplicabilidade de um SVL utilizando LASER de pequeno porte, embarcado em plataforma VANT de carga máxima de até 25 kg, com foco em florestas brasileiras. Esse sistema foi desenvolvido por meio do projeto de pesquisa sobre a biodiversidade e uso sustentável de recursos naturais, intitulado “Sensoriamento Remoto 4D baseado em Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para o mapeamento da biodiversidade e suas mudanças em florestas tropicais no Brasil”, em parceria com o *Finnish Geodetic Institute* (FGI) e financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e *Academy of Finland* (AKA). Detalhes do sistema em Torres (2016).

De acordo com Torres (2016), para mapear as áreas selecionadas no projeto, o SVL móvel conta com uma unidade LASER, um sistema integrado com receptor GNSS, uma unidade de medida inercial (*Inertial Measurement Unit* - IMU) integrada, e um VANT octocóptero de asa rotativa, denominado SX8. Entretanto, relata que a sincronização do tempo entre a unidade LASER e o tempo GPS, dada pelo sinal PPS (*Pulse Per Second*) e mensagens NMEA (*National Marine Electronics Association*) fornecidos pelo receptor GNSS, poderia ser melhorada, quando comparada a sistemas convencionais. Outros problemas identificados estão

relacionados à qualidade do ângulo *heading* fornecido pelo sistema inercial, que se refere ao azimute da plataforma durante a aquisição de dados, importante para o cálculo da nuvem de pontos, e a falha na gravação de dados, que afeta a densidade de pontos da nuvem e possíveis informações a serem obtidas.

Para resolver os problemas abordados por Torres (2016), modificações posteriores foram feitas no SVL com auxílio da empresa Sensormap, que alterou a configuração de sincronização devido ao incremento de uma antena adicional ao sistema, a fim de melhorar a solução do *heading* para obter redundância nas medidas do azimute e consequentemente, refinamento das posições da plataforma. No entanto, após essas alterações, constatou-se que o tempo entre a unidade LASER e a solução GNSS/IMU não sincronizava automaticamente, originando um novo problema.

Buscando alternativas para solucionar o problema da sincronização automática entre os dispositivos do SVL desenvolvido por Tommaselli e Torres (2016) e qualidade da solução *heading*, esta dissertação visa apresentar uma metodologia alternativa para geração de nuvem de pontos, a qual propõe uma sincronização manual dos dados LASER e GNSS/IMU, posteriormente refinada pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).

## 1.1 Justificativa

De acordo com Torres (2016), a nuvem de pontos obtida com o SVL embarcado em VANT apresentou acurácia da ordem de 50 cm para aplicações que estimam a altura das árvores, em relação a sistemas convencionais como o SVLA. Esta acurácia, contudo, sofreu influência de diversos fatores, dentre os quais estão problemas relacionados à sincronização dos dados, falhas no processo de gravação de dados da unidade LASER e problemas com a *solução heading*.

Devido aos problemas encontrados e que afetam a qualidade da nuvem de pontos, foi recomendado por Torres (2016) a adição de um *Raspberry Pi* para armazenamento de dados, a integração de um acessório *Flexpak6* da NovAtel junto ao sistema inercial para melhorar a estimativa do *heading* (azimute), e a verificação do sincronismo entre os tempos do LASER e do receptor GNSS.

Deste modo, essa pesquisa trata do aperfeiçoamento do SVL desenvolvido, bem como a aquisição, processamento, análise e interpretação de dados, a partir de uma nova

técnica de sincronização, a qual possibilitará a geração de dados tridimensionais para diferentes aplicações, como por exemplo, o mapeamento de florestas.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste projeto é desenvolver e avaliar uma técnica de sincronização por pós-processamento, com refinamento pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), para um SVL embarcado em plataforma VANT.

Como objetivos específicos, são propostos:

- Verificar a influência do receptor FlexPak6 na solução *heading* (azimute);
- Verificar o problema de gravação de dados LASER, a partir da inserção de um novo microcomputador *Raspberry Pi*;
- Desenvolver uma metodologia para sincronização dos dispositivos LASER e GNSS/IMU, por meio de manobras de voo e sinais obtidos durante a trajetória de voo.
- Desenvolver um *script* para refinamento do tempo da unidade LASER, pelo MMQ;
- Realizar controle de qualidade da nuvem de pontos obtida, utilizando nuvem de pontos de imagens RGB, nuvem SVLA e pontos de apoio como referência.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação é composta por seis capítulos. O capítulo 1 apresenta uma introdução sobre a pesquisa desenvolvida, a justificativa para realizá-la e os objetivos a serem alcançados.

O capítulo 2 apresenta uma breve revisão da literatura sobre o conteúdo desta pesquisa, apresentando o estado da arte e fundamentos teóricos. Nesse capítulo, baseado em SVLA, são abordados conceitos relacionados aos SVL, como aquisição da medida de distância, o modelo matemático para geração da nuvem de pontos, fontes de erros, calibração do sistema e controle de qualidade, bem como a descrição de elementos necessários ao seu funcionamento.

O capítulo 3 apresenta os materiais utilizados para o desenvolvimento da pesquisa, tais como o SVL embarcado em VANT, seus principais componentes e as ferramentas desenvolvidas em trabalhos anteriores para geração de nuvem de pontos.

O capítulo 4 é referente à técnica de sincronização por pós-processamento entre os dispositivos do sistema. São apresentadas etapas que permitiram o desenvolvimento da pesquisa, tais como aquisição e processamento de dados, desenvolvimento de ferramenta para refinamento dos dados pelo MMQ e controle de qualidade.

O capítulo 5 aborda os testes realizados e resultados obtidos com o sistema, a partir da inserção de novos componentes e da técnica de sincronização implementada.

O capítulo 6 traz as conclusões sobre a pesquisa, bem como recomendações para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo aborda uma breve revisão do estado da arte de sistemas de varredura a LASER embarcados em plataforma VANT, além de uma revisão de conceitos teóricos relacionados aos sistemas de varredura a LASER.

### 2.1 Estado da Arte

Uma das plataformas de aquisição de dados mais utilizadas nos últimos anos, o VANT foi descrito por Everaerts et al. (2004) e Eisenbeiss (2004), como uma solução alternativa a sistemas de mapeamento móvel, tais como sistemas aéreos e orbitais, devido à sua capacidade de obter informações com maior flexibilidade e baixo custo. Com a necessidade de se obter dados altimétricos, Johnson (2006) apresentou possibilidades de pesquisa com SVL em VANT, e Nagai et al. (2009) desenvolveram um estudo com foco na integração de sensores de um SVL, embarcado em um helicóptero de 330 kg, com *payload* de 100 kg.

No entanto, com a crescente utilização dos VANTs, foi necessário adequá-los a categorias a partir do peso, originando regulamentos para seu emprego. Com isso, o uso de plataformas maiores foi restringido e modelos de pequeno porte passaram a ser mais acessíveis e fáceis de operar. Aliados à redução no tamanho de sensores, sistemas mais leves começaram a ser desenvolvidos. Alguns sistemas já existentes que utilizam SVL embarcado em plataforma VANT de baixo peso são apresentados por Jaakkola et al. (2010), Wallace et al. (2012), Glennie et al. (2013), Kuhnert e Kuhnert (2013), Adler et al. (2014), Torres (2016), Tommaselli e Torres (2016), e Guo et al. (2017).

Jaakkola et al. (2010), descreve o sistema Sensei, de baixo custo, embarcado em helicóptero como VANT, com carga útil de até 7 kg. O sistema é composto por dois sistemas de Varredura a LASER (Ibeo LUX e Sick LMS151) que também podem ser adaptados para carros, sistema de posicionamento e orientação GNSS/IMU (NovAtel SPAN-CPT), uma câmara CCD, uma câmara termal e um espectrômetro.

O sistema foi desenvolvido para verificar a aplicabilidade do LASER Ibeo LUX em medições de árvores individuais, com o intuito de caracterizar melhor essas árvores em inventários florestais, a partir de uma análise em diferentes estações, por meio de aquisição de dados multitemporais. A partir da comparação entre o Modelo Digital de Copas (MDC) gerado com os dados LASER e pontos de controle coletados na área de estudo, obteve-se uma

diferença altimétrica de cerca de 3,1 cm, e desvio padrão de 9,2 cm. A sincronização dos dispositivos do sistema foi feita eletronicamente, utilizando os sinais PPS dado pelo receptor GPS e um sinal de 25 HZ, dado pelo LASER (JAAKKOLA et al., 2010).

Wallace et al (2012.a) apresentam o sistema TerraLuma utilizado para inventário florestal, embarcado em um VANT multirrotor (octóptero Droidworx), com carga útil de até 2,4 kg. O sistema consiste de uma unidade de varredura Ibeo LUX, dois receptores GNSS de dupla frequência, uma IMU que utiliza tecnologia *Micro Electro Mechanical Systems* (MEMs), uma câmara de vídeo e um microcomputador (Gumstix Verdex pro) para sincronização e armazenamento dos dados.

O SVL foi desenvolvido com o objetivo de monitorar as mudanças de uma plantação de eucaliptos e apresentou acurácia vertical de 14 cm e uma acurácia horizontal de 34 cm, quando houve a inserção dos dados de orientação gerados pela fototriangulação das imagens da câmara de vídeo (WALLACE et al., 2012.a). Outras aplicações utilizando esse sistema são descritas em Wallace et al. (2012.b), na avaliação do sistema para mudanças florestais de alta resolução, em Wallace (2013), para mapeamento de copas e Wallace (2014), para detecção e mapeamento de árvores e mapeamento de copas.

Glennie et al. (2013) desenvolveram um SVL compacto para uso tanto em VANT (sistema a bordo de um balão), como em mochila (para modo terrestre) e pequenos veículos (quadriciclos). A carga útil do sistema é de até 15 kg (com cabos, embalagens e fontes de alimentação), sendo este composto por uma unidade de varredura (Velodyne HDL-32E), uma IMU OxTS (*Oxford Technical Solutions Inertial*) e dois INS, dois receptores GNSS da NovAtel, um microcomputador para gravação de dados e controle do sistema, e baterias adicionais, com autonomia de até 6 horas. O intuito principal desta pesquisa foi analisar, principalmente, a acurácia do SVLA utilizando diferentes plataformas de aquisição, que alcançou níveis centimétricos.

Em Kuhnert e Kuhnert (2013), é apresentado um sistema de varredura embarcado em VANT para monitoramento de linhas de alta tensão. Este sistema é composto por um helicóptero como VANT, com o qual foram feitos experimentos utilizando um sistema de varredura a LASER UTM 30LX da Hokuyou e um Sick LD-MRS-400001, uma câmara de vídeo, IMU, GPS, um computador a bordo não apenas para receber os dados da câmera e LASER, mas também para fornecer o fluxo de dados e outros sensores necessários para a aplicação. O peso do helicóptero vazio é de 3kg e a carga útil é de 1,5kg. A precisão da nuvem de pontos, utilizando o sistema, foi de 50 cm.

Adler et al. (2014) relatam o desenvolvimento de um SVL embarcado em um octocóptero VANT (Okto 2) para exploração de ambientes urbanos, composto por duas unidades de varredura a LASER Hokuyo UTM 30 LX, uma IMU XSens MTi, um receptor GNSS de dupla frequência e 2 antenas GNSS, além de um microcomputador para armazenamento das informações. O peso total é de cerca de 2,5 kg com todos os componentes, sendo o peso do *payload* de aproximadamente 792 g. A diferença obtida entre distâncias medidas na nuvem de pontos LASER e de medidas manuais realizada na área de estudo, foi inferior a 25 cm. No entanto, a acurácia da nuvem de pontos não é apresentada pelo autor.

Torres (2016) e Tommaselli e Torres (2016), descrevem um SVL composto principalmente por uma unidade de varredura Ibeo LUX, um sistema de posicionamento e orientação integrado (GNSS/IMU) denominado SPAN-IGM-S1 da NovAtel, uma unidade de gravação, um microcomputador *Raspberry Pi* para sincronização e armazenamento dos dados e uma unidade de conexão, produzida pela empresa Sensormap, para integração de todos os dispositivos. O sistema foi desenvolvido para aplicação em florestas, tendo sido feitas das características do LASER e avaliação de desempenho do sistema, que apresentou acurácia vertical de cerca de 30 cm.

Para a sincronização do sistema, foi desenvolvida uma caixa de alimentação, que permitia o envio das mensagens *NMEA* e sinal *PPS* originárias do INS convertidas para a unidade LASER. A caixa de alimentação permitia que a sincronização do tempo da unidade LASER com o tempo GPS e os pacotes de dados do LASER já fossem gravados sincronizados ao tempo do GPS (TORRES, 2016).

Guo et al. (2017) descrevem um SVL para estudos da biodiversidade, que utiliza um VANT multirrotor de 8 pás, uma unidade de varredura Velodyne Puck VLP-16 ( com acurácia de 3 cm na medida de distância), uma IMU IGM-S1 com MEMs da NovAtel, duas antenas GNSS de dupla frequência, um receptor GNSS de dupla frequência, um microcomputador e sistema com paraquedas e *Wi-Fi* de longo alcance. A autonomia de voo é de aproximadamente 20 minutos e não são mencionadas a carga útil do sistema e como foi elaborada a sincronização do sistema. O desenvolvimento do SVL teve o intuito de avaliar parâmetros da vegetação, tais como MDC, Índice de Área Foliar (*Leaf Area Index* - IAF) e biomassa acima do solo (*Aboveground Biomass* - AGB), além de aperfeiçoar a solução na integração dos sistemas.

A partir da revisão de estado da arte, fica evidente o crescente uso de sistemas de varredura a LASER em plataformas VANT, para diversas aplicações, dentre as quais

encontra-se principalmente o mapeamento e monitoramento de área florestal. Em contrapartida, uma das principais limitações destes sistemas consiste na baixa carga útil suportada, além de limitações relacionadas a baixa autonomia de voo, precisão posicional e densidade de pontos dos sistemas. Outro problema pouco discutido é a sincronização dos sistemas.

Para melhor compreensão acerca dos Sistemas de Varredura a LASER, a Seção 2.2 apresenta uma revisão da tecnologia destes sistemas.

## 2.2 Fundamentação Teórica

Atualmente muito utilizado para sistemas de mapeamento de diversos fins, o LASER, acrônimo para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, originou-se na década de 50. Inicialmente utilizado para pesquisas e aplicações em engenharia, começou a ser empregado para mapeamento pela *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* ainda nos anos 60. No entanto, para fins de pesquisa e desenvolvimento, seu potencial começou a ser explorado somente a partir da década de 90, com o avanço de tecnologias relacionadas à computação e à orientação direta de imagens (SHAN e TOTH, 2008).

De acordo com Kraus (2007), o LASER é um dispositivo óptico para emissão de feixe/pulso de radiação, no qual a luz é fortemente colimada, coerente e monocromática. Como fontes de radiação do LASER, diferentes materiais podem ser utilizados: gás, sólidos ou semicondutor ou ainda, com menor frequência, líquidos, corantes, dentre outros. No entanto, para a área de mapeamentos, são necessários altos níveis de energia para medição de distância, o que caracteriza os LASER de estado sólido e semicondutores como os mais adequados para esta finalidade, pois unem alto grau de intensidade e colimação (SHAN e TOTH, 2008).

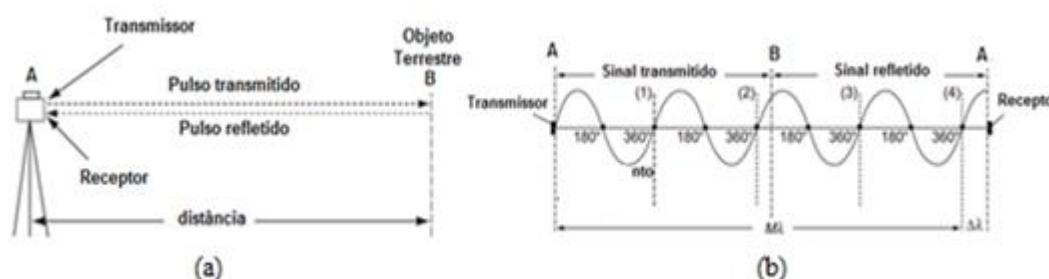
Para obter medidas de distância entre a unidade LASER e uma superfície terrestre, Pfeifer e Briese (2007) citam diferentes princípios, em que a precisão está associada ao alcance de distância de cada um. Medidas em intervalos maiores de distância estão associadas ao tempo de retorno de um pulso emitido, com precisão ao nível do cm, enquanto distâncias menores podem ser obtidas a partir da técnica baseada em fase, com precisão em mm. Em Shan e Toth (2008) são descritos os princípios básicos da medição de distância, do perfilhamento a LASER e da varredura a LASER.

Em relação à medição de distância, o primeiro princípio, que utiliza o termo “eco de pulso”, refere-se a um pulso de radiação intenso, porém curto, a partir do qual se obtém

a distância em função do intervalo de tempo entre a emissão e recepção do pulso LASER, conforme Figura 1.a.

O segundo método refere-se à emissão de um feixe contínuo pelo LASER e não apenas um pulso. A medição da distância é realizada por meio da diferença de fase medida entre o sinal emitido e refletido. O valor de intervalo obtido após a emissão do feixe é derivado e então, são comparados os valores emitidos e recebidos por meio da diferença de fase. A Figura 1.b exemplifica a medida de distância pela diferença de fase (SHAN e TOTH, 2008).

Figura 1 - Princípios da medição de distância por (a) intervalo de tempo entre a emissão e recepção de pulso LASER e (b) diferença de fase.



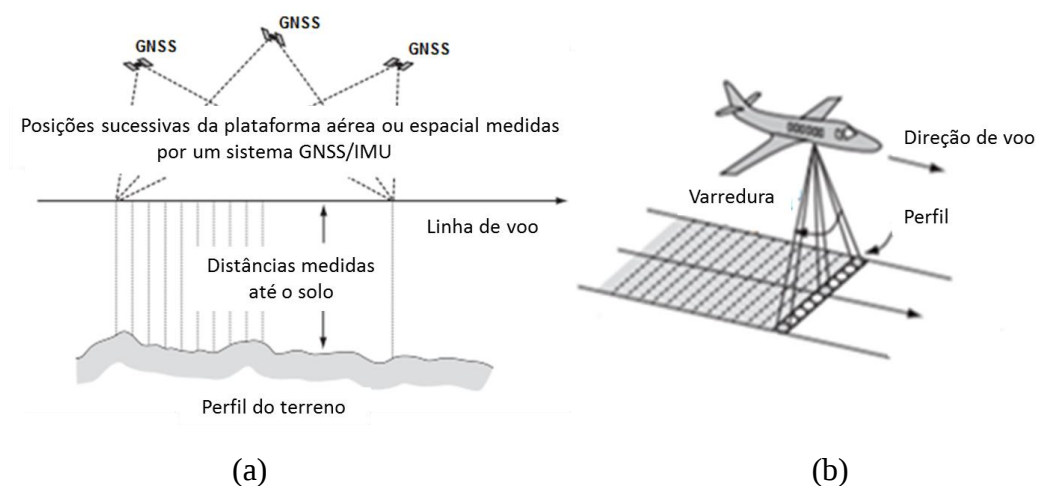
Fonte: Adaptado de Shan e Toth (2008).

Conforme descreve Shan e Toth, (2008), a partir da emissão de um pulso LASER, é possível medir a distância de um conjunto de pontos no solo e montar um perfil bidimensional ou seção transversal da área de superfície, com as elevações ao longo do perfil do terreno. No caso aéreo ou espacial, conforme a plataforma vai se deslocando, o LASER realiza a medida de distância de cada ponto no solo a partir da posição da plataforma. Quando as posições e altitudes da plataforma forem conhecidas, com auxílio do sistema GNSS/ IMU, então pode-se determinar as coordenadas tridimensionais do ponto no terreno, possibilitando o perfilamento do terreno, conforme a Figura 2.a.

Com a inserção do mecanismo de varredura, a partir de um espelho ou prisma rotativo, pode-se realizar medições e mapeamentos diversos e não apenas o perfilamento do terreno. Para um SVLA, a varredura é realizada na direção perpendicular à linha de voo, e o movimento de deslocamento da plataforma possibilita a segunda dimensão. Os ângulos de rotação do espelho podem ser medidos por codificadores de ângulos (*encoders*), permitindo que o terreno seja mapeado de forma lateral e longitudinal na direção da linha de voo. É por meio dessa varredura transversal, que são geradas as nuvens de pontos, que cobrem uma faixa

ou área de terreno (SHAN e TOTH, 2008). Exemplos de varredura aérea são mostrados na Figura 2.b.

Figura 2 - Utilização de sistemas (a) GNSS/IMU e (b) LASER para aquisição de dados.



Fonte: Adaptado de Shan e Toth (2008).

No entanto, para realizar a varredura a LASER, outros sistemas são necessários, ao se tratar de mapeamentos aéreos. De acordo com Vosselman e Maas (2010), a partir da década de 1970 verificou-se que era possível medir distâncias com alta acurácia, entre um alvo terrestre e aeronaves com sistema a LASER. Contudo, a falta de tecnologia adequada não possibilitava que os SVL fossem usados em mapeamentos topográficos, pois com a ausência de informações da posição e orientação da aeronave e da posição de alvos no solo, não se obtinha a qualidade esperada para os produtos finais.

Entre as décadas de 1980 e 1990, o problema do posicionamento foi revolucionado pelo advento do GPS, que permitiu a obtenção de observações de alta acurácia e a realização de mapeamento de qualidade (SEEBER, 2003). Além do posicionamento por GPS, hoje integrado ao posicionamento GNSS, o desenvolvimento do *Inertial Navigation System* (INS) e sua transição do sistema militar para o comercial, como relatado em Schwarz e Wei (2000), possibilitaram a obtenção da orientação da plataforma e sua aplicação na varredura a LASER.

Como o LASER mede apenas a distância que vai da plataforma de aquisição até a superfície do terreno, para que seja calculada precisamente a posição tridimensional de um ponto na superfície terrestre, é necessário conhecer a posição e orientação do sistema de varredura a partir de um sistema de coordenadas, como por exemplo, o *World Geodetic System* (WGS84). Com a adição de componentes ópticos mecânicos junto à unidade LASER a partir

de 1990, a posição e orientação começou a ser dada pela relação *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) e *Inertial Measurement Unit* (IMU), sensores de georreferenciamento direto que possibilitaram melhores resultados em acurácia (WEHR e LOHR, 1999; ACKERMANN, 1999; PFEIFER e BRIESE, 2007).

### 2.2.1 Componentes do Sistema de Varredura a LASER

O SVLA é um sistema móvel composto por uma unidade de varredura a LASER, para medição de ângulos e distâncias e uma combinação GNSS/IMU, para posicionamento e orientação, respectivamente. Por ser um sistema ativo, independente de luz solar, pode ser facilmente utilizado durante o dia ou à noite em aeronaves, sobrevoando áreas de difícil acesso (VOSELMAN e MAAS, 2010). Os principais componentes do SVLA são (BALTSAVIAS, 1999b; MISRA, 2001; WARD et al., 2006; VOSELMAN e MAAS, 2010):

Unidade de Varredura – abrange a unidade LASER e seus mecanismos de varredura, emissor e receptor de pulsos LASER com o detector de sinal, o amplificador, o contador de tempo e componentes eletrônicos para seu funcionamento. Para o levantamento de dados, a unidade de varredura, que é acoplada na fuselagem da plataforma, emite sucessivamente pulsos LASER para mapeamento do terreno.

Antena GNSS – adota-se o padrão de antena GNSS de dupla frequência a uma taxa de amostragem de até 10Hz. Geralmente é montada acima da aeronave para captar o sinal dos satélites com geometria adequada. Além desses componentes, é necessário também, uma estação GNSS terrestre de referência, para realizar o posicionamento relativo.

Receptor GNSS – é um dispositivo eletrônico responsável por transformar o sinal analógico recebido da antena GNSS em sinal digital para o processador.

IMU – Registra dados de acelerações lineares por meio de 3 acelerômetros, os quais podem ser utilizados na interpolação com a trajetória do GNSS, e velocidades de rotação, por meio de 3 giroscópios, para orientação da plataforma. Essa combinação possibilita a reconstrução da trajetória de voo e a atitude da plataforma.

Unidade de controle e gravação de dados – armazenam todos os dados coletados pela varredura a LASER, bem como a sincronização do tempo e controle do sistema.

Sistema de gerenciamento de voo – permite ao piloto verificar o planejamento de voo executado.

Componentes opcionais – câmaras digitais ou de vídeo, câmaras fotogramétricas e outros sensores (termal, multiespectral, etc.), além de controles de temperatura e umidade, dentre outros.

Para que um SVL possa fornecer medidas de distância acuradas, em um determinado sistema de coordenadas, é necessário que a unidade LASER tenha como suporte sistemas de posicionamento e orientação (WEHR E LOHR, 1999). Assim, a integração entre estes sistemas sensores torna-se fundamental para a obtenção de dados com qualidade.

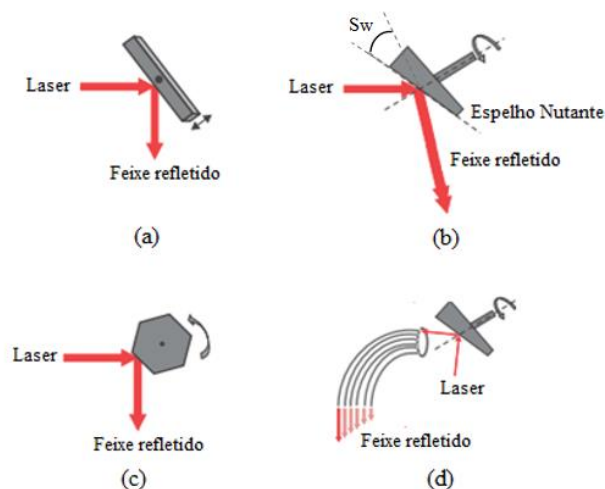
De acordo com Baltsavias (1999.a), com a disponibilidade de componentes comerciais como unidades de varredura a LASER e sistemas de posicionamento e orientação, cresceu a montagem de sistemas integrados por usuários, e não apenas por fabricantes.

No entanto, a integração entre os componentes é um dos principais obstáculos na montagem de sistemas funcionais, assim como desenvolvimento de softwares de controle, sincronização e pós-processamento manual dos dados (BALTSAVIAS, 1999.a). Portanto, conhecer os princípios básicos de funcionamento dos sistemas que compõem o SVL torna-se importante para a integração e sincronização de sensores.

#### 2.2.1.1 Sistema de Varredura

Os SVL apresentam mecanismos de varredura, que podem ser unidirecional ou bidirecional, compostos por um conjunto de lentes e espelhos que direcionam o pulso LASER (SHAN E TOTH, 2008). São conhecidos como mecanismos de varredura, os espelhos oscilantes, que geralmente produzem uma varredura bidirecional, em forma de zigue-zague (varredura bidirecional), ou uma varredura bidirecional do tipo meandro de linhas ou arcos paralelos; polígono de rotação e seus espelhos multifacetados, que possibilitam a varredura em linhas paralelas (unidirecional); espelho nutante, também conhecido como varredura Palmer, que apresenta um padrão elíptico e a Varredura por fibra-óptica, que produz um padrão de varredura em linhas paralelas, conforme Figura 3 (WEHR e LOHR, 1999).

Figura 3 - Mecanismos de Varredura: (a) espelho oscilante, (b) varredura palmer, (c) varredura com polígono de rotação, e (d) varredura por fibras ópticas.



Fonte: Adaptado de Wehr e Lohr (1999) e Vosselman e Maas (2010).

Devido ao uso em plataformas fixas e móveis, a varredura a LASER pode ser classificada em estática e dinâmica, principalmente pela diferença nas etapas iniciais de processamento de dados. Na situação estática, a varredura é feita com componentes rotativos (espelho ou luneta de uma estação), e na situação dinâmica, a varredura é feita mediante a deflexão do pulso LASER com a plataforma em deslocamento, permitindo o levantamento de dados da área (PFEIFER e BRIESE, 2007). A partir da definição citada, a varredura a LASER, dependendo da posição da plataforma, pode ser classificada como terrestre (plataforma fixa ou móvel) ou aérea (móvel).

Desta forma, dispositivos LASER integrados aos SVL e instalados em plataformas aéreas ou terrestres, realizam medidas de distância, reproduzindo a geometria da superfície mapeada, sem qualquer contato direto, gerando produtos tridimensionais (nuvens de pontos ou mapas de distância) de qualidade, em relação a outros sistemas de aquisição (VOSSELMAN e MAAS, 2010).

#### 2.2.1.2 Sistema de Posicionamento

Uma das características fundamentais para a determinação da posição do SVL, é a necessidade de posicionamento por GNSS. De acordo com Monico (2007), o posicionamento tem a característica de estabelecer a posição de objetos em relação a um referencial específico e é categorizado como posicionamento absoluto, de coordenadas

associadas ao centro de massa da terra, e posicionamento relativo, em que coordenadas são obtidas a partir de um referencial materializado por meio de um ou mais vértices conhecidos. Os posicionamentos absoluto e relativo podem ainda ser subdivididos em estático e cinemático. O posicionamento absoluto pode ser classificado também em Posicionamento por ponto simples (PPS), Posicionamento por ponto preciso (PPP) e DGPS (*Differential Global Positioning System*).

Devido às características de utilização do SVL, o método mais utilizado para posicionamento do sistema é o relativo cinemático, uma vez que este possibilita a determinação de um ponto com relação a outro de coordenadas conhecidas, denominado de estação de referência ou estação base. Monico (2007) cita que o posicionamento relativo é realizado a partir do rastreamento de um grupo de pelo menos dois ou mais satélites por dois ou mais receptores, simultaneamente, e em geral, é obtido pela dupla diferença de fase a fim de eliminar o erro de relógio do satélite. Também pode ser realizado a partir de observáveis como pseudodistância e fase da onda portadora.

No entanto, se erros como multicaminho e efeitos atmosféricos afetam a estação de referência, estes podem ser propagados para as coordenadas processadas. Portanto, torna-se fundamental que os erros sejam analisados e corrigidos ainda na estação de referência, para que as coordenadas processadas não sejam influenciadas e consequentemente, decaia a acurácia das mesmas (POLEZEL et al, 2008).

Uma alternativa ao posicionamento relativo utilizado em SVL é o posicionamento por ponto preciso (PPP). Segundo Monico (2007), este método apresenta grande potencial para aplicações que exigem alta acurácia, devido ao uso de efemérides precisas e correções dos relógios dos satélites, ambos com alta precisão, junto a pseudodistância ou fase da onda portadora, ou ambos as observáveis.

### 2.2.1.3 Sistema de Navegação Inercial

Contrapondo-se à tecnologia GNSS, o sistema inercial é totalmente autônomo e não requer qualquer informação externa, exceto a inicialização necessária (POREBA, 2011). A navegação inercial é uma técnica na qual as medições são fornecidas por acelerômetros e giroscópios e utilizadas para obter a posição e a orientação de um objeto em relação a um ponto de partida, com orientação e velocidade conhecidas.

Para obter a orientação do sistema, é utilizada a IMU, que envolve normalmente três giroscópios ortogonais responsáveis por medir a velocidade angular e três acelerômetros ortogonais, medindo as acelerações lineares. A partir do conhecimento das velocidades angulares dadas pelos giroscópios, acelerações medidas no decorrer do tempo e a posição inicial, é possível estimar a posição da plataforma durante o período de deslocamento. A frequência de medição da IMU é geralmente de 100–200 Hz (SCHWARZ et al., 1993; WOODMAN, 2007; POREBA, 2011).

Para Woodman (2007), existem diversas aplicações de navegação inercial, tais como a navegação de aeronaves, naves espaciais, submarinos e navios, além de mísseis táticos e estratégicos. A miniaturização de sensores, com a criação de dispositivos como *Micro Electromechanical Systems (MEMS)* foi essencial para a fabricação de sistemas inerciais pequenos e leves. De acordo com De Lima (2005), os dispositivos *MEMS* apresentam características importantes, como menor tamanho, menor peso, menor consumo de energia, menor custo e alta confiabilidade de operação, ao serem comparados com os sensores convencionais, como os giroscópios ópticos e por isso, estão substituindo alguns dos seus precursores.

### 2.2.2 Sincronização do Sistema de Varredura a LASER

Para Vosselman e Maas (2010), a correta sincronização do tempo dos dispositivos dos sistemas componentes do SVL é um dos principais problemas. A sincronização é efetuada pelo sinal PPS e mensagem NMEA, que permite a comparação entre os tempos fornecidos pelos relógios internos da unidade LASER e GNSS/IMU.

De acordo com Morin (2002), para a sincronização dos sensores do SVL, geralmente adota-se os sistemas de tempos GPS como base de tempo, por este ser comum a esta funcionalidade. Isso ocorre, pois os dados GNSS já são referenciados ao sistema de tempo GNSS quando obtidos, uma vez que sabe-se o instante no qual foi feita a observação por meio do relógio interno do receptor GNSS.

Deste modo, a sincronização do SVL é feita pela unidade de controle, que registra as medidas e ângulos obtidos na varredura LASER. O tempo da unidade de controle é então controlado por um relógio interno. Esse relógio interno, por sua vez, é sincronizado com o tempo GPS do relógio interno do receptor GNSS, por meio do sinal PPS. A cada medida e

ângulo obtido, são atribuídas “etiquetas” de tempo do GPS, que servem para relacionar os diferentes sistemas (MORIN, 2002).

### 2.2.3 Geometria de Aquisição

Segundo Wehr e Lohr (1999), para obter medidas de distância com a unidade LASER, o mesmo caminho óptico percorrido pelos pulsos LASER, tanto na emissão quanto na recepção, possibilita que os pontos iluminados na superfície estejam sempre em um mesmo campo de visada ou ângulo de abertura máximo (*Field Of View* - FOV) do receptor óptico. A divergência existente após a emissão e recepção de um pulso delimita o ângulo de varredura instantâneo ou campo de visada instantâneo (*Instantaneous Field Of View* – IFOV), definido pela lei de difração da luz.

Essa divergência ocorre pois, ainda que o pulso seja colimado ao ser emitido, ele será espalhado e assumirá uma forma circular ou elíptica quando atingir uma superfície. Quanto maior a distância entre o emissor e o solo, maior será o diâmetro  $D$  iluminado na área levantada (SHAN e TOTH, 2008). Essa forma circular ou elíptica que o pulso assume é conhecida como *footprint*.

Para obter o valor do IFOV, é necessário conhecer a abertura do emissor LASER ( $d$ ) e o comprimento de onda da luz ( $\lambda$ ) (WEHR e LOHR, 1999). De acordo com Vosselman e Maas (2010), como a refletividade de um objeto depende do comprimento de onda, diferentes sistemas de varredura a LASER apresentam diferentes respostas de acordo com a superfície mapeada. Para comprimentos de onda próximos à parte visível do espectro, por exemplo, superfícies de água são raramente vistas pelo SVL, devido à alta absorção de água. No caso de sistemas comerciais, os comprimentos de onda utilizados variam entre 800 nm e 1550 nm, com largura espectral geralmente no intervalo entre 0,1 e 0,5 nm. Na equação 1, portanto, é exemplificado o cálculo do IFOV, a partir do comprimento de onda e abertura do emissor LASER.

$$IFOV = 2,44 \frac{\lambda}{d} \quad (1)$$

Em relação ao diâmetro do *footprint*, este é obtido, segundo Wehr e Lohr (1999), pela equação 2.

$$D = 2 * H * \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) \quad (2)$$

em que,

$D$  – diâmetro do *footprint* (m);

$\gamma$  – ângulo de divergência do pulso LASER (rad) ;

$H$  – altura de voo (m).

E a largura da faixa de varredura no terreno (*swath width* -  $Sw$ ), considerando um terreno plano e horizontal, é obtida conforme equação 3.

$$Sw = \frac{H}{\cos^2(\theta)} \gamma \quad (3)$$

em que,

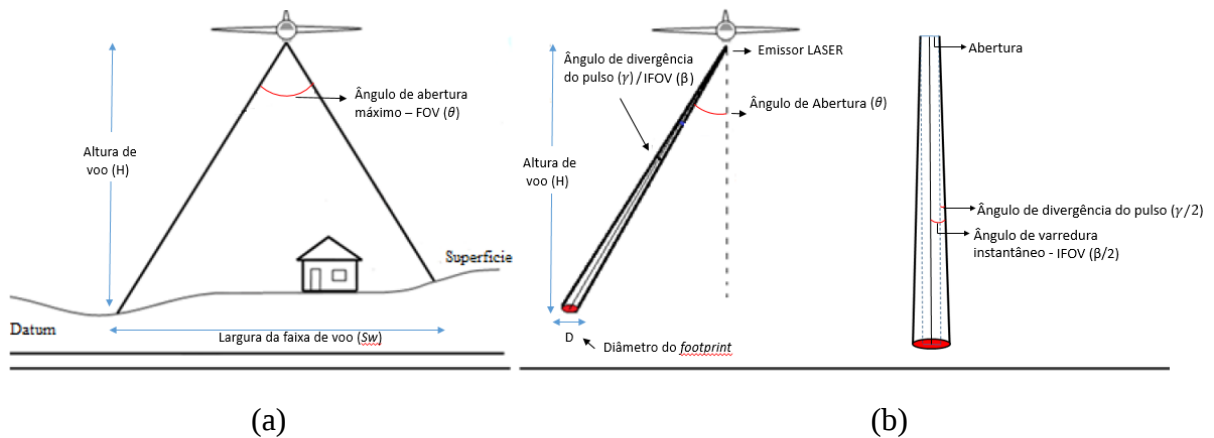
$Sw$  – largura da faixa de varredura no terreno (m);

$\theta$  – ângulo de abertura máximo, também conhecido como FOV (graus);

$H$  – altura de voo (m).

As Figuras 4.a e 4.b exemplificam a representação da largura da faixa de varredura no terreno e do diâmetro do *footprint*, além dos demais elementos relacionados à geometria de aquisição dos dados LASER.

Figura 4 - Elementos relacionados à geometria de aquisição. Representação de elementos relacionados a obtenção da largura da faixa de voo (a), e à obtenção do *footprint* (b).



Fonte: Adaptado de Galo (2012).

Em relação à frequência de repetição do pulso (FRP), este foi um dos fatores que caracterizaram os SVLA a partir da década de 90. Com o decorrer dos anos, houve um aumento na densidade de pontos LASER em solo, devido ao aumento da taxa de FRP, que atualmente pode chegar até 1 MHz (VOSELMAN e MAAS, 2010; RIEGL, 2017).

Além da FRP, também se utiliza a frequência de varredura (FV), que corresponde ao número de varreduras (ciclos) por segundo, e a velocidade da aeronave ( $v$ ), dada em m/s. A partir dessas variáveis, são estimados o número de pontos por linha de varredura ( $N$ ), o espaçamento entre pontos ao longo da direção de voo ( $dx_{along}$ ) e entre pontos transversal à linha de voo ( $dx_{across}$ ), de acordo com as seguintes equações (BALTSAVIAS, 1999.b).

$$N = \frac{FRP}{FV} \quad (4)$$

$$dx_{along} = \frac{v}{FV} \quad (5)$$

$$dx_{across} = \frac{Sw}{N} \quad (6)$$

Para montar o planejamento de voo com SVLA, são estimados também o número de faixas requeridas ( $n$ ), a área coberta ( $A$ ) e a densidade de pontos por área ( $dp$ ), conforme exemplificam as equações a seguir (BALTSAVIAS, 1999.b).

$$n = \text{mínimo } (n_i)$$

Considerando,

$$(n_i - 1) \geq \frac{w - Sw}{Sw \cdot \left(1 - \frac{q}{100}\right)} \quad (7)$$

em que,

$w$  – menor dimensão do retângulo envolvente da área a ser levantada (km);

$q$  – sobreposição entre as faixas.

A área coberta ( $A$ ) é dada por :

$$A = Sw \cdot L \left[ (n - 1) \cdot \left(1 - \frac{q}{100}\right) + 1 \right] \quad (8)$$

Considerando que,

$$L = v \cdot T_s \quad (9)$$

em que,

$L$  – maior dimensão do retângulo envolvente da área a ser levantada (km);

$T_s$  – tempo de voo líquido por faixa (s).

E a densidade de pontos por m<sup>2</sup> (dp) é obtida por meio da expressão:

$$dp = \frac{FV \cdot n \cdot T_s}{A} \quad (10)$$

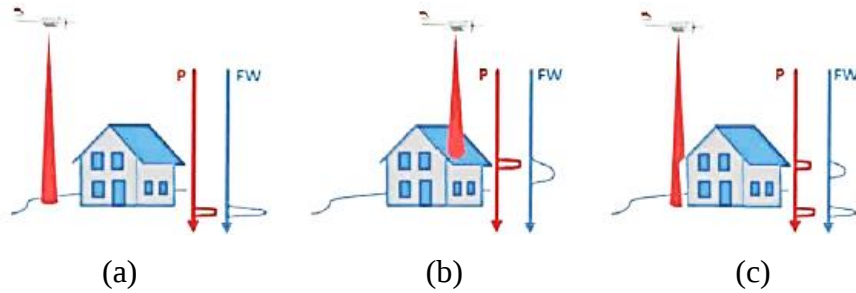
No que se refere aos pulsos de retorno, estes dependem das características da superfície imageada, principalmente da sua orientação e relevo (VOSSELMAN e MAAS, 2010), bem como do equipamento utilizado e sua configuração para obter determinado número de pulsos.

De acordo com Shan e Toth (2008), a técnica de detecção de retorno discreto permite controlar o volume de dados obtidos, isto é, o número de retornos que podem ser gravados por pulsos LASER, em comparação a sistemas de ondas completas (*fullwaveform*). Com a evolução dos sistemas, que inicialmente gravavam apenas um retorno, sistemas subsequentes permitiram a gravação de até cinco retornos por pulso, além da amplitude de retorno.

Com o desenvolvimento tecnológico, Mallet e Bretar (2009), relatam o surgimento de sistemas comerciais com varredura a LASER capazes de obter uma onda completa do retorno do pulso emitido (*full waverform*). Essa técnica permite, além de obter a distância de superfícies mapeadas, também extrair outras propriedades físicas dos objetos, por meio da análise da onda completa.

A Figura 5 representa o registro, pelo sistema, dos retornos de um pulso discreto (P) e um pulso em sua forma *fullwaveform* (FW), para diferentes situações. A Figura 5.a caracteriza o retorno similar de um pulso dicreto e em sua forma *fullwaveform* quando atinge um terreno plano, a Figura 5.b apresenta retornos distintos devido à inclinação da superfície do telhado, e a Figura 5.c mostra múltiplos retornos devido à incidência do feixe em um objeto com diferentes alturas.

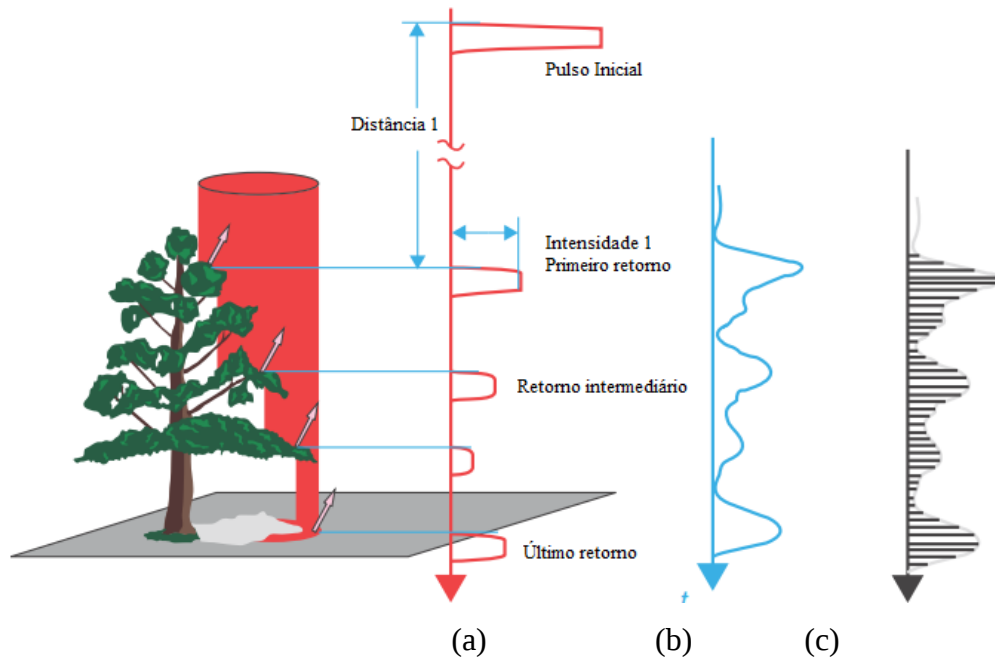
Figura 5 - Sinais de retornos a partir de diferentes técnicas: P (pulso discreto) e FW(full waveform).



Fonte: Vosselman e Maas (2010).

A Figura 6 detalha múltiplos retornos de um pulso discreto e em sua forma *fullwaveform*, na qual a Figura 6.a representa pulsos discretos, a Figura 6.b mostra o *fullwaveform* e a Figura 6.c, o *fullwaveform* digitalizado.

Figura 6 - Múltiplos retornos e formato de onda completo.



Fonte: Adaptado de Vosselman e Maas, 2010.

#### 2.2.4 Modelo Matemático do Sistema de Varredura a LASER

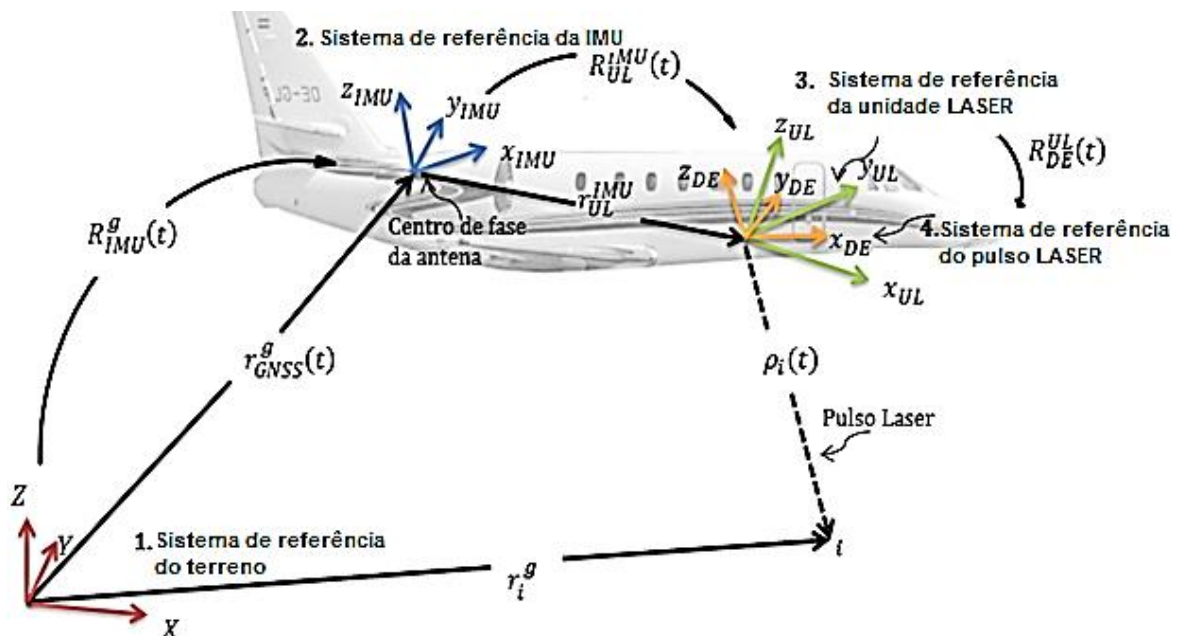
De acordo com Morin (2002), é fundamental que se conheça o funcionamento e as características de operação dos sistemas componentes do SVL, assim como dos parâmetros que os relacionam espacialmente, tais como translações e orientação, para se obter uma nuvem de pontos a partir de dados brutos procedentes de um SVL. As coordenadas obtidas a partir dos

pontos gerados pelo SVL resultam da combinação entre as medidas de cada um dos componentes do sistema, assim como parâmetros que os relacionam (HABIB e RENS, 2007).

Devido à necessidade de integrar os dados dos sistemas sensores, componentes do SVL, quatro sistemas de coordenadas são considerados no levantamento do SVL. Para Habib e Rens (2007) são: o sistema de coordenadas geodésico, ao qual os dados provenientes do receptor GNSS estão referenciados (WGS84); o sistema de coordenadas da IMU; sistema de coordenadas da unidade LASER e o sistema de coordenadas do dispositivo de emissão (ou do pulso LASER).

Segundo Habib e Rens (2007), geralmente o processamento de dados da IMU ocorre em conjunto com o cálculo das posições obtidas da antena GNSS e usando as informações do *lever-arm* (deslocamento) da antena GNSS para a IMU, considerando as posições em relação à origem do sistema da IMU. Dessa forma, a nuvem de pontos com os dados LASER, calculada pelo modelo matemático descrito inicialmente por El-Sheimy et al. (2005) tem como origem, o sistema da IMU, a partir do processamento de dados GNSS/IMU. Na Figura 7, é ilustrada a relação entre os sistemas referenciais envolvidos, adaptado por Torres (2016).

Figura 7 - Sistemas referenciais envolvidos em um levantamento por SVL.



Fonte: Adaptado de El-Sheimy et al. (2005) e Torres (2016).

Em que,

$i$ : ponto a determinar no referencial do terreno, ou referencial geodésico;

$r_i^g$ : posição do ponto  $i$  no referencial geodésico – incógnita;

$r_{GNSS}^g(t)$ : posição do centro de fase da antena GNSS, reduzida ao centro da IMU, no referencial geodésico;

$R_{IMU}^g(t)$ : matriz de rotação entre o sistema referencial da IMU e o sistema referencial geodésico – dada pelas medidas angulares fornecidas pela IMU;

$R_{UL}^{IMU}(t)$ : matriz de rotação entre o sistema referencial da unidade LASER e o sistema referencial da IMU cujos ângulos de rotação são refinados na calibração;

$r_{UL}^{IMU}$ : posição da origem do sistema referencial da unidade LASER no referencial da IMU (lever-arm) – determinada por medidas diretas ou indiretas, podendo ser refinada na calibração;

$R_{DE}^{UL}(t)$ : matriz de rotação entre o sistema referencial da unidade LASER e do sistema referencial do dispositivo de emissão LASER – dada pelas medidas angulares do sistema de varredura;

$\rho_i(t)$ : distância entre o ponto de emissão do feixe e o alvo  $i$  em um instante  $t$ ;

$t$ : instante de observação do ponto, determinado pela sincronização do SVL.

O modelo matemático do SVL utilizado para descrever o processo apresentado, adaptado de Habib e Rens (2007), é dado pela Equação 11:

$$r_i^g = r_{GNSS}^g(t) + R_{IMU}^g(t)r_{UL}^{IMU} + R_{IMU}^g(t)R_{UL}^{IMU}R_{DE}^{UL}(t) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho_i(t) \end{pmatrix} \quad (11)$$

O processo é realizado transformando as medidas obtidas no referencial do dispositivo de emissão para o referencial da unidade LASER, as medidas deste referencial para o referencial da IMU, e deste referencial para o referencial geodésico, sequencialmente.

$$R_{IMU}^g(t) = R_Z(k(t))R_Y(\varphi(t))R_X(\omega(t))$$

$$R_{UL}^{IMU} = R_Z(\Delta k(t))R_Y(\Delta \varphi(t))R_X(\Delta \omega(t))$$

$$R_{DE}^{UL}(t) = R_Z(\alpha(t))R_Y(\beta(t))$$

Com:

$$R_Z(k) = \begin{pmatrix} \cos k & \sin k & 0 \\ -\sin k & \cos k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_Y(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix}$$

$$R_X(\omega) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix}$$

$\alpha, \beta$ : os ângulos de varredura do espelho;

$k, \varphi, \omega$ : os ângulos de atitude estimados no processamento GNSS/ IMU;

$\Delta k, \Delta \varphi, \Delta \omega$ : os ângulos de desalinhamento medidos entre os sistemas da IMU e da unidade LASER.

#### 2.2.5 Fontes de erro do Sistema de Varredura a LASER

A acurácia de coordenadas tridimensionais de um ponto obtido com SVLA depende de diversos elementos, dentre os quais considera-se principalmente a acurácia da medida de distância, da posição e orientação do pulso LASER. Como são utilizados diferentes sensores para obter medidas de distância, posição e orientação, erros inerentes a esses dados podem influenciar a acurácia dos resultados finais (BALTSAVIAS, 1999.b).

Por não serem obtidas medidas redundantes, é importante considerar os efeitos de erros sistemáticos e aleatórios na reconstrução tridimensional da cena, que podem ser observados por exemplo, a partir do uso de pontos de controle em solo e de discrepâncias na sobreposição de faixas vizinhas (SCHENK, 1999; VOSSelman e MAAS, 2001).

Devido à complexidade que envolve toda a conexão do sistema, muitos dos erros não são estimados a partir de discrepâncias entre faixas. Existem componentes da unidade LASER (por exemplo, espelhos oscilantes ou rotativos) que podem afetar a acurácia dos dados do SVL, devido à problemas de posicionamento, problemas mecânicos ou desgaste, provenientes da fabricação, montagem e utilização do sensor. Erros com possibilidades de interferir na qualidade dos dados de varredura a LASER também podem ser provenientes da calibração individual do sensor (erros de medição), problemas de sincronização e desalinhamento entre os diferentes sensores (SHAN e TOTH, 2008).

Algumas das principais fontes de erros são listadas no Quadro 1 (SHAN e TOTH, 2008).

Quadro 1- Principais fontes de erros que afetam a qualidade dos dados LASER.

|                                       | Erros                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Solução de Navegação<br>(GNSS/IMU)    | Erros na posição e atitude da plataforma                                                                                                                                                                                                                    |
| Calibração do sensor<br>LASER         | Erro na medida de distância<br>Erro no ângulo de varredura<br>Efeito da divergência do pulso ( <i>footprint</i> )                                                                                                                                           |
| Calibração entre sensores             | Erro de desalinhamento, ou erro do <i>boresight</i> , entre o eixo do sistema inercial e o eixo do sistema de varredura a LASER<br>Erro na medida do <i>lever arm</i> (vetor deslocamento entre a antena GPS e um ponto de referência do sistema inercial). |
| Outras importantes fontes<br>de erros | Características do terreno e do objeto<br>Sincronização de tempo<br>Transformações de sistemas de coordenadas<br>Refração atmosférica<br>Montagem do sensor                                                                                                 |

Fonte: Adaptado de Shan e Toth (2008).

#### 2.2.5.1 Solução de Navegação (GNSS/IMU)

No que se refere ao posicionamento, de acordo com Monico (2007), observáveis GNSS estão sujeitas a erros grosseiros, sistemáticos e aleatórios, assim como outras observáveis envolvidas nos processos de medição. Em Monico (1995), são descritas algumas fontes de erros sistemáticos referentes ao posicionamento GNSS, tais como erros do relógio dos satélites, órbitas, efeitos atmosféricos, efeitos do multicaminho, erro no relógio interno, erro na propagação do sinal, entre o receptor/antena e a estação, além de outros efeitos.

Para dados LASER, o posicionamento da trajetória do SVL ocorre por meio de posicionamento relativo e é influenciado por dois fatores principais: configuração do satélite/propagação do sinal (relacionado à possíveis bloqueios de sinal, número de satélites visíveis,

linha de base para a geometria do satélite, número de linhas de base, entre outros) e acurácia das observáveis (VOSSSELMAN e MAAS, 2010).

Segundo Monico (2007), o posicionamento relativo possibilita a minimização de erros nas medidas de pseudodistância, que são obtidas pelo princípio da dupla diferença, por meio da utilização de dois ou mais receptores que permitem, a partir de locais diferentes, rastrear os mesmos satélites e eliminar o erro do relógio destes. Outra fonte de erro está relacionada à solução da ambiguidade. Para Vosselman e Maas (2010), as fontes de erros que afetam a acurácia da linha de base são pequenas quando a ambiguidade é corretamente determinada.

Poręba (2011) comenta sobre as medições realizadas com *DGPS* e a melhora da precisão da posição de um receptor, utilizando dados de uma estação de referência. O objetivo deste método é eliminar de forma parcial ou total, os erros externos (erro do relógio do satélite, atraso do sinal na ionosfera e troposfera, entre outros) que afetam os receptores GNSS. No entanto, esse método não elimina erros que podem ser provenientes de uma geometria satelital desfavorável, ruídos, resolução limitada do receptor, bem como causados pela dinâmica variável do receptor.

De forma geral, influenciam na acurácia de dados LASER aerotransportados, o posicionamento GNSS, a orientação da IMU e a forma como o ângulo de varredura do pulso LASER é medido. As duas últimas fontes de erro citadas provocam uma redução considerável na acurácia dos dados (KRAUS, 2007). Para Vosselman e Maas (2010), por mais que exista uma forte integração do sistema e posicionamento e orientação, não existe um instrumento perfeito e por isso os erros de orientação devem ser avaliados em relação ao eixo e tempo, fornecidos pelo sistema inercial. Tentativas de remoção de erros utilizando processos para filtragem/suavização (Filtro de Kalman) não são capazes de eliminar os erros totalmente, uma vez que estes variam de acordo com o instrumento e o desempenho da aeronave.

#### 2.2.5.2 Calibração do sensor LASER

De acordo com Baltsavias (1999a), a acurácia da medida de distância é um dos elementos mais complexos no que se refere a elementos que afetam a acurácia das coordenadas tridimensionais. Contudo, os erros que afetam a acurácia da medida de distância podem ser minimizados ou mitigados quando se tomam as precauções necessárias à aquisição de distância, tornando-se estes erros mínimos quando comparados à outras fontes de erros.

Conforme relata Vosselman e Maas (2010), um erro que afeta a distância está relacionado aos mecanismos de varredura do espelho, sujeitos à variações de aceleração, que podem provocar mudanças na posição do espelho. Essa variação da posição angular ou erro no ângulo de varredura, obtido entre o espelho de varredura e o codificador (*encoder*), pode provocar erros na medida de distância.

Outras importantes fontes de erro que afetam a distância são descritas em Baltsavias (1999a), que cita ruídos em detectores, amplitude do sinal recebido (dependente da superfície local normal e refletividade de um alvo), retornos mistos obtidos de estruturas verticais, como vegetação, diferentes tipos de terrenos e largura do *footprint*, além de múltiplos retornos dentro do *footprint*, média de ciclos de superfícies descontínuas com LASER que utiliza onda completa, além de temperatura e luz, que também podem afetar a aquisição de dados.

### 2.2.5.3 Calibração entre sensores

Conhecidos como ângulos de *boresight*, os ângulos de pequeno valor entre a IMU e a unidade LASER determinam o desalinhamento existente entre os eixos dos sistemas. Toth (2002) explica que a rotação ao redor do eixo x ( $\omega$ ), a rotação ao redor do eixo y ( $\varphi$ ) e a rotação ao redor do eixo z ( $k$ ) descrevem a rotação do *boresight* a partir do corpo da unidade LASER. Um dos principais problemas é a determinação destes três ângulos de desalinhamento, o que pode acarretar diferenças entre os pontos medidos e a superfície do terreno, consequentemente, afetando as coordenadas tridimensionais obtidas.

Segundo Morin (2002), o erro de *boresight*, ou desalinhamento angular entre a unidade de varredura a LASER e o sistema inercial, é um dos erros mais críticos no SVL. O erro de desalinhamento é dado em função da altura de voo, do ângulo de varredura e da direção de voo, e deve ser corrigido antes de o sistema ser utilizado na prática, uma vez que o desalinhamento entre os sensores pode proporcionar a orientação incorreta da plataforma de aquisição de dados e afetar a qualidade dos dados.

Além do *boresight*, é necessário conhecer também os valores de *lever arm*, definido como o vetor deslocamento entre a origem dos sistemas de varredura, posicionamento e orientação (SHAN E TOTH, 2008). De acordo com Skaloud e Lichti (2006), embora seja trabalhoso, a medida do *lever arm* pode ser obtida de forma separada entre os sistemas, utilizando meios independentes. No entanto, a dificuldade em medir a origem dos sistemas pode

possibilitar o surgimento de erros grosseiros. Para Vosselman e Mass (2010), erros nas medidas de *lever arm* provocam incertezas no posicionamento dos sensores, influenciando a qualidade da nuvem de pontos.

#### 2.2.5.4 Outras importantes fontes de erros

Interferem no produto final, além dos erros relacionados ao sistema LASER (como o instrumento LASER, GNSS/ INS) e características dos dados (primeiro / último pulso, divergência de feixe, densidade do ponto e altura de voo), os erros originários do processamento dos dados, que podem ser relacionados à interpolação, filtragem, segmentação e suavização de dados, além de erros referentes ao alvo (características do terreno e do dossel) (KUKKO e HYYPPÄ, 2007).

Em Baltsavias (1999b) é descrito que a acurácia das coordenadas tridimensionais sofre influência de diversos fatores, principalmente transformação de sistemas de coordenadas, distância, posição, atitude e erros relacionados ao tempo. Os erros na sincronização de tempo entre os dados afetam a determinação da trajetória da plataforma considerando o vetor translação, assim como a matriz de rotação, apresentados no modelo matemático do LASER (ŠKALOUD, 1999).

Erros relacionados à montagem do sistemas também podem prejudicar a qualidade dos dados. May e Toth (2007) destacam que fabricantes da tecnologia SVL especificam apenas a precisão aproximada de seus sistemas, sem informar quais fontes de erros são consideradas para obter tal precisão, o que dificulta comparar diferentes sistemas. Portanto, é necessário determinar e analisar variáveis a serem consideradas no estudo das fontes de erro, que podem afetar a qualidade do resultado final.

Além dos erros mencionados anteriormente, é necessário investigar a natureza dos erros aleatórios que influenciam na qualidade dos dados do SVL, pois ruídos podem acarretar erros aleatórios na nuvem de pontos. Um fato comum é considerar que a acurácia relativa não sofre influência de ruído aleatório, o que não acontece com os dados SVL (SHAN e TOTH, 2008).

## 2.2.6 Métodos de Calibração para o Sistema de Varredura a LASER

A calibração de componentes do SVL, bem como o ajuste de dados no pós-processamento é um procedimento importante para os dados LASER. A acurácia da nuvem de pontos depende da precisão dos dispositivos componentes do SVL, além dos cuidados tomados na sequência de processamentos de dados (MORIN, 2002).

Habib et al. (2010) cita três etapas de calibração para um SVLA: a calibração em laboratório, a calibração da plataforma e a calibração em voo. A calibração em laboratório é uma etapa executada por fabricantes, na qual individualmente é realizada a calibração de cada componente do SVL, e na qual é estabelecida a relação entre a unidade LASER e IMU. A relação entre a unidade LASER e a antena GNSS é dada pela calibração da plataforma. Na calibração em voo são estimados os parâmetros do SVL, a partir de campos de teste montados com superfícies de controle. A discrepância entre os parâmetros obtidos nas calibrações anteriores e a superfície de controle, possibilita que os parâmetros de montagem (*boresight e lever arm*) e tendência nas medidas do sistema sejam refinados nesta etapa.

No que se refere aos parâmetros de montagem (*boresight e lever arm*), são geralmente determinados durante os procedimentos de calibração, enquanto as demais grandezas componentes do modelo matemático do LASER para a geração de coordenadas tridimensionais (Equação 11) são obtidas durante o processo de aquisição de dados (HABIB e RENS, 2007; HABIB et al. 2010). De acordo com Skaloud e Litchi (2006), só é possível determinar os ângulos de *boresight* em voo, e desde que a orientação derivada do sistema inercial seja acurada o suficiente.

Para Morin (2002), considerando variáveis como tempo e custo, relativa estabilidade dos parâmetros de calibração e magnitude de certas fontes de erros, as etapas de calibração tornam-se impraticáveis e até desnecessárias. Habib et al. (2010), citam que a calibração em voo é um procedimento complexo, requer cuidados nos procedimentos de controle da superfície, alguns métodos envolvem procedimentos manuais ou empíricos e até mesmo extração de informações brutas, como medidas de distância, ângulos, posição e orientação de cada pulso, além disso, não existe uma metodologia comumente aceita, uma vez que a calibração é baseada no que é informado pelo fabricante e na experiência de quem fornece os dados. Desta forma, erros sistemáticos podem ser omitidos durante o processo de geração da nuvem de pontos e ajuste de faixas.

Segundo Habib et al. (2010), o número de pesquisas com LASER, a fim de eliminar ou mitigar erros sistemáticos que afetam o SVL cresceu nos últimos anos. Para isso, baseado na natureza dos dados utilizados e no modelo matemático, duas categorias representam as principais abordagens existentes: calibração de SVL e ajustamento de faixas. Bang (2010) cita que o ajustamento por faixas possibilita a redução das discrepâncias entre faixas sobrepostas, enquanto a calibração do SVL trata dos erros sistemáticos visando a acurácia posicional do sistema.

Contudo, embora seja utilizado o modelo matemático apropriado (equação 11), Habib et al. (2010) descreve que a função de transformação que modela os erros sistemáticos entre o sistema de coordenadas e o sistema de referência pode não ser adequada dependendo da natureza dos erros relacionados aos parâmetros do sistema, sendo uma desvantagem para as abordagens de calibração e ajustamento de faixas. Outra desvantagem está relacionada ao acesso restrito aos dados brutos, que nem sempre é disponibilizado para os usuários. Assim, baseado na natureza dos dados, são propostas novas abordagens, como calibração simplificada, calibração quase-rigorosa e calibração rigorosa (BANG et al., 2009; HABIB et al., 2010, KERSTING, 2012).

Para Kersting (2012), em comparação a calibração de sistemas fotogramétricos, a calibração do SVL é uma tarefa complexa, que exige maior rigor devido à natureza irregular da nuvem de pontos, além de mecanismos e primitivas adequados. Para Morin (2002) e Habib et al. (2010), a natureza irregular e esparsa de pontos da nuvem LASER dificulta, por exemplo, a correspondência ponto a ponto em faixas sobrepostas. Como alternativa, podem ser empregadas primitivas como linhas ou planos que possibilitam melhor identificação nas faixas sobrepostas. Contudo, para serem utilizadas é necessário um pré-processamento dos dados, de forma que seja possível identificar e extrair feições da nuvem de pontos. Ressalta-se ainda, que dados confiáveis com essas primitivas podem ser extraídos apenas em áreas urbanas, devido à presença, por exemplo, de edificações.

## 2.2.7 Controle de Qualidade do Sistema de Varredura a LASER

De acordo com Habib e Rens (2007), medidas padronizadas são necessárias para usuários que desejam avaliar a qualidade da acurácia posicional de nuvens de pontos obtidas com SVL, e portanto, devem possibilitar a avaliação da qualidade relativa/interna e absoluta/externa de nuvens de pontos.

No controle de qualidade relativo, a partir da correspondência de feições conjugadas em faixas sobrepostas, compara-se a nuvem de pontos de diferentes faixas de voo. Por meio de interpolação das intensidades de retorno dos pulsos e da medida das distâncias em uma malha regular, são obtidas imagens de intensidade e distância, possibilitando a identificação de feições nas imagens e a extração de coordenadas 3D, que ocorre devido à sobreposição de faixas. No entanto, a identificação desses pontos não é fácil de ser feita, devido ao uso de pontos distinguíveis, uma vez que os pontos LASER são distribuídos de forma irregular. No controle de qualidade relativo, nuvens de pontos LASER obtidas de diferentes faixas de voo são comparadas entre si, para analisar a coerência e precisão dos dados (SHAN E TOTH, 2008).

O controle de qualidade absoluto pode ser empregado tanto em projetos com várias faixas, como faixas individuais. A comparação de nuvens de pontos é feita a partir da coleta independente de dados de referência, e portanto, os pontos LASER podem ser comparados a pontos adquiridos por meio de técnicas convencionais de Topografia e Geodésia. Ressalta-se ainda, que devem ser desenvolvidos alvos específicos para os levantamentos com LASER e obtidas suas coordenadas pelas técnicas descritas anteriormente (SHAN E TOTH, 2008)..

Como é relatado em Shan e Toth (2008), o controle de qualidade externo envolve ainda a análise de pontos de verificação, que são alvos projetados especificamente para LASER. As figuras 8.a e 8.b apresentam modelos de alvo que podem ser utilizados para controle.

Figura 8 - Alvos para controle externo de nuvem de pontos LASER: (a) modelo de alvo circular, (b) modelo de alvo plano sobre tripé.



Fonte: Adaptado de Csanyi e Toth, 2007; Shan e Toth, 2008; Torres, 2016.

Quando não é possível a análise de qualidade utilizando faixas sobrepostas, outras formas de estabelecer o controle de qualidade podem ser empregadas. Para Toth (2002), a comparação de superfícies pode ser aplicada por meio da interpolação de um *grid* regular, que permitirá a correspondência das áreas selecionadas ou objetos antrópicos, determinando as discrepâncias entre ambas as superfícies.

O uso de pontos, retas ou planos também pode ser empregado para avaliar de forma individual, feições de faixas da nuvem de pontos. Por meio da interpolação de retas ou de planos, comparados a pontos de apoio obtidos em campo, pode ser realizado o controle de qualidade de uma faixa. Outra possibilidade é o cálculo do centroide, que permite estimar a partir de um conjunto de pontos, as coordenadas centrais de um alvo.

### 3 SISTEMA DE VARREDURA A LASER EMBARCADO EM VANT

Neste capítulo serão descritos o SVL e seus principais componentes (Seção 3.1), além de ferramentas desenvolvidas por Torres (2016) para a geração de nuvem de pontos (Seção 3.2).

#### 3.1 O Sistema de Varredura a LASER - SVL

Devido ao crescente uso da tecnologia a LASER para mapeamentos florestais, considerando sua acurácia altimétrica e o aumento no emprego de plataformas VANT em diferentes aplicações, foi desenvolvido o SVL de baixo peso embarcado em VANT. Este sistema, financiado pela FAPESP, foi montado por meio da parceria entre a Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Presidente Prudente e a empresa Sensormap.

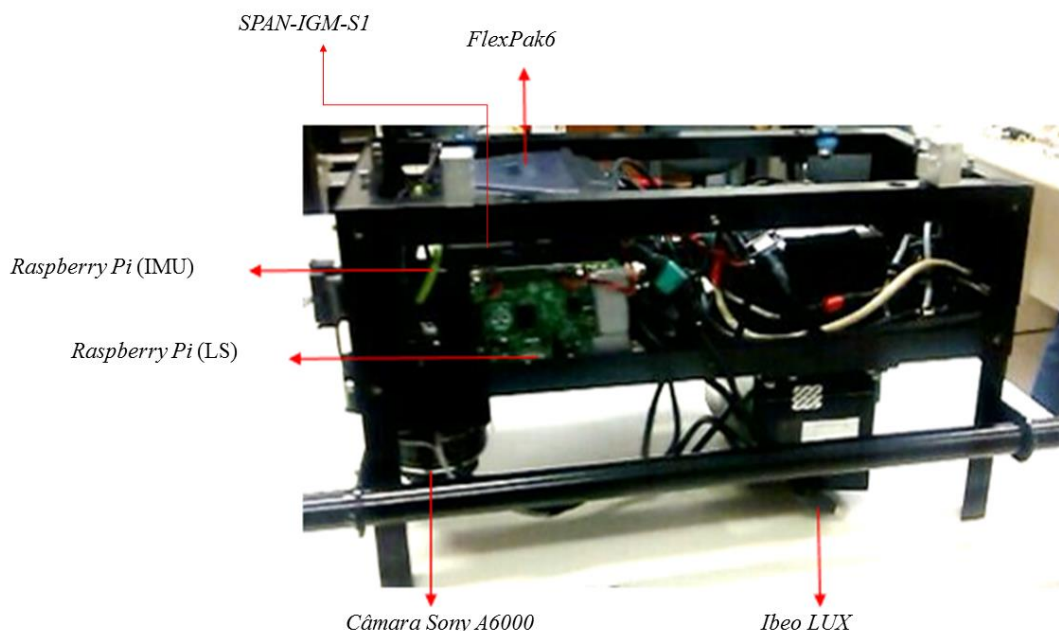
Os principais componentes utilizados para o desenvolvimento do sistema foram uma unidade de varredura a LASER *Ibeo LUX 2010*, uma unidade SPAN-IGM-S1 e um receptor *FlexPak6* da NovAtel com função de segundo receptor GNSS; dois microcomputadores *Raspberry Pi* para integração e armazenamento de dados; e um VANT octocóptero, como plataforma para transporte do sistema de aquisição de dados.

Para que ser operacional, a montagem deste sistema incluiu a integração dos sensores e sincronização dos dados, montagem da estrutura física (*payload*) e da plataforma aérea na qual foi embarcado o sistema. A integração do sistema foi elaborada a partir de três dispositivos principais: LASER, GNSS e IMU (os dois últimos compondo o Sistema de Navegação Inercial – INS). Para obter melhores resultados, foi adicionado ao sistema o acessório *Flexpak6*, integrado ao GNSS, e um receptor GNSS de navegação, com o objetivo de fornecer as mensagens *NMEA/PPS* para o LASER, pois ao introduzir o *FlexPak6* não foi mais possível usar as mensagens e o sinal do GNSS devido à limitações no número de portas. Também foi adicionado um segundo microcomputador *Raspberry Pi*, possibilitando a gravação separada dos dados da unidade LASER e INS.

Os componentes do sistema foram integrados dentro de um *container* metálico, utilizado para proteção e transporte do *payload*, que vai acoplado ao VANT. Na Figura 9 verifica-se alguns dos principais componentes do *payload* no *container*. Na parte inferior da estrutura, estão inseridos componentes como a unidade LASER *Ibeo LUX* e a câmara *Sony A6000*, utilizada como referência para verificação da trajetória de voo. Na parte interior,

estão o INS, o *FlexPak6*, *Raspberry Pi*, cabos para conexão, bateria, entre outros componentes necessários ao funcionamento do sistema.

Figura 9 – Estrutura física - *Payload* do SVL.



O *Raspberry Pi* conectado à SPAN-IGM-S1 recebeu os dados brutos do sistema inercial (GNSS/IMU) e o microcomputador conectado ao LASER, os dados brutos da varredura a LASER em formato *.idc*. Além disso, foi inserida uma comunicação entre o LASER e o sistema inercial, de modo que o sistema LASER enviasse um pulso TTL a cada segundo para marcação de um evento nos dados GNSS. Os instantes destes eventos foram comparados com os registrados pela unidade LASER para verificar eventuais erros ou deriva no relógio do LASER. Com esta integração entre os sensores, era esperado que o tempo do LASER fosse sincronizado com o tempo GPS, o que não ocorreu por falhas na comunicação entre os componentes do sistema.

No que se refere a plataforma utilizada para embarcar o *payload*, foi utilizado um octóptero, VANT SX8, de asa rotativa, que tem como principais características: estabilidade durante a execução de voo e capacidade de carga superior aos VANTs de asa fixa. Na Figura 10 é apresentado o sistema embarcado na plataforma VANT.

Figura 10 - SVL embarcado em plataforma VANT.



### 3.1.1 Componentes do SVL – *Hardware*

Para compreender melhor o funcionamento do sistema, nesta Seção serão descritos os principais componentes do SVL e suas características.

#### 3.1.1.1 Unidade de varredura a LASER – Ibeo LUX 2010

A unidade de varredura a LASER *Ibeo LUX 2010*, da *Ibeo Automotive*, é geralmente utilizada para navegação terrestre autônoma, com o objetivo de detectar e identificar objetos próximos ao veículo ou no entorno do sensor, dentro de um campo de visão definido por uma determinada abertura angular, utilizando a tecnologia de medição LIDAR. A Figura 11 apresenta as dimensões da unidade LASER e sua localização quando acoplado a um veículo.

Figura 11 - Unidade LASER Ibeo LUX 2010.



Fonte: Baig et al. (2014).

Uma das principais características que levaram à escolha desta unidade de varredura foi o alcance de aproximadamente 200 m apresentado pelo fabricante, além do seu tamanho e peso, importantes para um sistema embarcado em plataforma VANT com carga útil de até 5 kg. Na Tabela 1 é apresentado um resumo das principais características da unidade LASER *Ibeo LUX* 2010.

Tabela 1 - Características físicas da unidade LASER *Ibeo LUX*.

|                                           |                 |
|-------------------------------------------|-----------------|
| Peso:                                     | < 1 kg          |
| Comprimento de onda:                      | 895 nm – 915 nm |
| Duração do pulso:                         | ~ 4,5 ns        |
| Resolução de distância:                   | 0,04 m          |
| Alcance de medida:                        | 0,3 m até 200 m |
| Alcance para alvos com 10% de reflexão:   | 50 m            |
| Divergência horizontal do feixe colimado: | 0,08 °          |
| Ecos por emissão e nível de medida:       | 3 ecos          |

Para a emissão e recepção de pulsos LASER, a unidade *Ibeo LUX* apresenta dois emissores e quatro receptores, resultando em quatro níveis de varredura. Com a rotação do espelho interno e o deslocamento da plataforma, é feita a varredura a LASER, que possibilita a aquisição de informações referentes à ângulos e distância, definindo a posição de um objeto, que pode ser em relação ao sensor ou ao sistema de coordenadas do veículo.

As informações fornecidas pelo *Ibeo LUX* podem ser classificadas em Dados de Varredura (para todas as frequências de varredura) ou Dados do Objeto (para frequências de varredura de 12,5 Hz). Os Dados de Varredura apresentam informações referentes aos ângulos horizontal e vertical, distância e largura do pulso, sendo fornecidos somente via *Ethernet*, devido ao nível de detalhamento de dados e consequentemente, da extensa quantidade de informações.

Os dados de Objetos, por sua vez, fornecem informações em um nível mais elevado. Propriedades como tamanho, posição, velocidade e tipo podem ser atribuídas ao conjunto de objetos, originando a informação. Os dados do objeto podem ser enviados tanto pela interface *Ethernet* como pela interface *CAN*.

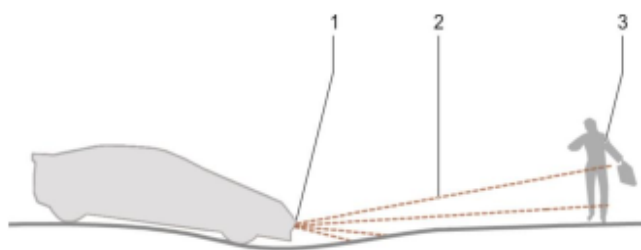
Basicamente, o *Ibeo LUX* funciona emitindo diversos pulsos LASER e recebendo o retorno dos sinais por meio de receptores de fotodiodo. Em seguida, processa os dados utilizando um cálculo interno e então emite as informações processadas, seja pela

interface *Ethernet* ou *CAN* (*Controller Area Network*). A rotação do espelho, sincronizada com a emissão do pulso LASER, gera um perfil completo dentro da faixa de alcance do *Ibeo LUX*.

As propriedades de medição do *Ibeo LUX* se baseiam em: medida de tempo de retorno, tecnologia multicamada, capacidade multialvo, faixa de alcance e relação ângulo – distância e, resolução angular e frequência de varredura. Na medida de tempo de retorno, os pulsos LASER emitidos pelo *Ibeo LUX* são refletidos pelos objetos e reunidos pelo instrumento LASER, que processa a informação e envia os dados via *Ethernet* ou *CAN*, calculando a distância considerando o tempo de retorno do pulso LASER e a velocidade da luz. Como o espelho rotativo redireciona os pulsos LASER, a posição angular do espelho no momento da deflexão define a direção do objeto detectado.

Na tecnologia multicamada, quando o LASER está fixado em um veículo de forma horizontal ou levemente inclinado, o ângulo de arfagem (*pitch*) pode ser compensado por meio de cálculo a partir dos quatro níveis de varredura, apresentando diferentes ângulos verticais, possibilitando ao *Ibeo LUX* uma melhor detecção do objeto, mesmo com adversidades como travamento ou aceleração do veículo. A Figura 12 apresenta os princípios da tecnologia multicamada, na qual são mostrados o instrumento LASER (1), os níveis de varredura (2) e o objeto (3).

Figura 12 - Princípios da tecnologia multicamada.

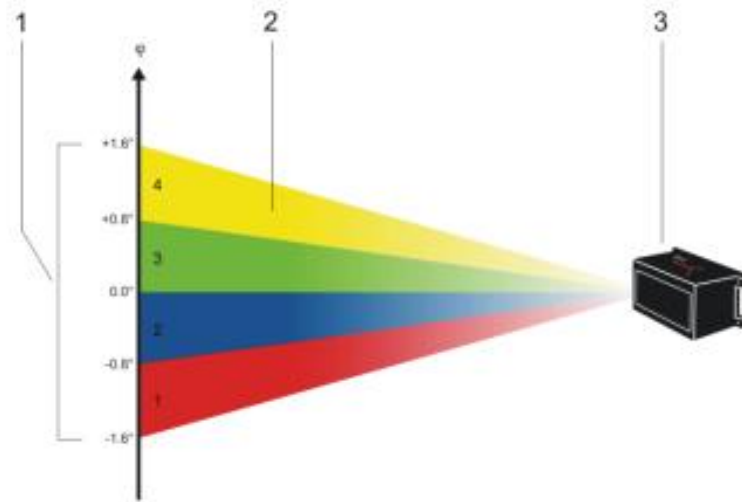


Fonte: Adaptado de *Ibeo Automotive* (2010).

Para realizar a varredura, existem quatro receptores de fotodiodo independentes no *Ibeo LUX*, e dispostos em uma linha. Cada um desses receptores se refere a um nível, possibilitando a tecnologia multicamada, com quatro receptores e consequentemente, quatro níveis. O ângulo de abertura vertical é dividido em quatro níveis de varredura, que realizam a varredura de forma entrelaçada. Primeiro, dois emissores (níveis), realizam uma varredura simultaneamente (por exemplo, vermelho e azul), e após, os outros dois níveis (verde e amarelo). Isto ocorre por que o espelho possui duas faces reflexivas que possuem um pequeno

ângulo que deflete os raios de maneira apropriada. Na Figura 13 são apresentados o ângulo de abertura vertical (1), o nível de varredura (2) e o instrumento LASER (3).

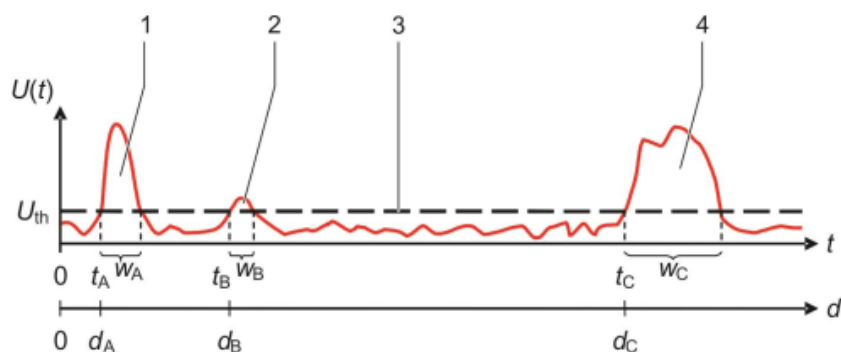
Figura 13 - Diferentes níveis da varredura a LASER do IbeoLUX.



Fonte: Adaptado de *Ibeo Automotive* (2010).

Como o *Ibeo LUX* consegue processar múltiplos alvos, isso possibilita a coleta e avaliação de até três retornos por pulso emitido. Quando o pulso que retorna atinge o receptor de fotodiodo, essa intensidade do sinal é transformada em tensão. Na Figura 14, são apresentados três retornos gerados a partir de um mesmo pulso emitido, tais como o retorno de uma vidraça (1), que produz uma tensão muito alta em curto tempo, o retorno de uma gota de chuva (2), que produz uma tensão muito baixa em curto tempo, o retorno de um objeto (4), que produz alta tensão em um período longo de tempo e o limiar de tensão (3). Desta forma, para cada nível de varredura, são reunidos até três retornos de um pulso emitido.

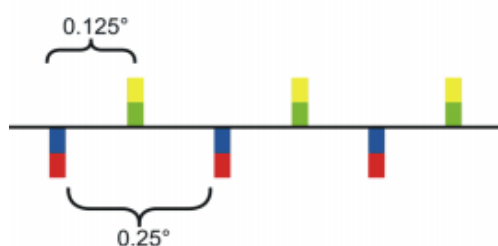
Figura 14 - Múltiplos retornos a partir de um único pulso.



Fonte: Adaptado de *Ibeo Automotive* (2010).

Com relação à resolução angular e frequência de varredura, o instrumento LASER pode ser operado em três diferentes frequências (12,5 Hz, 25 Hz e 50 Hz), possibilitando a configuração da resolução angular de diferentes formas. Ao utilizar dois níveis de varredura, medidos de forma simultânea, e for especificado um ângulo com resolução de  $0,125^\circ$  para determinado alcance, este mesmo valor de ângulo será o espaçamento entre os pares de níveis de varredura. Na próxima medição, o ângulo será duas vezes maior para o mesmo nível ( $0,25^\circ$ ), conforme exemplificado na Figura 15.

Figura 15 - Exemplo de resolução angular a uma frequência de 12,5 Hz.



Fonte: Adaptado de *Ibeo Automotive* (2010).

### 3.1.1.2 GNSS/IMU – SPAN–IGM–S1

O sistema de georreferenciamento direto, ou sistema inercial (INS), é composto pelos sistemas de posicionamento e orientação, conhecidos como GNSS e IMU, respectivamente, além de um computador de navegação, responsável pela sincronização interna, gravação de dados brutos e cálculo em tempo real da posição e atitude (MOSTAFA e SCHWARZ, 2001; POREBA, 2011). A utilização dos dois sistemas combinados se traduz em uma solução mais acurada, e caso haja uma falha com o GNSS por motivos adversos, os dados da IMU (acelerações lineares e velocidades angulares) possibilitam a continuidade da trajetória e aquisição de dados.

A solução GNSS/IMU adquirida foi a SPAN–IGM–S1 da NovAtel (Figura 16), composta por uma IMU (com três acelerômetros e três giroscópio) integrada a receptor GNSS de dupla frequência OEM615, de acurácia centimétrica, com taxa de medição do receptor GNSS de 20 Hz e taxa de medição de dados inerciais de 125 Hz, computador interno e o *software*. Em relação à antena GNSS para o receptor OEM615, foi utilizada a antena da fabricante *Tallysman*. Para a aquisição dos dados, o *software* NovAtel *Connect* possibilita a coleta de dados em tempo real, além da configuração do receptor. Todos os equipamentos foram adquiridos com base na capacidade de carga do VANT.

Figura 16 - IMU– SPAN–IGM–S1



Fonte: NovAtel (2014).

Na Tabela 2, são apresentadas as especificações técnicas da unidade GNSS/IMU, contendo as especificações físicas, performance do GNSS e performance da IMU.

Tabela 2 - Especificações técnicas da SPAN–IGM–S1.

|                               |                    |       |       |       |
|-------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|
| Tamanho do compartimento (mm) | 152 x 141,5 x 50,5 |       |       |       |
| Peso (g)                      | 540                |       |       |       |
| Taxa de dados                 |                    |       |       |       |
| Medição GNSS (Hz)             | 20                 |       |       |       |
| Medição IMU (Hz)              | 125                |       |       |       |
| Solução INS (Hz)              | Até 125            |       |       |       |
| Precisão do tempo (ns)        | 20                 |       |       |       |
| Acurácia da SPAN–IGM–S1       |                    |       |       |       |
| Duração da interrupção (seg)  | 0                  | 10    | 60    |       |
| Acurácia em Posição (m)       | Horizontal         | 0,01  | 0,02  | 0,023 |
|                               | Vertical           | 0,02  | 0,02  | 0,03  |
| Acurácia em Velocidade (m/s)  | Horizontal         | 0,02  | 0,02  | 0,03  |
|                               | Vertical           | 0,01  | 0,01  | 0,02  |
| Acurácia em Atitude (graus)   | Roll               | 0,015 | 0,015 | 0,017 |
|                               | Pitch              | 0,015 | 0,015 | 0,017 |
|                               | Yaw                | 0,08  | 0,08  | 0,081 |

Fonte: NovAtel (2014).

### 3.1.1.3 Receptor FlexPak6

O receptor *Flexpak6* da NovAtel é integrado à SPAN-IGM-S1 (Figura 17), com o propósito de obter melhores resultados na solução do azimute (*heading*). Com a adição

do receptor, uma nova antena GNSS é integrada e o INS passa a ser operado com duas antenas GNSS durante o levantamento. Em relação às antenas GNSS, as duas são da fabricante *Tallysman* : uma conectada ao receptor GNSS principal, e outra ao Flexpak6, por serem mais leves que as antenas convencionais

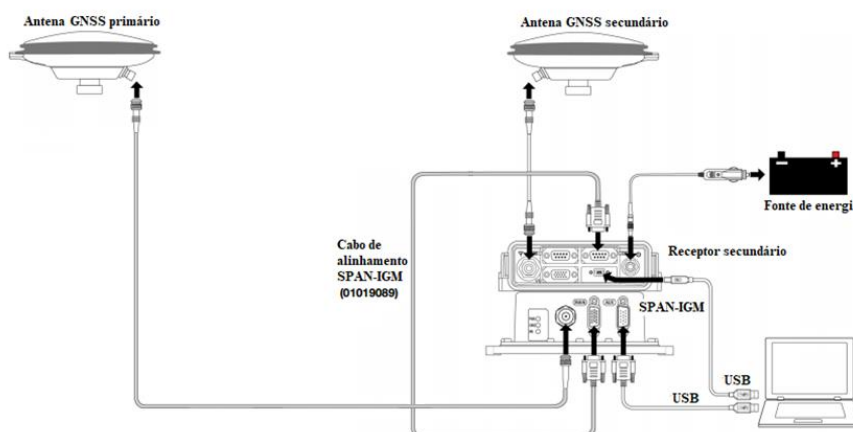
Figura 17 - Acessório Flexpak6.



Fonte: NovAtel (2013).

Na Figura 18 é apresentado um diagrama para exemplificar a conexão estabelecida entre o receptor *FlexPak6* e a SPAN-IGM-S1, originando o funcionamento de duas antenas GNSS, espaçadas por uma haste de 1 m.

Figura 18 – Exemplo de instalação de duas antenas GNSS, utilizando receptor FlexPak6.



Fonte: Adaptado da NovAtel (2014).

#### 3.1.1.4 Raspberry Pi

O *Raspberry Pi* é definido como um microcomputador, que apresenta pequenas dimensões e baixo custo. Ele tem dentre seus componentes, um processador, porta para cartão de memória, porta *USB* (*Universal Serial Bus* – Porta Serial Universal), porta *HDMI*

(*Hight-Definition Multimedia Interface* – Interface Multimídia de Alta Definição), memória RAM (*Randon Acess Memory* – Memória de Acesso Aleatório), processador gráfico, entrada de energia e barramentos de expansão. Por não apresentar disco rígido próprio, é necessário o sistema operacional *Linux* no cartão de memória (RASPBERRY PI, 2016). Na Figura 19 é apresentado um exemplo do modelo *Raspberry Pi*, utilizado neste projeto.

Figura 19 – Exemplo do microcomputador *Raspberry Pi*.



Fonte: Raspberry Pi (2016).

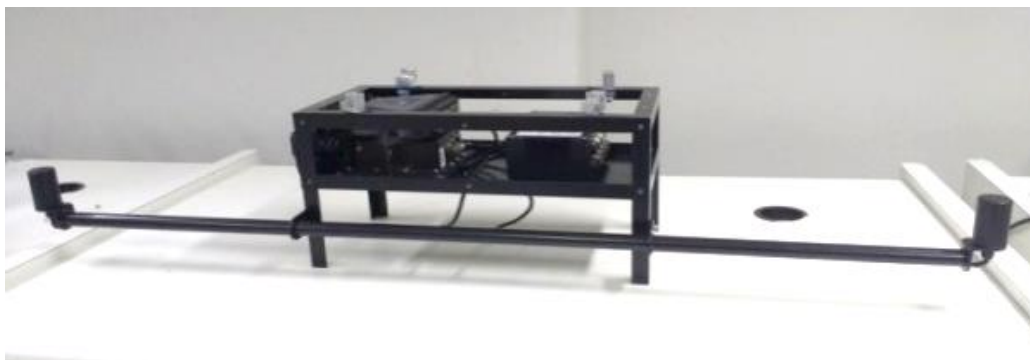
Para realizar a gravação separadamente de dados do *Ibeo LUX* e da unidade GNSS/IMU foram utilizados dois microcomputadores *Raspberry Pi*, que se adequam a sistemas que não exigem demanda de grande de energia. O *Raspberry*, que grava os dados do LASER, possui com um *script* configurado pela fabricante *Autonomous Stuff*, representante da *Ibeo LUX*, que para este projeto, foi modificado pela empresa Sensormap, a fim de separar a gravação dos dados da unidade LASER dos dados GNSS/IMU. Assim, para cada *Raspberry Pi*, a coleta e gravação dos dados LASER e GNSS/IMU ocorre por meio de um *pendrive* conectado via porta USB.

#### 3.1.1.5 *Container* do Sistema de Varredura a LASER

Para embarcar o *payload* com todos os componentes do SVL, foi desenvolvido um container metálico. Na estrutura física, com dimensões de 40 cm x 19,5 cm x 20,5 cm, foram posicionados o LASER *Ibeo LUX*, os sistemas de posicionamento e orientação GNSS/IMU, o receptor *FlexPak6*, uma câmara *Sony A6000*, cabos para conexão de todo o sistema, bateria para alimentação, além de uma haste de alumínio (1m) acoplada na parte exterior do *payload*, na qual estão duas antenas GNSS em cada extremidade. A estrutura vai

acoplada à plataforma VANT, possibilitando a aquisição de dados de varredura a LASER e GNSS/IMU. Na Figura 20 está a estrutura desenvolvida. A fonte que alimenta o sistema é uma bateria de 5 volts.

Figura 20 – *Container com payload e antenas GNSS.*



#### 3.1.1.6 Plataforma de Aquisição – VANT SX8

A plataforma de aquisição de dados utilizada é o octóptero SX8, com autonomia de voo de cerca de 30 minutos, carga útil de até 5 kg e peso máximo de 25 kg. A escolha desta plataforma foi feita devido ao menor custo operacional em relação à plataformas aéreas tripuladas, à flexibilidade para o planejamento de missão e à rapidez para aquisição de dados. O modelo utilizado é ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Plataforma VANT – Modelo SX8.



Fonte: Adaptado de Sensormap, 2018.

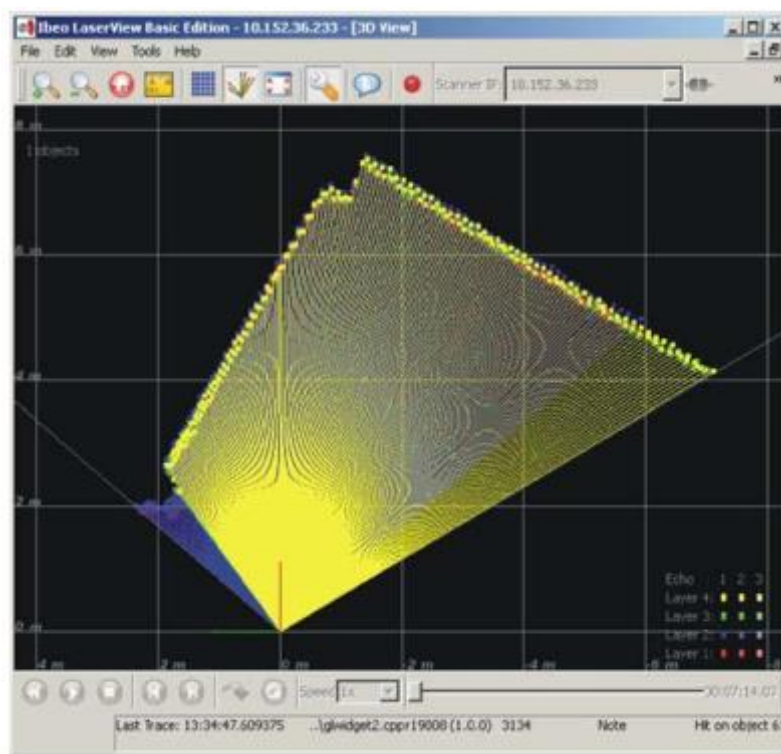
### 3.1.2 Componentes do SVL – *Software*

Para obter a nuvem de pontos LASER foram utilizados *softwares* como o *Ibeo LASER View*, que possibilita a visualização dos dados de varredura LASER em tempo real e a configuração da unidade LASER, bem como o *Inertial Explorer 8.6* e *GNSS Data Converter* (NovAtel), para dados inerciais e dados GNSS brutos.

#### 3.1.2.1 Ibeo LASER View

O *Ibeo LASER View* é um *software* adquirido junto à unidade LASER *Ibeo LUX*, no qual a interface gráfica permite a visualização em tempo real dos dados coletados pelo *Ibeo LUX*. A interface possui três estados operacionais: modo de espera, modo de operação e modo de reprodução. A Figura 22, apresenta o modo de exibição da interface *Ibeo LASER View*.

Figura 22 - Interface gráfica do software *Ibeo LASER View*.



Fonte: *Ibeo Automotive* (2010).

Além da visualização dos dados em tempo real, informações como largura do pulso, quantidade de retornos por pulso, dados de objeto, abertura angular de varredura ( $\theta$ ), bem como frequência de varredura, podem ser configuradas pelo *software* (*Ibeo Automotive*, 2010).

O formato do arquivo fornecido pelo *Ibeo LASER View* é binário, de extensão *.idc*. No entanto, não é disponibilizado o acesso às informações do arquivo, e por isso o software é utilizado apenas para visualização do levantamento de dados realizado em campo.

### 3.1.2.2 Inertial Explorer 8.6

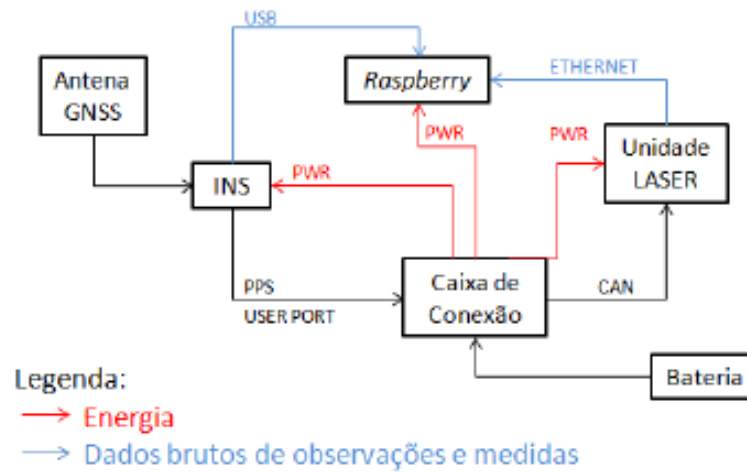
O software *Inertial Explorer* da NovAtel é utilizado para processar os dados do sistema GNSS/IMU. De acordo com Torres (2016), primeiramente é necessário utilizar o aplicativo *GNSS Data Converter* da NovAtel para processar as informações brutas, obtidas no levantamento de dados. Essas informações estão contidas no arquivo de extensão *.gps*, referente às observações de levantamento, que após utilizar o aplicativo, se transformam em três novos arquivos, de extensão *.imr*, para dados inerciais, extensão *.gpb*, para dados brutos de posicionamento (GNSS), e um com extensão *.epp*, com as efemérides.

Com os dados convertidos, inicia-se o processamento no *Inertial Explorer 8.6*, que permite o processamento dos dados GNSS da trajetória percorrida pelo sistema, ou dos dados GNSS/IMU do levantamento. Após este processamento, um documento *.txt* é gerado com as informações solicitadas pelo usuário, que variam desde o intervalo de tempo das observações GNSS até o sistema referencial de projeção.

## 3.2 Ferramentas desenvolvidas para o SVL

A aplicabilidade do SVL embarcado em VANT para o estudo de florestas foi testada inicialmente por Torres (2016), que utilizou uma configuração similar ao sistema atual, porém sem o acessório Flexpak6 e com apenas um *Raspberry Pi* para armazenamento dos dados. A Figura 23 apresenta o diagrama elaborado por Torres (2016), para exemplificar a integração e sincronização entre os componentes do SVL.

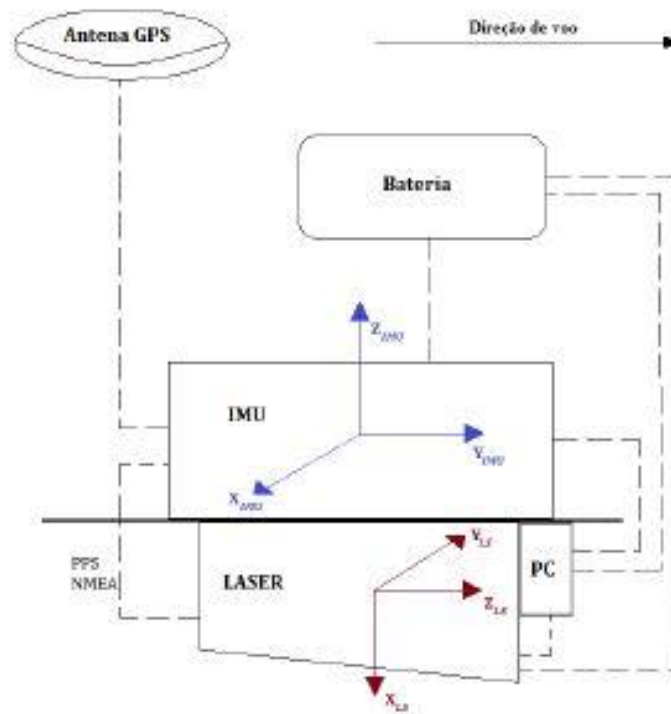
Figura 23 - Diagrama de conexões entre os componentes do SVL.



Fonte: Torres (2016).

Na Figura 24 é ilustrado o esquema de montagem do SVL na plataforma VANT, que apresenta a distribuição dos dispositivos LASER, GNSS/IMU, *Raspberry Pi* e disposição dos sistemas de coordenadas.

Figura 24 - Esquema elaborado para montagem do sistema em plataforma VANT.



Fonte: Torres (2016).

Além dos programas apresentados anteriormente, Torres (2016) cita a necessidade de modificações em códigos enviados com os componentes do SVL, bem como a elaboração de *scripts* complementares à geração de nuvem de pontos. Desta forma, novas ferramentas foram desenvolvidas para auxiliar no projeto de pesquisa.

Script python para conversão do arquivo .idc em .csv - relacionado à gravação de dados da unidade LASER e alocado no *Raspberry Pi*, o *script python* original tinha o objetivo de obter e converter o arquivo binário .idc, proveniente da unidade LASER, em arquivo de formato .csv. No entanto, este arquivo não continha as informações necessárias à pesquisa, e por isso o *script* foi adaptado uma primeira vez, para salvar no *Raspberry Pi* apenas o formato binário .idc. Posteriormente, uma segunda modificação no *script* foi feita, a fim de converter o formato .idc em formato .csv, decodificando somente informações necessárias à pesquisa, em um computador à parte (TORRES, 2016).

Programa para manipulação e verificação da sincronização de dados - como o tempo inicial e final de cada varredura do espelho era fornecido pelo LASER, caracterizando um pacote de dados, Torres (2016) desenvolveu primeiramente um código em linguagem C para manipulação e verificação da sincronização dos dados, convertendo o parâmetro *NTP Timestamp* em data e hora no formato dia (dd), mês (mm), ano (aaaa), hora (hh), minuto (mm), segundo (ss) e fração de segundo (fff.ffff) por: “dd:mm:aaaa:hh:mm:ss:fff.ffff”. Como o tempo UNIX é a referência utilizada em sistemas operacionais como *Windows* ou *Linux*, foi necessário converter o parâmetro NTP para UNIX. Além disto, como o sistema inercial fornece informações no sistema de tempo GPS, os dados LASER devem estar no mesmo sistema de tempo para geração da nuvem de pontos. Assim, a solução implementada possibilitou a conversão do tempo dos pacotes de dados, referentes à hora legal local, para tempo GPS.

Script para informações de temperatura e script para comunicação entre componentes do sistema - foi implementado no *Raspberry Pi* um *script* para obter informações de falhas correspondentes à temperatura, bem como um *script* para a comunicação entre o sistema GNSS/IMU, gravação de dados brutos e atualização de data e hora do *Raspberry Pi*, desenvolvido pela empresa Sensormap. De acordo com Torres (2016), também foi implementada uma solução para armazenamento de dados de posicionamento e orientação na memória de massa do *Raspberry Pi*, a fim de evitar conflitos e possíveis perdas de dados em relação à entrada e saída de informações, bem como um *script* para reinicialização do *script* responsável pela comunicação do sistema inercial. A implementação dos *scripts* descritos anteriormente foi terceirizada, segundo Torres (2016).

Programa para ordenação de pacote de dados e cálculo do tempo de cada medida LIDAR - além dos *scripts* desenvolvidos para o funcionamento do SVL, Torres (2016) desenvolveu um *script* em linguagem C++ para ordenar pacotes de dados e calcular o tempo de cada medida LIDAR feita em cada pacote de dados, a partir do tempo inicial e final do pacote de dados, correspondentes aos instantes de primeiro e último pulsos, sendo posteriormente, o arquivo ordenado cronologicamente. Neste *script*, para poder interpolar o tempo, foi utilizado o modelo linear, considerando a abertura total de varredura do sistema e o tempo inicial e final de cada pacote. Por meio do ângulo vertical e horizontal e do nível de varredura ao qual a medida de distância era correspondente, foi feita a interpolação de tempo.

Programa para geração de nuvem de pontos - para a geração da nuvem de pontos, Torres (2016) implementou um programa em linguagem C++ para fazer a leitura dos arquivos de dados GNSS/IMU e dados LASER em formato *.txt*. São atribuídas informações de tempo, atitude (*omega*, *phi* e *kappa*), de posições (XYZ) e respectivas precisões, referentes aos arquivos de dados inerciais, e de ângulos, distância e tempo, aos arquivos de dados LASER. No processamento, as informações foram cruzadas e identificados os instantes de medida dos dados inerciais antes e após o instante de medida LASER, além da interpolação dos dados de atitude e posição para o instante da observação LASER. Para gerar o arquivo com a nuvem de pontos foi aplicado o modelo matemático, descrito na Seção 2.2.5.

Torres (2016) relata ainda que o sistema de coordenadas utilizado no projeto é dextrogiro, porém com o eixo X apontando para a direção de emissão do pulso LASER. A unidade LASER empregada neste projeto de pesquisa foi desenvolvida para navegação terrestre e desta forma, sua medida de distância foi configurada diferente da orientação empregada na Figura 7. Assim, tanto em plataforma terrestre quanto embarcado em VANT, o sistema foi montado de forma que o eixo Z da unidade LASER fosse apontado para a direção de movimento da plataforma, o que afetou o último elemento da equação do LASER, sendo este designado como:

$$r_i^{DE} = \begin{pmatrix} \rho_i(t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

A nuvem de pontos é separada por faixa a partir da análise dos ângulos *kappa*, que definem a direção de voo. Com a análise de direção é verificado o tempo no qual a mudança

foi realizada. Esse tempo é anotado e posteriormente introduzido no código para cada faixa de voo.

Script em Scilab para cálculo dos ângulos de boresight - para a determinação dos ângulos de *boresight*, que são valores angulares que representam a diferença de orientação entre os eixos do sistema LASER e do sistema da IMU, foi desenvolvido um *script em ambiente Scilab* que calcula os valores dos ângulos e respectivos desvios padrão (TORRES,2016).

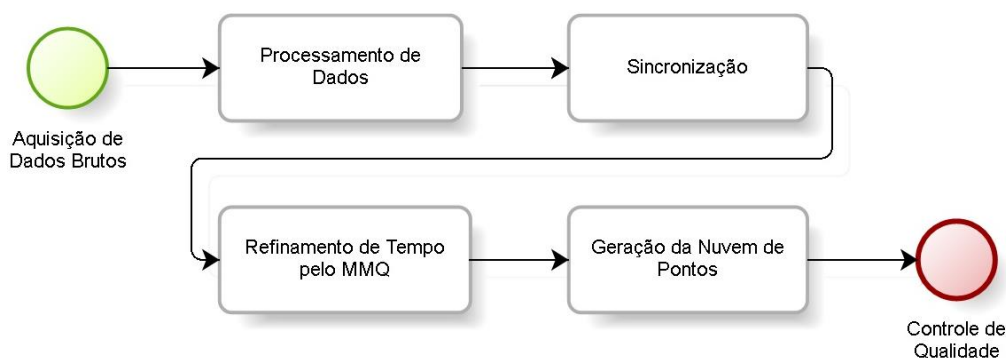
## 4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo serão descritos os processos de aquisição e processamentos de dados, o desenvolvimento da técnica aplicada para geração de nuvem de pontos, além das possíveis formas de analisar a qualidade dos dados obtidos.

### 4.1 Sincronização do SVL pela comparação dos sinais gerados pela trajetória vertical e pela distância vertical

Para o desenvolvimento da técnica de sincronização pela comparação de sinais gerados por dispositivos desacoplados do SVL, denominada sincronização por pós-processamento, foi elaborado um diagrama geral a fim de auxiliar a compreensão das etapas executadas ao longo da pesquisa, conforme ilustra a Figura 25.

Figura 25 – Diagrama geral.

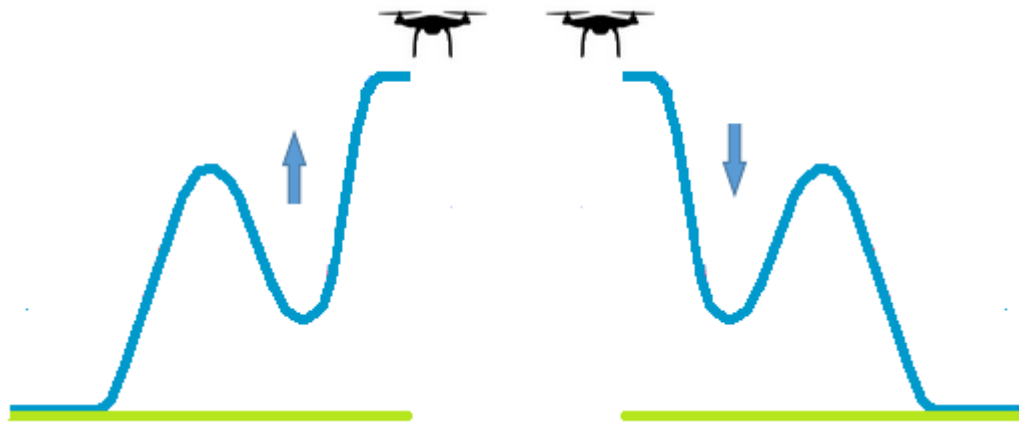


#### 4.1.1 Aquisição de Dados Brutos - Manobras de Voo

Para verificar a gravação de dados foram realizados experimentos em laboratório e voos no campus da UNESP. Durante esses voos, foi verificado que a sincronização eletrônica elaborada para o sistema não estava ocorrendo devido à falhas na comunicação entre os componentes do sistema, e desta forma, mensagens *NMEA/PPS* não estavam sendo recebidas pela unidade LASER. No entanto, como os dados do sistema inercial e da unidade LASER foram coletados normalmente, uma nova técnica de sincronização foi proposta, prevendo situações em que os dispositivos não possam ser sincronizados eletronicamente.

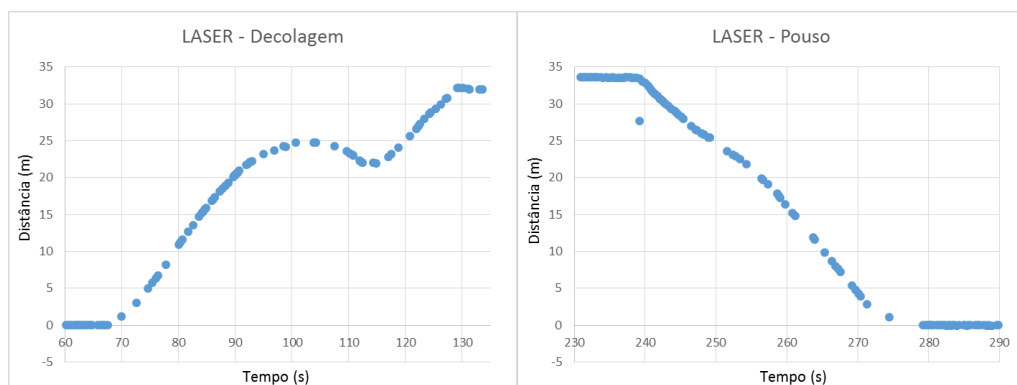
Esta técnica consiste inicialmente, na realização de manobras com o VANT, durante períodos de decolagem e pouso (início e término do voo), destinadas a criar dois sinais distinguíveis e comparáveis. Estes sinais, provenientes dos dispositivos LASER e da atitude fornecida pelo GNSS, são executados em formato similar a uma senóide, conforme exemplifica a Figura 26.

Figura 26 - Manobras para aquisição de dados dos dispositivos do SVL embarcados em VANT.



Tais manobras geram pontos de máximo e mínimo durante a decolagem e pouso do VANT, permitindo que os sinais obtidos dos dispositivos componentes do SVL sejam relacionados a partir da comparação entre os picos e sinais gerados. O procedimento adotado possibilita a sincronização dos dispositivos, por meio dos sinais gerados pela trajetória de voo (altitudes de voo) e das distâncias verticais medidas pelo LASER, sem a necessidade dos dispositivos estarem conectados entre si eletronicamente. Exemplos de sinais gerados são mostrados na Figura 27.

Figura 27 – Distâncias verticais medidas pelo LASER durante a decolagem e pouso do sistema, apresentando pontos de máximo e mínimo locais.



O propósito desta técnica é permitir que SVL transportados por aeronaves de baixa velocidade, como os VANTs com asa rotativa, possam coletar os dados sem sincronização em tempo real, trabalhando, portanto, de modo desacoplado, o que simplificaria a montagem e operação deste tipo de sistema.

#### 4.1.2 Processamento de dados de voo

Esta seção descreve os processamentos dos dados LASER e dados GNSS/IMU após a aquisição de dados brutos com as manobras do VANT, que serão a base para estabelecer a sincronização por comparação de sinais, descrita na Seção 4.1.3.

##### 4.1.2.1 Processamento de dados LASER

O processamento dos dados LASER foi feito com as seguintes etapas: transformação do formato binário *.idc* para o formato *.csv*, ordenação dos pacotes de dados e interpolação do tempo, correspondência do tempo LASER com o tempo GPS do receptor e ordenação do tempo.

Conversão formato *.idc* em *.csv* - como o arquivo *.idc* gerado pelo LASER era de difícil manipulação, foi reestruturado o *script* em *python*, para conversão deste formato de arquivo no formato *.csv*, o qual possibilitou o acesso às informações de cada pacote, como ângulo, distância, largura do pulso e tempo. No entanto, de acordo com Torres (2016), problemas com a perda de pacotes de dados foram detectados, bem como a não ordenação destes.

Desta forma, o *script* em *python* foi novamente modificado por uma profissional da computação, que desabilitou a função de eliminação de pacotes com erros, permitindo que outros pacotes fossem interpretados pelo código e uma quantidade maior de pontos fosse decodificada para o formato *.csv*, posteriormente transformado para o formato *.txt* para fins de interpretação e manuseio dos dados LASER.

Uma alternativa para checar se a quantidade de dados apresentada no arquivo *.csv* era coerente com a coletada no arquivo binário, foi rodar o arquivo *.idc* no *software Ibeo LASER View*, que possibilita sua leitura em tempo real e a análise visual da presença e comportamento dos níveis de varredura.

Ordenação de pacote de dado e Interpolação de tempo - em relação aos pacotes de dados, como eram fornecidos apenas o tempo de início e fim de cada pacote de dados, foi necessário interpolar o tempo para cada linha dos pacotes, em que cada pacote representava uma quantidade de pontos obtidos da varredura de cada um dos quatro níveis do sistema. Para isso, foi utilizado o programa desenvolvido por Torres (2016), que sofreu algumas modificações em relação às restrições originais, permitindo a ordenação dos pacotes e o cálculo do tempo para cada linha do pacote de dados LASER, a partir dos tempos (inicial e final) de cada pacote.

#### 4.1.2.2 Processamento de dados inerciais – GNSS/IMU

O processamento dos dados GNSS/ IMU, realizados no *Software Inertial Explorer 8.6*, necessita de arquivos de observações GNSS, da base de referência das proximidades do levantamento, assim como arquivo de dados das efemérides referentes ao dia da coleta de dados, que pode ser obtida pelo próprio *Inertial Explorer* ao realizar busca em fontes confiáveis da internet. Ressalta-se que a localização do levantamento influencia no método de posicionamento que será utilizado, podendo ser aplicado também PPP para o levantamento de pontos.

O arquivo de observações GNSS é obtido no formato *RINEX (Receiver Independent Exchange Format)*, e para isso, deve ser convertido no *software GNSS Data Converter*, originando os arquivos de formato *.gpb*, *.epf* e *.sta*. A configuração utilizada nos receptores GNSS é de 1 segundo e reamostrada para intervalo de 0,02 segundos no *software*.

Para o processamento são inseridos os arquivos do sistema inercial, os arquivos GNSS interpolados e os arquivos de efemérides. Utiliza-se a opção de processar GNSS/IMU simultaneamente (fortemente acoplado) e são inseridos os valores de *lever-arm* entre o LASER e a IMU. A configuração padrão do *software* foi utilizada, modificando o intervalo de processamento para 0,02 segundos. Um arquivo *.txt*, com variáveis que podem ser escolhidas pelo usuário, foi exportado com informações de tempo, posição e atitude, configurado com *datum* (WGS84) e sistema de projeção (UTM), zona 22 Sul.

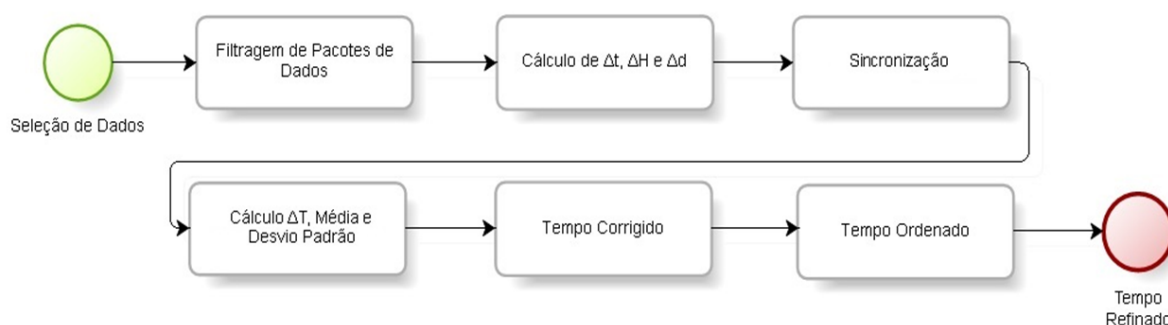
### 4.1.3 Sincronização por Pós-Processamento

A sincronização por pós-processamento realizada pela comparação dos sinais gerados pela unidade LASER (distância vertical x tempo) e pelo GNSS (altura x tempo), considerando a correspondência da trajetória vertical e da distância vertical de ambos os sinais. Ressalta-se, no entanto, que ainda haverá uma diferença referente à posição fornecida pelo GNSS, que é reduzida ao centro da IMU e não coincide com o centro do LASER.

Com base na comparação dos sinais, é possível calcular a diferença de tempo e realizar a correção do tempo da unidade LASER para o tempo GPS, o que permitirá a geração da nuvem de pontos. No fluxograma (Figura 28), são relatadas as etapas do processo de sincronização, que consistem de:

- Seleção de dados LASER;
- Filtragem de pacotes de dados;
- Cálculo de diferenças de distância ( $\Delta d$ ), diferenças de altitude (ou altura de voo sobre o ponto de decolagem -  $\Delta H$ ) e diferenças de tempo ( $\Delta t$ );
- Sincronização por pós-processamento;
- Cálculo da diferença de tempo entre o LASER e o GNSS ( $\Delta T$ ), média e desvio padrão e;
- Tempo LASER corrigido da diferença de tempo ( $\Delta T$ ), adequando-se ao mesmo sistema de tempo do GNSS e o tempo refinado, obtido a partir de ajustamento pelo MMQ.

Figura 28 - Fluxograma das etapas necessárias ao desenvolvimento da técnica de sincronização por pós-processamento.



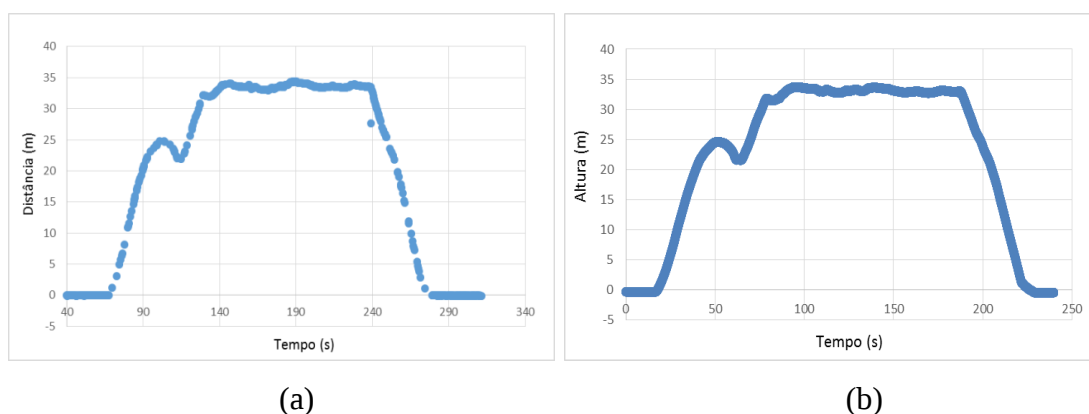
Para verificar a correspondência entre a trajetória vertical do GNSS e a distância vertical do LASER foram selecionados apenas os instantes em que foram feitas as manobras similares à senóide (entre a decolagem e o início da primeira faixa de voo e entre o

fim da última faixa e o pouso). Após a seleção de dados, foram extraídas as distâncias verticais e os tempos correspondentes do arquivo de dados LASER, além das altitudes e dos tempos do arquivo de dados GNSS, com ambas as unidades em metros e segundos, respectivamente.

Os dados LASER selecionados na etapa anterior foram filtrados de acordo com o ângulo horizontal nulo ( $0^\circ$ ) e menor ângulo vertical ( $0,00698132$  em radiano), deixando apenas um valor de cada pacote, que representa o menor valor de distância (m) entre o solo e o SVL. A partir dessa filtragem, para cada conjunto de dados, foi calculada a diferença de cada distância com a distância de referência, quando o LASER estava estático. O mesmo foi feito com altitude e tempo, possibilitando a geração de um conjunto de diferenças de distância ( $\Delta d$ ), diferenças de altitude ( $\Delta H$ , ou altura de voo sobre o ponto de decolagem) e diferença de tempo ( $\Delta t$ ).

Foram então gerados gráficos de sinal para a trajetória de dados LASER e para os dados GNSS, utilizando as diferenças de distâncias verticais medidas pela unidade LASER e alturas medidas pelo GNSS em função do tempo (diferença de tempo em relação a um instante  $t_0$ ), conforme Figura 29 (a) e (b). A partir dos gráficos elaborados foi possível encontrar os picos de máximo e mínimo de cada trajetória de voo e, por meio da análise das diferenças entre os tempos, sincronizar por correspondência visual ambos os sinais. Apenas os sinais de subida e descida foram utilizados para análise, como descrito anteriormente.

Figura 29 - Gráfico de sinais dos dados LASER (a) e dos dados GNSS (b).



Como as posições calculadas pelo GNSS estão associadas ao tempo GPS e o tempo LASER não está no mesmo sistema de tempo, foi proposta uma adequação do tempo LASER ao tempo GPS. A diferença entre os tempos (dos picos de máximo e mínimo de ambos os dados) foi encontrada a partir da análise dos sinais verticais. A diferença entre o tempo GPS e o tempo UTC resultou no cálculo da média de tempo e desvio padrão amostral.

Essa média de tempo foi utilizada para corrigir o tempo do LASER, transformando-o em tempo GPS corrigido. Após isso, foi feita a ordenação dos pontos medidos pelo LASER com o tempo corrigido, no sentido do menor para o maior valor de tempo.

Com a sincronização finalizada e os dados LASER no mesmo sistema de tempo do dispositivo GNSS, os testes para geração da nuvem LASER poderiam ser iniciados. Contudo, um refinamento do tempo GPS do LASER poderia possibilitar melhores resultados, conforme trata a Seção 4.1.4.

#### 4.1.4 Refinamento do tempo pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ)

Para obter o refinamento do tempo GPS do LASER foi proposto o ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), que possibilita encontrar uma solução única de tempo. Como base para montar o modelo matemático, foi utilizada a Equação 13, descrita em Kraus (1994), e adaptada para este caso de estudo, conforme Equação 14:

$$v + g2(\xi) = b \cdot g1(\xi + a) + c \quad (13)$$

$$v + g2(\xi) = g1(\xi + a) \quad (14)$$

em que,

$v$  – são os resíduos;

$b$  – parâmetro referente à contraste;

$c$  - parâmetro referente à brilho;

$g1, g2$  - expressa intensidade ou magnitude do sinal;

$\xi$  - é a posição desta amostra, ou a coordenada do pixel;

$a$  - é o deslocamento subpixel entre os sinais, neste caso a principal incógnita do problema.

Readaptando a equação 14 com as variáveis distância, altura e tempo, e desconsiderando os parâmetros  $b$  (contraste e escala) e  $c$  (brilho ou *offset* do sinal) é obtida a Equação 15, e após linearização, a Equação 16:

$$v + H_{LASER}(t) = H_{GPS}(t + \Delta t) \quad (15)$$

$$v + H_{LASER}(t) = H_{GPS}(t) + H'_{GPS} \cdot \Delta t \quad (16)$$

em que,

$H_{LASER}(t)$  - distância medida pelo LASER em função do tempo;

$H_{GPS}(t)$  - altura de voo dada pelo GNSS em função do tempo;

$H'_{GPS}(t)$  - primeira derivada da altura do GNSS em função do tempo

(gradiente).

$\Delta t$  - diferença de tempo.

A Equação 16 é reformulada, chegando-se à Equação 17, que será a equação de observação para a estimativa da diferença de tempo pelo MMQ (Equação 18), com  $Lb$  dado pela diferença entre distância do LASER e altura do GNSS (Equação 19):

$$(H_{LASER}(t) - H_{GPS}(t)) + v = H'_{GPS} \cdot \Delta t \quad (17)$$

Com,

$$Lb + v = A \cdot Xa \quad (18)$$

$$Lb = H_{laser} - H_{gps} \quad (19)$$

em que,

$Xa$  - parâmetros ajustados;

$A$  - matriz dos coeficientes, neste caso os gradientes;

$Lb$  - vetor das observações (diferença entre a altura de voo e a distância medida pelo LASER);

Logo,  $Xa = \Delta t$ , e a equação de observação tem as matrizes dispostas, conforme Equação 20. A solução do modelo linear (Equação 21) é adaptada para a Equação 22, na qual é obtida a incógnita referente a diferença de tempo. Como a variância das observações possui o mesmo peso, adota-se a matriz dos pesos igual a identidade, isto é,  $P = I$ . Partindo do pressuposto que o modelo foi linearizado, iterações deveriam ser necessárias no ajustamento, contudo, como a aproximação inicial é relativamente boa, esta solução pode ser obtida de forma direta.

$$\begin{bmatrix} \Delta H_{(1)} \\ \vdots \\ \Delta H_{(n)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{(1)} \\ \vdots \\ v_{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H'_{GPS(1)} \\ \vdots \\ H'_{GPS(n)} \end{bmatrix} \cdot \Delta t \quad (20)$$

$$Xa = (A^T P A)^{-1} (A^T P Lb) \quad (21)$$

Realizando os produtos entre os vetores da Equação 20, conforme Equação 21, tem-se:

$$\Delta t = [\sum_{i=1}^n (H'_{GPS(i)})^2]^{-1} [\sum_{i=1}^n (H'_{GPS(i)} \cdot \Delta H_{(i)})] \quad (22)$$

A diferença de tempo obtida pelo MMQ possibilitou o refinamento do tempo GPS do LASER, que já havia sido corrigido com uma diferença de tempo encontrada pelo método de sincronização por pós-processamento. Utilizado o programa *Matlab 2015* foi desenvolvido um *script*, no qual foram relacionados os tempos e distância/altura do LASER e GNSS e obtida essa diferença de tempo pelo MMQ.

O *script* foi desenvolvido em duas etapas: correspondência dos dados LASER com os dados GNSS e cálculo da diferença de tempo. Na primeira etapa, para cada par de tempo/distância medido com o LASER, era necessário encontrar o correspondente no arquivo GPS; encontrar o tempo GPS mais próximo (truncando no valor de 0,02 s); interpolar a altura GPS usando o vizinho mais próximo; calcular o delta H a partir da diferença da distância do LASER pela altura do GPS, e calcular o gradiente  $H'_{gps}$ . Na segunda etapa, a partir da relação estabelecida entre os dados e por meio da solução da equação da observação, obteve-se a diferença de tempo, adotando a matriz  $P = I$ , como mencionado anteriormente.

Outras análises estatísticas pertencentes ao ajustamento podem ser realizadas por meio do cálculo do valor de resíduos e da variância *à posteriori*, que permite calcular a MVC (Matriz Variância-Covariância), e obter as incertezas dos parâmetros estimados (GEMAEL et al, 2015). Para este trabalho, análises futuras por meio do cálculo do desvio padrão possibilitarão a estimativa da precisão da incógnita  $\Delta t$ .

Em função do tipo de correção aplicada aos dados, foram criados dois conjuntos de dados LASER, sendo um sem ajustamento (correção apenas com a diferença de tempo calculada com as observações manuais) e um com ajustamento (considerando a diferença de tempo obtida após o ajustamento pelo MMQ).

#### 4.1.5 Geração de Nuvem de Pontos

Conforme descrito nas seções anteriores, simultaneamente são obtidos e processados os arquivos de dados LASER e do INS. Com o arquivo LASER é feita a interpolação de tempo/ordenação de dados, e ao arquivo de dados INS é aplicada uma subtração

de 180° no ângulo  $kappa$ , devido à IMU estar invertida na plataforma de aquisição de dados durante a operação do sistema.

Após a montagem de cada arquivo de dados é iniciado o processo de geração da nuvem de pontos, por meio de adaptações feitas no programa em C++ desenvolvido por Torres (2016), que consiste do modelo matemático para geração de informações tridimensionais de cada ponto LASER obtido, a partir de um arquivo *.txt* contendo as informações de ângulo e distância gerados pela unidade LASER e um arquivo *.txt* do processamento de dados inerciais, contendo informações de posição e atitude da plataforma (Xgps, Ygps e Zgps,  $\omega$ ,  $\phi$  e  $kappa$ ).

A partir dos dados levantados, são geradas nuvens de pontos com ajustamento pelo MMQ e nuvem de pontos sem ajustamento. Alguns dos *softwares* utilizados para trabalhar com estas nuvens são *FugroViewer*, *Cloud Compare* e *LAStools*.

#### 4.1.6 Controle de Qualidade

Para a realização do controle de qualidade da nuvem de pontos do SVL foram utilizadas: nuvem de pontos originária de imagens ópticas coletadas pela câmara A6000, processadas no software *Photoscan*; uma nuvem de pontos de levantamento feito com SVLA sobre a área da UNESP, e pontos de apoio na área de estudo. O controle de qualidade utilizando pontos de apoio foi ainda dividido em duas etapas: controle de qualidade altimétrico e controle de qualidade planimétrico.

No controle de qualidade altimétrico foi dada ênfase às coordenadas altimétricas, obtendo-se as discrepâncias entre as altitudes dos pontos de controle e pontos na nuvem LASER. No controle de qualidade planimétrico foi proposto o cálculo das discrepâncias para as componentes E e N, utilizando o software *AutoCAD 2018* e cálculo de centróide. Para os dois controles foram calculados a média, o desvio padrão e Raiz do Erro Médio Quadrático (em inglês *Root Mean Square Error - RMSE*) dos pontos.

## 5 EXPERIMENTOS REALIZADOS E RESULTADOS OBTIDOS

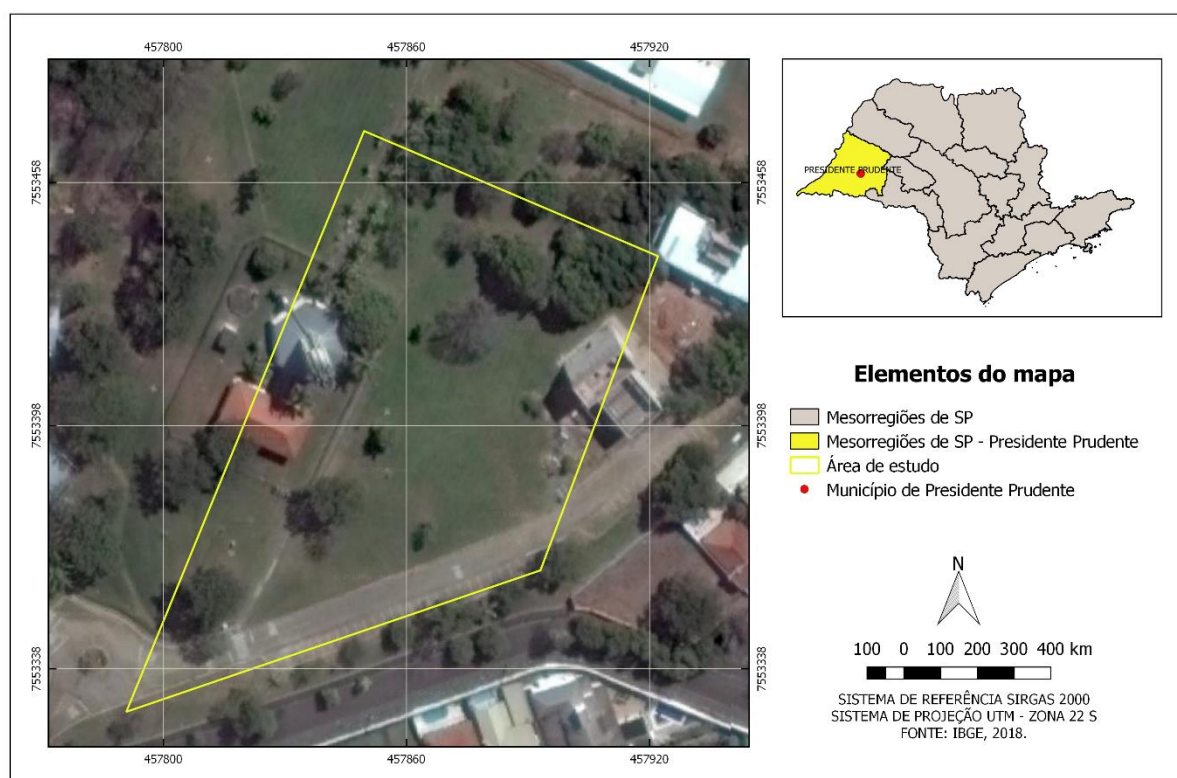
Neste capítulo serão descritos os experimentos realizados, considerando a aquisição, processamento, geração de nuvem de pontos, análise e interpretação dos dados, bem como a discussão acerca dos resultados alcançados.

### 5.1 Nuvem de Pontos – VOO “MUSEU”

#### 5.1.1 Área de Estudo

A área selecionada para realizar os voos com o SVL pertence à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), campus de Presidente Prudente, próxima ao Centro de Museologia, Antropologia e Arqueologia – CEMAARQ/MUSEU, conforme Figura 30. Para a escolha da área era requisito a presença de edificações e árvores, a fim de observar a capacidade de penetrabilidade e retorno dos pulsos LASER. Como a UNESP apresenta uma área com as características descritas, além de pontos de controle rastreados e levantamentos aéreos realizados, foram executados os voos com o SVL neste local.

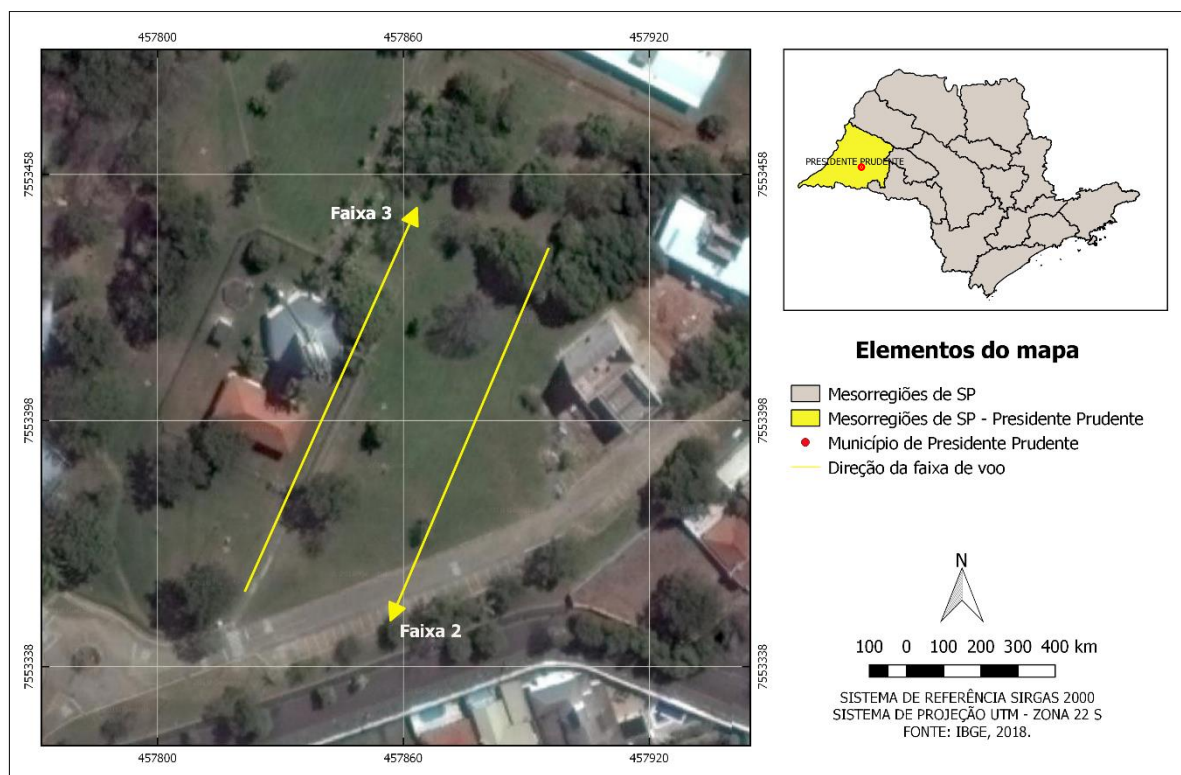
Figura 30 - Área de estudo – UNESP/Presidente Prudente.



Após a seleção da área, o planejamento de voo foi montado pelo piloto do VANT diretamente no *Mission Planner*, software responsável por programar missões de voo do VANT. A altura de voo estipulada foi de aproximadamente 35 metros, sobreposição lateral estimada entre 60% e 80%, à velocidade de 4m/s, resultando em quatro faixas de voo com a presença de edificações e árvores.

Na área de teste foram executados dois voos, sendo o primeiro interrompido devido à influência de vento, e o segundo, executado totalmente. Os dois conjuntos de dados coletados foram testados, mas apenas os resultados do voo 2 serão descritos a seguir. A Figura 31 exemplifica o plano de voo executado, no qual são apresentadas as direções das faixas 2 e 3, utilizadas para gerar posteriormente a nuvem de pontos.

Figura 31 - Faixas de voo obtidas com o SVL embarcado na plataforma VANT.

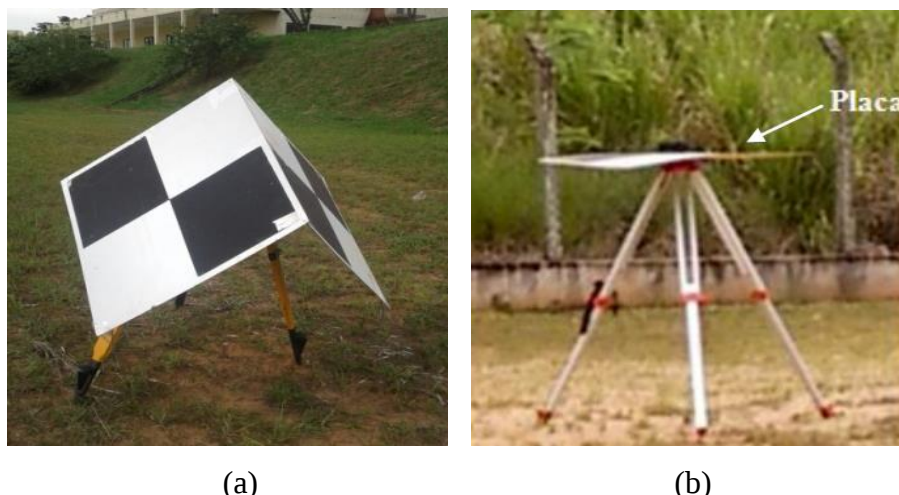


### 5.1.2 Aquisição de dados brutos e dados de apoio

Para a aquisição dos dados brutos primeiramente foi determinada a área e posteriormente foram inseridos alvos na região, a fim de que pudessem ser utilizados como pontos de apoio nas etapas seguintes de validação da nuvem de pontos. Os dois alvos apresentavam geometrias diferentes, sendo o primeiro alvo denominado 3D, com formato de

uma pirâmide de três lados, sendo cada lado materializado por uma placa quadriculada, em preto e branco (Figura 32) e o segundo alvo, composto por uma placa em posição horizontal, sobre um tripé. O alvo piramidal foi estruturado conforme o formato descrito, para que por meio de uma interpolação de pontos coletados em cada plano, fosse determinado o ponto mais preciso do topo e assim, pudesse ser utilizado no controle de qualidade.

Figura 32 - Alvos para controle do SVL: (a) piramidal e (b) plano sobre o tripé.



Fonte: O autor (2018) e Torres (2016).

Com o SVL embarcado na plataforma VANT e os alvos posicionados, foi executado o voo e obtidos os dados LASER e os dados de atitude e posição, gravados pelo sistema inercial SPAN-IGM S1. Os dados foram então descarregados em um *desktop* do Grupo de Pesquisa em Fotogrametria, sendo os dados LASER armazenados no arquivo binário *.idc* e os dados inerciais no arquivo *.gps*.

Para realizar o controle de qualidade da nuvem de pontos na área de interesse do voo SVL foi proposto o levantamento de pontos de controle, coletados inicialmente com receptores GNSS Hiper Ggd L1L2. No entanto, uma nova coleta de pontos de controle foi necessária para avaliar a nuvem, sendo realizada por irradiação com uma Estação Total robótica.

Em relação aos pontos de controle rastreados com GNSS, estes foram coletados logo após o levantamento aéreo com VANT, em uma tentativa de distribuição homogênea. Para a avaliação, foram rastreados 5 pontos, com duração de meia hora cada ponto, máscara de elevação de 10° e intervalo de coleta de 1 segundo. O processamento destes pontos foi realizado no *software* GrafNet, da NovAtel. No entanto, devido à dificuldade de encontrar

pontos fotoidentificáveis e que auxiliassem na geometria homogênea, foi proposta uma nova coleta de pontos, desta vez utilizando Estação Total.

A coleta de pontos com a Estação Total por meio de irradiação, foi proposta devido à dificuldade de obter pontos de controle próximos às árvores e edificações da área de estudo, influenciadas por fatores atmosféricos como multicaminho, interferência ionosférica, dentre outros. Como eram necessários pontos de controle das quinas das edificações, foi feito o levantamento utilizando a estação total *Topcon* série *Image Station* (IS), com as principais características para o levantamento topográfico, descritas no Quadro 2.

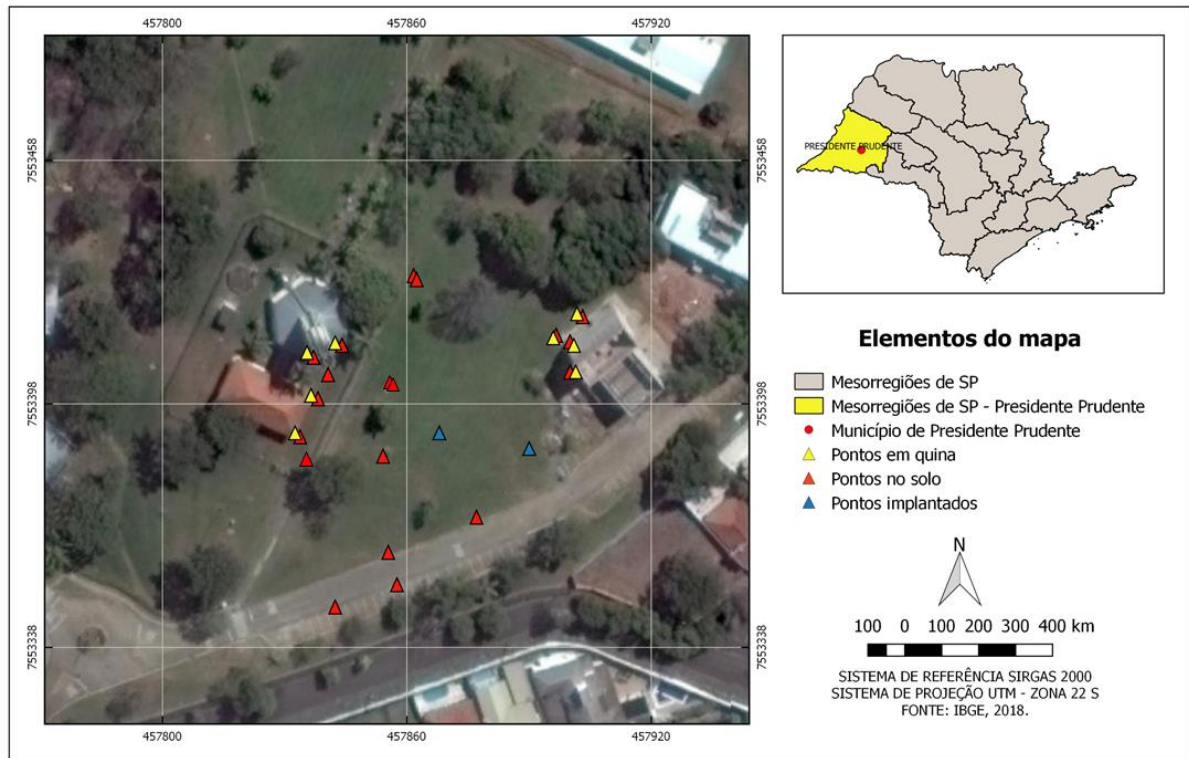
Quadro 2 – Especificações da estação total robótica *Topcon Image Station* (IS).

|                         |                  |                                              |
|-------------------------|------------------|----------------------------------------------|
| Distância máxima medida | Com prisma       | 3000 m                                       |
|                         | Sem prisma       | 250 mm                                       |
| Acurácia Linear         | Modo fino        | $\pm(2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \times D)$ |
| Acurácia (angular)      | Leitura absoluta | 3"                                           |

\*D representa a distância da linha de base, em km.

As coordenadas de referência para iniciar o levantamento foram obtidas do projeto CALIBRA/CIGALA, em pontos que estão localizados dentro da área de voo com o VANT. A partir destes pontos, foram levantados 21 pontos de controle, tanto em quinas do prédio, quinas de telhado, como no terreno gramado e asfalto, visando uma distribuição homogênea. Contabilizando os pontos obtidos com GNSS e os pontos de apoio da irradiação com estação total, foram obtidos 29 pontos de apoio (contabilizando também as estações). A Figura 33, apresenta a distribuição destes pontos. Na cor amarela são representados os pontos obtidos em quinas de edificações; na cor azul, os pontos implantados em campo, como os alvos 3D e planos, e na cor vermelha, os pontos coletados no solo.

Figura 33- Distribuição de pontos de apoio para controle de qualidade da nuvem de pontos LASER.



### 5.1.3 Processamento dos dados

#### 5.1.3.1 Processamento de dados inerciais – GNSS/IMU

O processamento dos dados GNSS/ IMU, realizados no *Software Inertial Explorer 8.6*, necessita de arquivos de observações GNSS, da base de referência das proximidades do levantamento, no caso, a estação PPTE, localizada na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), campus de Presidente Prudente, assim como arquivo de dados das efemérides referentes ao dia da coleta de dados. Como o arquivo de dados inerciais obtidos foi único para os dois voos realizados, o processamento foi realizado em conjunto. O Apêndice A apresenta um trecho do arquivo de dados inerciais processados.

Com o processamento dos dados GNSS/IMU foi possível verificar que a inserção do receptor *FlexPak6* e uma segunda antena não apresentaram melhora significativa do azimute (*heading*). Um exemplo do processamento realizado por Torres (2016) e o processamento recente (2017) é apresentado na Figura 34, na qual verifica-se que o erro em azimute foi aproximadamente 13,44401 vezes maior que em  $\omega$  e  $\phi$ , para o caso de Torres (2016), e de 13,03129 para o teste recente (2017), não havendo substancial melhora no

processamento. Algumas das hipóteses levantadas e que devem ser estudadas e comprovadas no futuro se referem a falta de manobras de calibração com o sistema e vibração da haste que suporta a antena GNSS.

Figura 34 - Comparativo entre dados inerciais processados.

| Arquivo GNSS/IMU 2016 |                  |               |                |                 |              |                |                 |                |              |                |                 |                  |              |
|-----------------------|------------------|---------------|----------------|-----------------|--------------|----------------|-----------------|----------------|--------------|----------------|-----------------|------------------|--------------|
| Station               | GPSTime<br>(HMS) | Date<br>(MDY) | Easting<br>(m) | Northing<br>(m) | H-Ell<br>(m) | SDHoriz<br>(m) | SDHeight<br>(m) | Omega<br>(Deg) | Phi<br>(Deg) | Kappa<br>(Deg) | OmPhSD<br>(Deg) | KappaSD<br>(Deg) |              |
| 971-K                 | 19:17:47.96      | 12/11/2015    | 457400.014     | 7553642.407     | 482.063      | 0.129          | 0.188           | 3.4065547708   | 1.8284008622 | 262.7833205873 | 0.0069667978    | 0.0767838880     |              |
| 971-K                 | 19:17:47.98      | 12/11/2015    | 457400.093     | 7553642.395     | 482.064      | 0.129          | 0.188           | 3.4550967761   | 1.8248800309 | 262.7803685502 | 0.0069663888    | 0.0767833069     |              |
| 972-K                 | 19:17:48.00      | 12/11/2015    | 457400.173     | 7553642.382     | 482.065      | 0.129          | 0.188           | 3.5929431867   | 1.8582949203 | 262.7813846521 | 0.0069659794    | 0.0767827258     |              |
| 972-K                 | 19:17:48.02      | 12/11/2015    | 457400.252     | 7553642.370     | 482.067      | 0.129          | 0.188           | 3.6515135634   | 1.8700053688 | 262.7369866612 | 0.0069664963    | 0.0767846480     |              |
| 972-K                 | 19:17:48.04      | 12/11/2015    | 457400.331     | 7553642.357     | 482.069      | 0.129          | 0.188           | 3.6758828101   | 1.9411415830 | 262.7557841617 | 0.0069670132    | 0.0767865628     |              |
| 972-K                 | 19:17:48.06      | 12/11/2015    | 457400.410     | 7553642.344     | 482.070      | 0.129          | 0.188           | 3.7507120961   | 2.0093728223 | 262.7434674503 | 0.0069675301    | 0.0767884851     |              |
| Arquivo GNSS/IMU 2017 |                  |               |                |                 |              |                |                 |                |              |                |                 |                  |              |
| 78850                 | 19:23:15.00      | 4/28/2017     | 457877.641     | 7553392.680     | 463.991      | 0.007          | 0.007           | 0.013          | 2.1906215001 | 2.5113320851   | 192.9870519552  | 0.0068199347     | 0.0798342973 |
| 78851                 | 19:23:15.02      | 4/28/2017     | 457877.636     | 7553392.637     | 463.977      | 0.007          | 0.007           | 0.013          | 2.1686982645 | 2.5057949832   | 192.9632768851  | 0.0068166499     | 0.0798375979 |
| 78852                 | 19:23:15.04      | 4/28/2017     | 457877.631     | 7553392.594     | 463.963      | 0.007          | 0.007           | 0.013          | 2.2050915285 | 2.4584137054   | 192.9565982643  | 0.0068133635     | 0.0798409060 |
| 78853                 | 19:23:15.06      | 4/28/2017     | 457877.626     | 7553392.552     | 463.949      | 0.007          | 0.007           | 0.013          | 2.2462858892 | 2.4323311827   | 192.9301084474  | 0.0068100755     | 0.0798442066 |
| 78854                 | 19:23:15.08      | 4/28/2017     | 457877.621     | 7553392.510     | 463.935      | 0.007          | 0.007           | 0.013          | 2.2836827520 | 2.4300436935   | 192.9119242366  | 0.0068067858     | 0.0798475072 |

Fonte: Adaptado de Torres (2016) e o autor (2017).

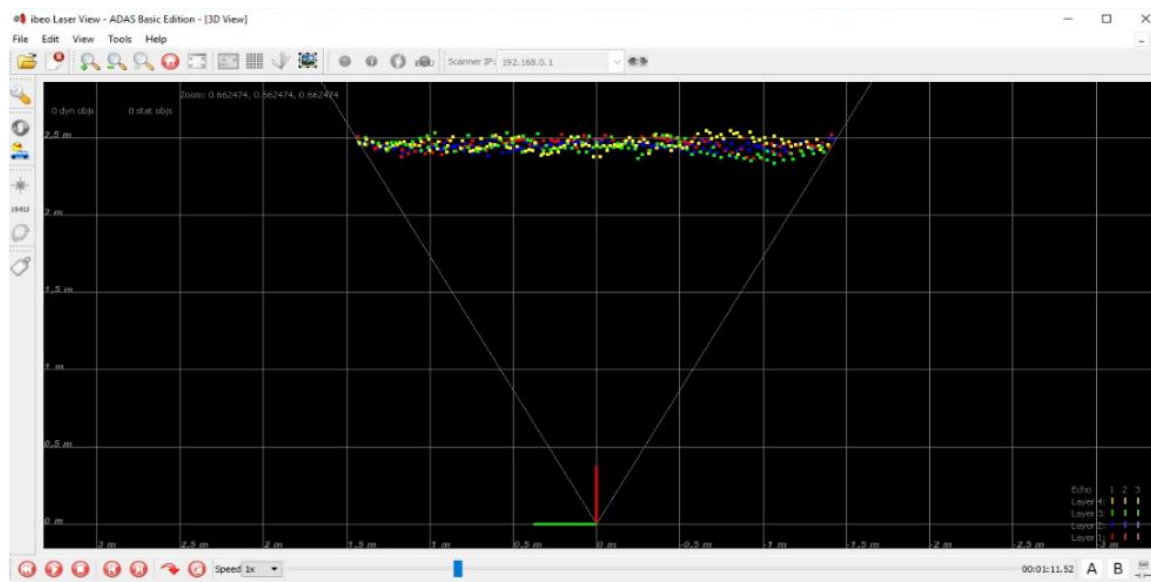
### 5.1.3.2 Processamento de dados LASER

Com a utilização do *script python* modificado foi inicialmente feita a conversão do arquivo binário *.idc* para o formato *.csv*. Este *script* foi executado sem filtragem de pacotes com erros e a geração dos arquivos *.csv* dos voos 1 e 2, nos quais estão presentes informações de cabeçalho, tempo, níveis, ângulos verticais e horizontais, distância e largura. Os pacotes descartados na filtragem eram inutilizados devido a algumas linhas com erros, e quando a função de filtragem no código foi desabilitada, estes passaram a apresentar apenas as linhas de dados coerentes, continuando a descartar as linhas com erros. Cada pacote passou a apresentar aproximadamente 500 linhas de informações a partir da nova configuração do *script* (na pesquisa de Torres (2016) eram cerca de 400 linhas), e cada linha corresponde a um nível de varredura, sendo estes com variação de 0 a 3 (número de níveis possíveis na varredura). Assim, cada giro do espelho representa um pacote de dados com informações que formarão o arquivo binário e, posteriormente, o arquivo *.csv*. Um trecho do arquivo *.csv* é encontrada no Apêndice B.

Em relação ao armazenamento de dados no arquivo binário verificou-se que o arquivo *.csv* não contém todas as informações gravadas no arquivo *.idc*, consequentemente, gerando perda de pacotes de dados. Uma forma de checar os dados foi feita por meio do *software Ibeo LASER View*, que roda o formato *.idc* em tempo real e mostrou que a quantidade de dados é maior em relação ao que é extraído no formato *.csv*. Na Figura 35 é apresentado um

exemplo do arquivo utilizado para análise visual de dados obtidos no voo do MUSEU, visualizado no *software Ibeo LASER View*, junto aos níveis de varredura.

Figura 35 – Análise visual no *Software Ibeo LASER View*.



Em relação ao arquivo *.csv*, foram testadas novas modificações no *script python*, a fim de recuperar as linhas com erros descartadas no processo de decodificação do *.idc*, considerando possíveis falhas ou perdas de bits. Todavia, com base no que se já adquiriu de pacotes de dados, não houve avanço nessa etapa de investigação, recomendando-se portanto, novas pesquisas para a recuperação de dados perdidos no arquivo binário.

Com relação à ordenação dos pacotes de dados e interpolação do tempo, foi utilizado o *script* desenvolvido por Torres (2016), o qual atribuía o tempo (LASER) interpolado para cada linha do pacote de dados, uma vez que o intervalo de tempo era apresentado apenas no cabeçalho de cada pacote e não para as linhas de varredura. No entanto, como o *script* foi escrito para outro conjunto de dados, necessitou de modificação para rodar os dados atuais, devido ao descarte de informações que não continham erros. Verificando os dados brutos e dados interpolados, constatou-se que para os dados atuais, algumas restrições não eram necessárias e assim, foi desabilitada a função de eliminar dados que não atendiam aos critérios de restrição. Após a geração do arquivo *.txt* com os pacotes de dados ordenados e tempos interpolados para cada linha, o tempo LASER ainda precisava ser ordenado e equiparado ao tempo GPS, o que é descrito na etapa seguinte. O arquivo gerado é encontrado no Apêndice C.

Com o problema de sincronização dos dados, foi desenvolvida uma alternativa para geração da nuvem de pontos com os dados LASER e dados GNSS/IMU, a partir

da trajetória de voo de ambos, por meio da relação de distância/altitude com o tempo, a fim de adequar o tempo LASER ao tempo GPS, da unidade inercial. Para isso, o arquivo do LASER com os dados de distância e tempo (interpolado) foram inseridos no aplicativo *Excel 2013*, assim como os dados de altitude e tempo GPS, adquiridos pelo receptor GNSS do sistema inercial.

#### 5.1.3.3 Processamento de dados – Photoscan, SVLA e pontos de apoio

Para fins de comparação com a nuvem LASER foram registradas imagens RGB simultaneamente ao voo com a unidade LASER, por meio de uma câmara *Sony A6000*, totalizando 62 imagens coletadas com intervalos de disparo de 2 segundos. Com o conjunto de imagens coletadas, foi realizada a fototriangulação destas no *software Agisoft Photoscan*, utilizado para processamento de dados obtidos com VANT. Como as imagens foram obtidas no mesmo momento em que os dados LASER, a nuvem de pontos gerada pelo *Photoscan* poderia ser utilizada com uma fonte para comparação e análise da qualidade na nuvem LASER.

Para o processamento das imagens no *Photoscan*, inicialmente estas foram importadas, atribuindo-se um sistema de referência as mesmas, além da verificação dos dados de calibração da câmara para realização da fototriangulação das imagens. Posterior a esse processo, foram inseridos os pontos de controle, utilizando o sistema de coordenadas UTM, e detectados os pontos homólogos nas imagens. Após a execução da fototriangulação, os resíduos em pixel deveriam ser menores que 1 e então, o processo realizado e o arquivo exportado em formato *.las*, para uso nos *softwares* específicos para nuvens LASER.

Uma segunda forma de comparar e analisar a qualidade da nuvem LASER obtida com o sistema de baixo custo, foi por meio de uma nuvem obtida com SVLA convencional, de um levantamento aéreo realizado com elevada densidade de pontos no ano 2013, na cidade de Presidente Prudente, e que foi disponibilizada para a UNESP. Mesmo com algumas diferenças em relação a nuvem do SVL em VANT coletada no ano de 2016 (por exemplo, construção de edificação), foi possível utilizar a nuvem do SVLA para fins de comparação

Em relação aos pontos de apoio, como descrito anteriormente, foram coletados 5 pontos de apoio por rastreo GNSS e 24 pontos com Estação Total. Os pontos de apoio do rastreo GNSS, coletados com o receptor *Hiper Ggd* foram processados no *software GrafNet* da NovAtel, resultando em coordenadas com precisão de 1 mm em planimetria e 3 mm

em altimetria, aproximadamente. As coordenadas dos pontos de apoio levantados com estação total, foram obtidas por meio do aplicativo *Topcon Links*, o qual gerou um arquivo .txt com coordenadas UTM (E, N e h).

#### 5.1.4 Sincronização por Pós- Processamento

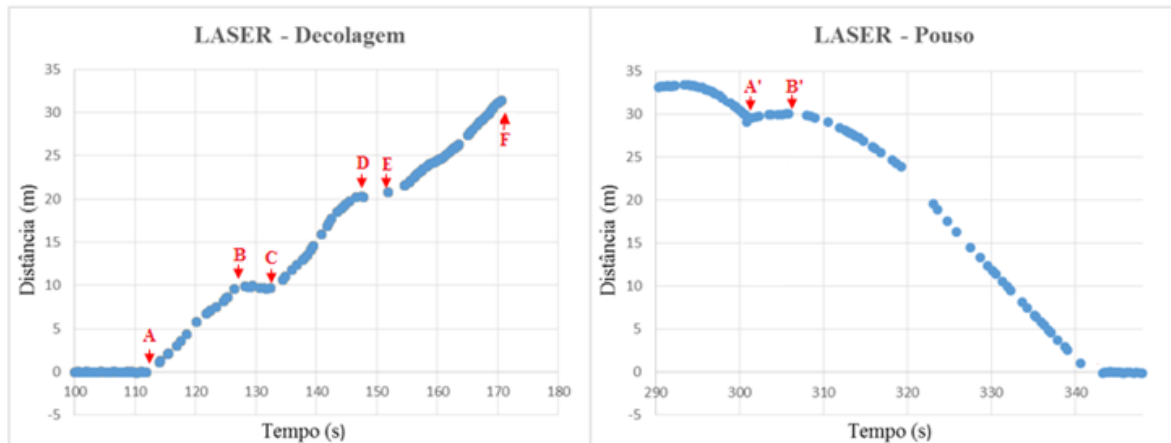
##### 5.1.4.1 Geração dos gráficos altura x tempo para o LASER e GNSS

Para encontrar os picos de máximo e mínimo obtidos com as das manobras de voo executadas nos momentos de decolagem e pouso do VANT, foi realizada uma filtragem pelo aplicativo *Excel 2013*, com a finalidade de obter as menores distâncias entre a unidade LASER e o solo. Essa filtragem possibilitou extrair os pontos cujos ângulos horizontais eram 0 e cujos ângulos verticais eram os menores. Posteriormente foram calculadas as diferenças de distância e tempo a partir de uma referência (distância e tempo imediatamente antes da decolagem) e gerado um gráfico, descrevendo o sinal emitido pelo LASER, no qual foi possível visualizar o percurso de subida e descida feito no voo, com seus picos de máximo e mínimo. Essa mesma abordagem foi feita para os dados de altitude e tempo GPS, nos quais os dados de altitude foram convertidos em alturas de voo em relação ao ponto de decolagem.

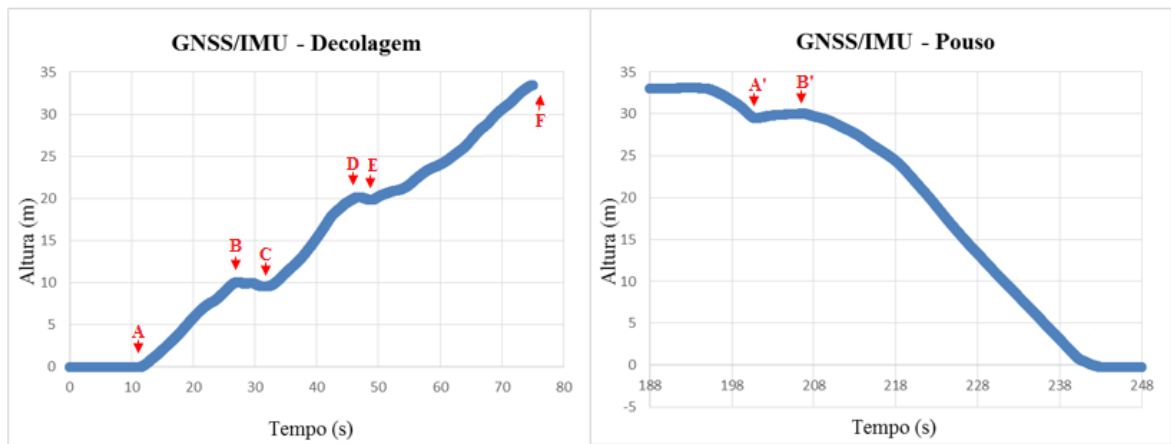
##### 5.1.4.2 Determinação da correspondência para cálculo da correção de tempo

A etapa seguinte consistiu em encontrar por análise visual, picos de máximo e mínimo nos gráficos de sinais (distância x tempo e altura x tempo) dos dados LASER e dados GNSS e realizar associação (correspondência) entre estes pontos. Os gráficos gerados com os dois conjuntos de dados são apresentados na Figura 36, onde o primeiro representa o sinal registrado no início do levantamento e o segundo, o final. Foi possível observar no gráfico do LASER as falhas no sinal emitido, causadas pela perda de pacotes de dados. O volume de dados de altitudes coletadas pelo GPS com frequência de 50 Hz (intervalo de 0,02 s) justifica a densidade do gráfico (b).

Figura 36 - Comparação entre os gráficos de sinais dos dados LASER (a) e dos dados GNSS(b).



(a)



(b)

Após a identificação dos pontos correspondentes nos dois arquivos de dados, para correlacionar o tempo GPS e o tempo do LASER, que está errado, foi obtida a diferença entre os tempos (dos picos de máximo e mínimo de ambos os dados), calculando uma média desta diferença de tempo e o desvio padrão. Essa média de diferença de tempo foi utilizada para corrigir o tempo dos dados LASER, transformando-o em tempo GPS corrigido, permitindo assim, associar posição e atitude aos dados LASER. Na Tabela 3, estão os tempos dos dados LASER e dados GNSS, selecionados a partir dos picos de máximos e mínimos do gráfico. Foi obtida uma média de 48848,39 segundos e desvio padrão de 0,69 segundos para a diferença calculada entre eles.

Tabela 3 – Cálculo do  $\Delta T$  (intervalo entre o  $t_{LS}$  e  $t_{GPS}$ ) para correção do tempo LASER.

|                                      | <b>LASER</b>                   | <b>IMU</b>                      |                                  |
|--------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| <b>Pontos</b>                        | <b><math>t_{LS}</math> (s)</b> | <b><math>t_{GPS}</math> (s)</b> | <b><math>\Delta T</math> (s)</b> |
| A                                    | 24741,557                      | 69589,32                        | 44847,76                         |
| B                                    | 24759,032                      | 69607,16                        | 44848,13                         |
| C                                    | 24761,351                      | 69609,82                        | 44848,47                         |
| D                                    | 24777,166                      | 69624,58                        | 44847,41                         |
| E                                    | 24777,467                      | 69626,60                        | 44849,13                         |
| F                                    | 24800,934                      | 69649,82                        | 44848,89                         |
| A'                                   | 24930,902                      | 69778,86                        | 44847,96                         |
| B'                                   | 24935,16405                    | 69784,52                        | 44849,36                         |
| <b>Média (<math>\Delta T</math>)</b> |                                |                                 | <b>44848,39</b>                  |
| <b>Desvio padrão</b>                 |                                |                                 | <b>0,690</b>                     |

Para possibilitar a sincronização entre os dispositivos, após obter o tempo LASER corrigido, foi necessário ordená-lo. Este tempo foi então estruturado do menor para o maior, obtendo-se assim, um arquivo ordenado de dados LASER, sincronizado por pós-processamento, com os dados GNSS.

#### 5.1.5 Geração de Nuvem de Pontos

Com a adequação dos arquivos LASER e GNSS a um mesmo sistema de tempo (GPS), por meio da sincronização por pós-processamento dos dispositivos do SVL, foi possível dar início ao processo de geração de nuvem de pontos. Para gerar as nuvens (com e sem refinamento), foi adaptado o código em linguagem C++ desenvolvido por Torres (2016), no qual foi implementado o modelo matemático de varredura a LASER (equação 11, Seção 2.2.4).

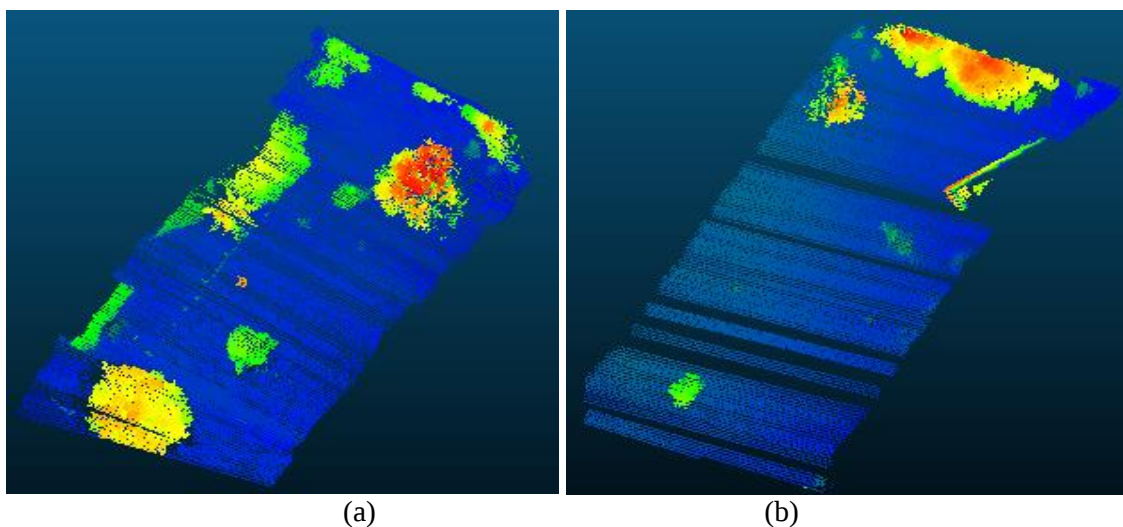
Antes de iniciar a execução do programa foi necessário identificar o tempo de início e fim de cada faixa. Para isso, um arquivo com coordenadas E, N e h da trajetória determinada pelo GNSS foi plotada no *software Global Mapper 15*. Cada par de coordenadas tinha um tempo GPS associado, o que permitiu compará-lo ao tempo do arquivo de dados LASER, e identificar o início e fim das faixas de voo no mesmo. A análise pelo ângulo *kappa* poderia ser feita, mas como o VANT sofreu oscilações no início e fim de cada faixa, a análise

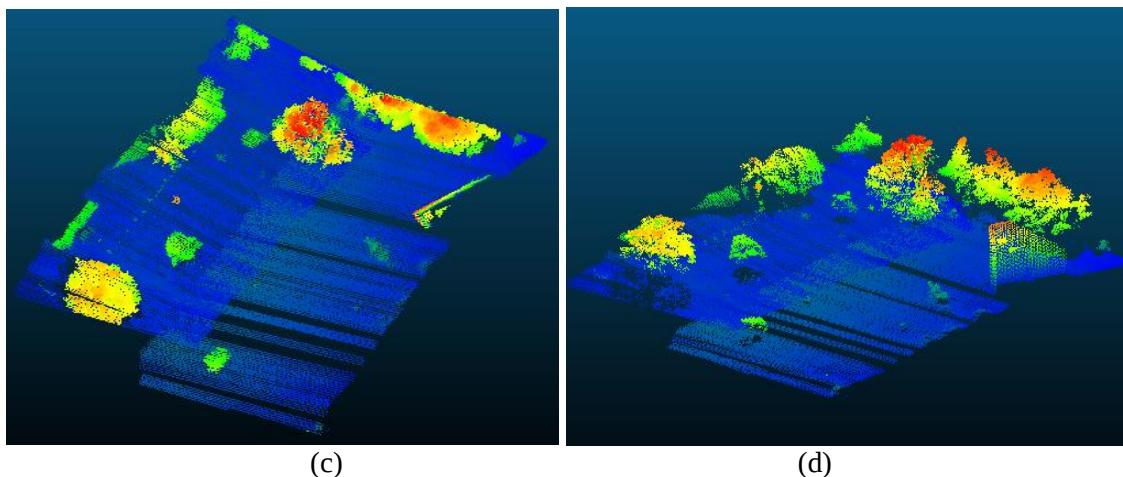
pelo *Global Mapper* permitiu visualizar melhor os limites de cada uma. Para a execução programa, foram coletados os tempos GPS de quatro faixas, considerando a faixa de subida e a faixa de descida, além das duas faixas do plano de voo executado.

Após a coleta das informações necessárias, o programa foi executado a partir dos dados de entrada (LASER e GNSS/IMU), gerando a nuvem de pontos de cada faixa e uma nuvem sem filtro, com todos os pontos coletados na varredura a LASER. Foram quatro arquivos correspondentes a cada faixa de voo, originando as faixas 1, 2, 3, e 4, com coordenadas E, N, h, largura do pulso e tempo, e um arquivo com as mesmas características, denominado “nuvem sem filtro” (com todos os retornos de pulso emitidos). Além destes arquivos, foi gerado um arquivo denominado .PROC, com as informações dos dois arquivos de entrada, e um arquivo denominado trajetória\_2, com dados de toda a trajetória de voo. Todos estes arquivos foram gerados em formato .txt.

Os arquivos referentes às nuvens de pontos foram abertos inicialmente no *software* de visualização de dados geoespaciais, *Cloud Compare*. Como as faixas 1 e 4 correspondiam aos momentos de subida e descida do VANT, foram utilizadas apenas as faixas 2 e 3 correspondentes a área mapeada, e nas quais é possível identificar feições como edificações e copas de árvores. Falhas perceptíveis estão relacionadas à perda de pacotes de dados, que não puderam ser recuperados ao longo do processamento. As Figuras 37a e 37b apresentam as faixas 3 e 2, e as Figuras 37.c e 37.d, apresentam à composição da nuvem de pontos após junção das faixas e visão tridimensional das feições encontradas. Um diagrama da sequência de processamentos para a geração das nuvens de pontos encontra-se no Apêndice F.

Figura 37 - Nuvens de pontos da área do “MUSEU”: (a) faixa 2, (b) faixa 3, (c) nuvem de pontos da área e (d) vista tridimensional (3D).





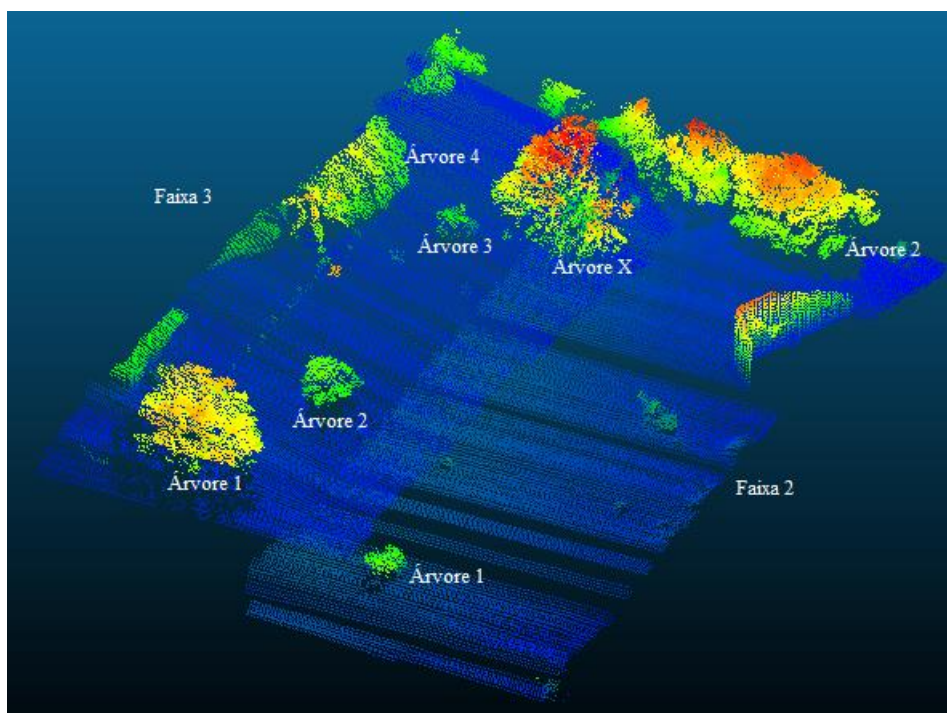
Em experimentos realizados com a ferramenta *lasinfo*, da biblioteca LasTools, foram feitos 5 recortes de 5m x 5m na nuvem para obter a densidade de pontos por m<sup>2</sup>, dos quais dois foram realizados na faixa 2, dois na faixa 3 e um na sobreposição entre as faixas. A densidade média de pontos obtida foi de cerca de 9,93 pontos por m<sup>2</sup>.

Além do cálculo da densidade de pontos por m<sup>2</sup> também foi estimada a quantidade de pontos localizados abaixo das copas das árvores, isto é, pulsos que conseguiram “penetrar” as copas e chegar até o solo. Entretanto, a forma como a árvore se encontra, seca ou com muitas folhas, influencia no percentual de pontos encontrados no solo, o que pode ser verificado com os resultados da Tabela 4. Para obter a área de cada árvore foi utilizada a ferramenta de recorte do programa *Cloud Compare*. Na Figura 38 estão as árvores selecionadas para a análise.

Tabela 4 - Análise de pontos LASER que penetraram copas de árvores.

| <b>Id.</b>  | <b>Faixa</b>              | <b>Pontos – com<br/>copa</b> | <b>Pontos – sem<br/>copa</b> | <b>Pontos<br/>penetrados<br/>(%)</b> |
|-------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Árvore 1    | Faixa2                    | 535                          | 205                          | 38,31 %                              |
| Árvore 2    | Faixa2                    | 12185                        | 1198                         | 9,83 %                               |
| Árvore 1    | Faixa3                    | 5159                         | 878                          | 17,01 %                              |
| Árvore 2    | Faixa3                    | 835                          | 129                          | 15,44 %                              |
| Árvore 3    | Faixa3                    | 301                          | 88                           | 29,23 %                              |
| Árvore 4    | Faixa3                    | 3363                         | 886                          | 26,34 %                              |
| Árvore<br>X | Sobreposição<br>de faixas | 9413                         | 3526                         | 37,45 %                              |

Figura 38 - Amostras de árvores utilizadas para avaliar a penetrabilidade de pulsos LASER.



Com o objetivo de melhorar os resultados com a nuvem de pontos, foi proposto o refinamento da sincronização de tempo por meio de um ajustamento pelo MMQ (Seção 4.1.4). O resultado obtido do cálculo de diferença de tempo é encontrado na Tabela 5. Com o resultado obtido pelo  $\Delta t$  MMQ, verifica-se que o impacto sobre a nuvem de pontos, causados por uma diferença de 0,04 s para um VANT com velocidade de 4m/s, é de cerca de 16 cm, isto é, a diferença de tempo entre o LASER e o GNSS gera 16 cm de diferença entre ambos. Somando-se o  $\Delta t$  calculado pelo MMQ ao tempo GPS do LASER, este torna-se equivalente ao tempo do GNSS, eliminando a diferença de tempo e possibilitando uma nuvem mais precisa.

Tabela 5 - Refinamento do tempo por ajustamento pelo MMQ.

| <b>Técnica</b>       | <b>Diferença de tempo (s)</b> |
|----------------------|-------------------------------|
| Ajustamento pelo MMQ | -0,04                         |

Os testes seguintes foram feitos com duas nuvens: uma ajustada pelo  $\Delta t$  calculado pelo MMQ, a qual foi aplicada a correção do tempo (-0,04 s) e outra sem ajustamento, na qual não houve a correção de tempo pelo MMQ. Um trecho dos resultados das duas nuvens é exemplificado na Tabela 6, a qual mostra o número do pacote ao qual pertencem, a distância

e largura de pulso obtidos e a diferença entre os tempos GPS do LASER, após aplicado o refinamento.

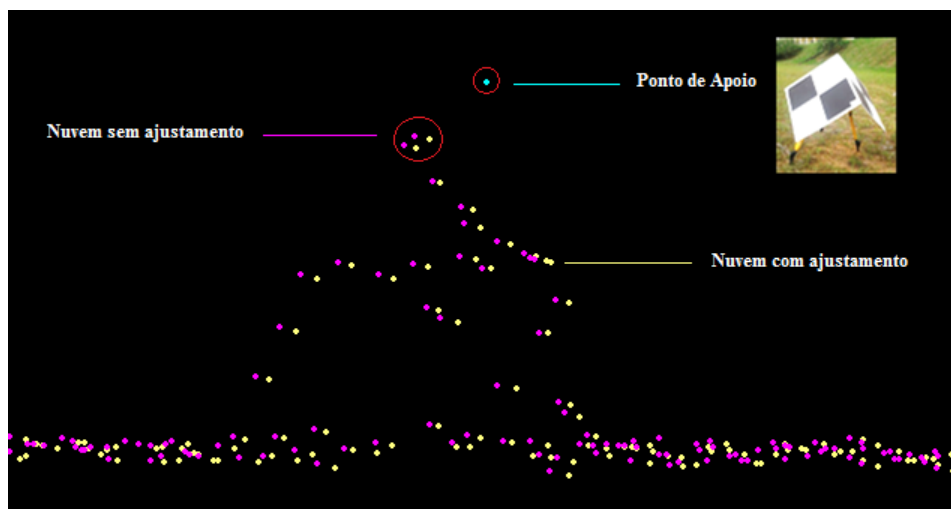
Tabela 6 - Amostra dos tempos do LASER, antes e após o refinamento pelo MMQ .

| <b>Pacote</b> | <b>Distância<br/>(m)</b> | <b>Largura do<br/>pulso (cm)</b> | <b>Tempo GPS LASER<br/>- Sem ajustamento(s)</b> | <b>Tempo GPS LASER -<br/>Com ajustamento(s)</b> |
|---------------|--------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 14924         | 34,48                    | 164                              | 69696,80503                                     | 69696,76503                                     |
| 14924         | 34,55                    | 160                              | 69696,80507                                     | 69696,76507                                     |
| 14924         | 34,52                    | 164                              | 69696,80507                                     | 69696,76507                                     |
| 14924         | 34,68                    | 152                              | 69696,8051                                      | 69696,7651                                      |
| 14924         | 34,64                    | 164                              | 69696,8051                                      | 69696,7651                                      |
| 14924         | 34,71                    | 156                              | 69696,80514                                     | 69696,76514                                     |
| 14924         | 34,72                    | 164                              | 69696,80514                                     | 69696,76514                                     |
| 14924         | 34,8                     | 156                              | 69696,80517                                     | 69696,76517                                     |
| 14924         | 34,8                     | 164                              | 69696,80517                                     | 69696,76517                                     |
| 14924         | 34,88                    | 156                              | 69696,80521                                     | 69696,76521                                     |
| 14924         | 34,92                    | 160                              | 69696,80521                                     | 69696,76521                                     |
| 14924         | 34,99                    | 160                              | 69696,80524                                     | 69696,76524                                     |

Visualmente, ambas as nuvens não apresentam diferenças significativas, e por isso, elas foram analisadas primeiramente a partir da comparação com pontos de apoio coletados em campo. Como foi coletado um ponto de apoio tridimensional (3D) em campo, este foi usado para a análise, junto as duas nuvens da faixa 2, na qual se encontra (com e sem correção de tempo). As duas nuvens foram abertas no *Cloud Compare* e *Fugro Viewer*, e além delas, foram inseridas as coordenadas do pontos de apoio. Como o *Fugro Viewer* possibilita uma visualização melhor de perfil do terreno, este foi utilizado para uma análise superficial, que consistia em medir a distância entre pontos idênticos das nuvens até os pontos de apoio e verificar as diferenças que ambas apresentavam.

Figura 39 apresenta o perfil do alvo 3D e como as nuvens foram dispostas em relação ao ponto de controle. Os pontos da nuvem utilizados para serem comparados entre si e o ponto de controle, foram os do topo do alvo 3D. Nesta análise, os pontos da nuvem sem correção apresentaram uma distância de 22 cm em relação ao ponto de controle, e a nuvem de pontos com correção apresentou 21 cm em relação aos pontos de apoio.

Figura 39 - Análise comparativa entre as nuvens de pontos com e sem ajustamento, em relação ao ponto de controle 3D, levantado em campo.



A partir dos conjuntos de dados obtidos, foi dado início ao Controle de Qualidade da Nuvem de pontos do SVL embarcado em VANT.

## 5.2 Controle de Qualidade

Nesta seção, serão descritos os resultados encontrados a partir das técnicas aplicadas para realizar o controle de qualidade da nuvem de pontos do SVL, a fim de verificar sua qualidade posicional. Para isso, foram feitos testes de qualidade: comparação entre a nuvem de pontos do SVL e a nuvem de pontos gerada no *software Agisoft Photoscan*, trianguladas a partir das imagens obtidas pela câmara *Sony A6000*; Controle de qualidade da nuvem SVL com uma nuvem originária de voo com SVLA convencional, disponível no banco de dados da UNESP e; Controle de qualidade altimétrico e planimétrico, a partir de dois conjuntos de pontos de apoio levantados em campo.

### 5.2.1 Controle de Qualidade – Nuvem *Photoscan*

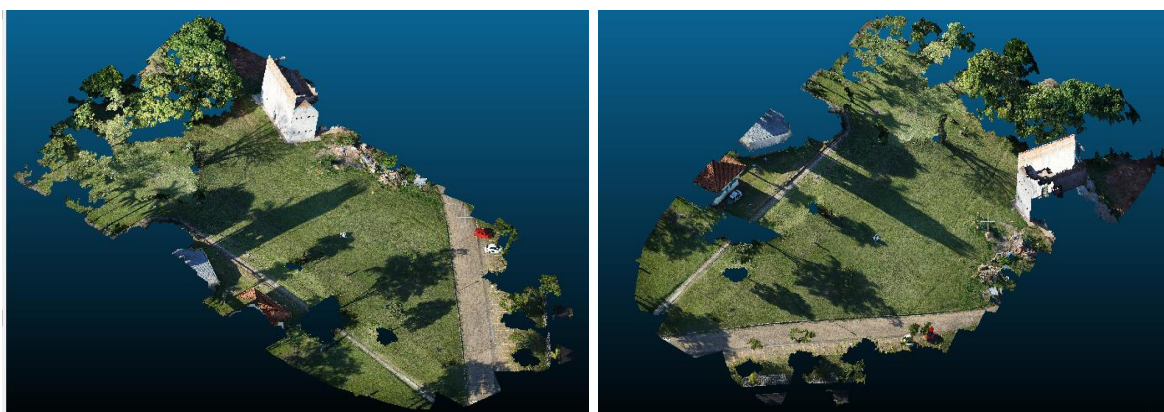
Para fins de comparação com a nuvem do SVL em VANT foi gerada uma nuvem de pontos a partir do processamento de imagens no *software Photoscan*. Como as imagens foram coletadas no mesmo dia e instante do voo com a unidade LASER, as condições eram favoráveis para comparação e posterior análise da qualidade. Foram 67 imagens coletadas

com a câmara *Sony A6000*, mas como foram registradas imagens com o sistema em solo, para o processamento apenas 56 foram utilizadas e as demais descartadas.

Posteriormente, foram verificados os parâmetros de calibração da câmera, os resultados da fototriangulação das imagens e inseridos os cinco pontos de controle rastreados com GNSS, no sistema de projeção UTM. Após obter o erro menor que 1 pixel, foi gerada a nuvem densa, com cerca de 12 962 298 pontos, conforme Figura 40. A fim de utilizar esta nuvem junto com a nuvem SVL, ela foi exportada em formato *.las*. No entanto, não se sabe a qualidade desta nuvem, sendo ela utilizada para fins de comparação iniciais.

Para realizar o controle de qualidade, a nuvem *Photoscan* foi adotada como referência, uma vez que foi obtida com o uso de pontos de apoio. Assim, o primeiro conjunto de análises foi feito utilizando a nuvem com ajustamento, e posteriormente, a nuvem sem ajustamento.

Figura 40- Nuvem de pontos gerada pelo *Photoscan*, com as imagens RGB da câmara *A6000*.



#### 5.2.1.1 Nuvem de pontos com ajustamento

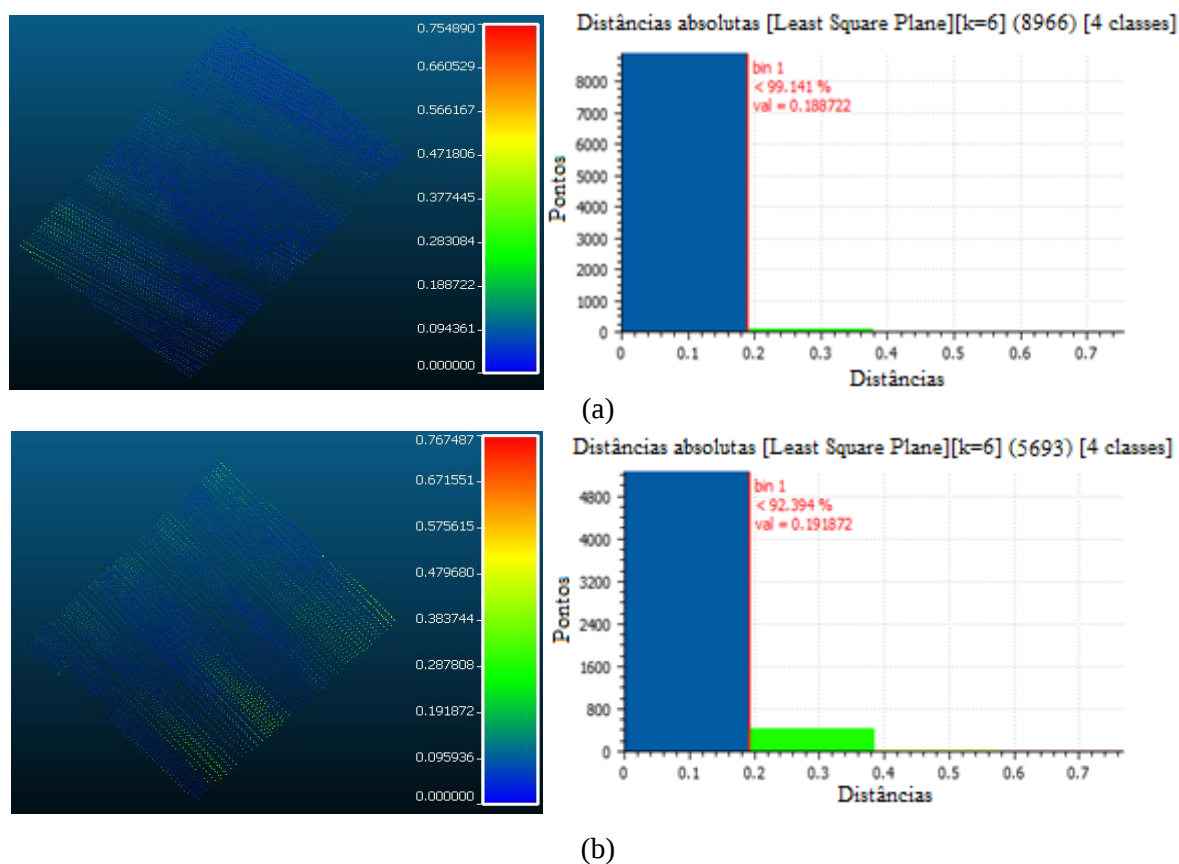
Como no processo de fototriangulação das imagens no *Photoscan* algumas feições da área do MUSEU não foram geradas, principalmente copas de árvores, foi proposta a comparação e análise do cálculo das distâncias para pequenas áreas, preferencialmente uma parcela do solo, comum às nuvens geradas pelo *Photoscan* e pelo LASER. Assim, foram feitos experimentos com áreas referentes ao solo para a faixa 2 e faixa 3 da nuvem de pontos.

No software *Cloud Compare* foram abertas as nuvens de pontos, tanto do SVL, quanto do *Photoscan*. Com a ferramenta *Cloud/Cloud dist*, que computa a distância entre os pontos das nuvens, foram selecionadas a nuvem adotada como parâmetro de referência (*Photoscan*) e as duas faixas do SVL a serem avaliadas (faixas 2 e 3). Para obter a distância

entre elas, foi utilizado o interpolador *Least Square Plane* (que apresentou melhor resultado nos testes realizados). Este interpolador é utilizado por gerar um plano/superfície por mínimos quadrados e obter diretamente a diferença de distâncias entre um ponto de referência e o plano gerado (Cloudcompare, 2015).

Na Figura 41.a são apresentados os resultados das diferenças de distâncias entre a nuvem de referência e a faixa 2, para um trecho de solo em comum. Verifica-se predominância dos pontos na cor azul, localizados no intervalo de 0 a 9,4 cm. Na análise do histograma, constatou-se que 99,1% do total de pontos, isto é, a maior parte dos pontos do recorte de solo estão distantes até 9,4 cm da nuvem de referência. Para o teste realizado com a faixa 3 (Figura 41.b), os resultados mostraram que a predominância de pontos foi no intervalo entre 0 e 9,6 cm, correspondendo 92,4% de todos os pontos presentes na nuvem, isto é, o maior número de pontos são distantes até 9,6 cm da nuvem de referência.

Figura 41 - Análise de distâncias entre a nuvem *Photoscan* e a faixa 2 (a) e faixa 3(b), com ajustamento.

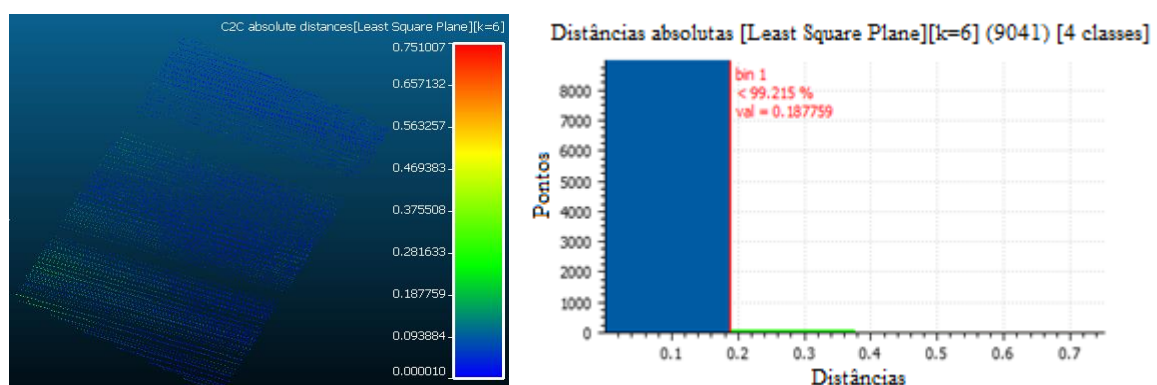


Portanto, os resultados apresentados na análise de qualidade com as duas faixas (2 e 3) do SVL, caso com ajustamento pelo MMQ, indicaram que as diferenças de distância encontradas são de aproximadamente 9,4 para a faixa 2, e 9,6 cm para a faixa 3.

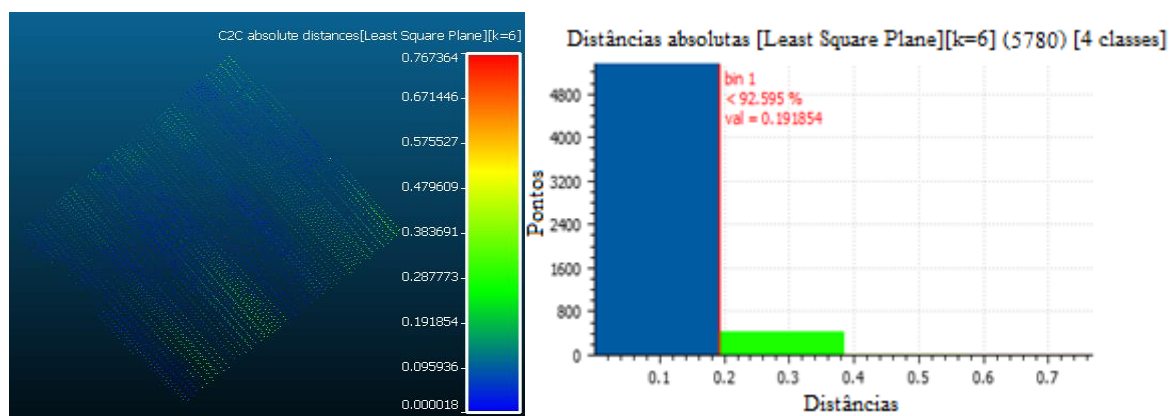
#### 5.2.1.2 Nuvem de pontos sem ajustamento

De modo similar ao experimento anterior, foi feita a análise de qualidade para a nuvem de pontos sem ajustamento pelo MMQ. Os resultados obtidos mostraram que para a faixa 2 (Figura 42.a), o maior número de pontos se encontrava no intervalo entre 0 e 9,3 cm, correspondentes a 99, 2% de todos os pontos da nuvem. Para a faixa 3 (Figura 42.b), os experimentos mostraram uma discrepância de 9,6 cm, com a maioria dos pontos dentro de 92,6% do total de pontos da nuvem. Portanto, na análise comparativa, as distâncias obtidas em relação a nuvem de referência (*Photoscan*), foram semelhantes.

Figura 42 - Análise de distâncias entre a nuvem *Photoscan* e a faixa 2 (a) e faixa 3(b), sem ajustamento.



(a)



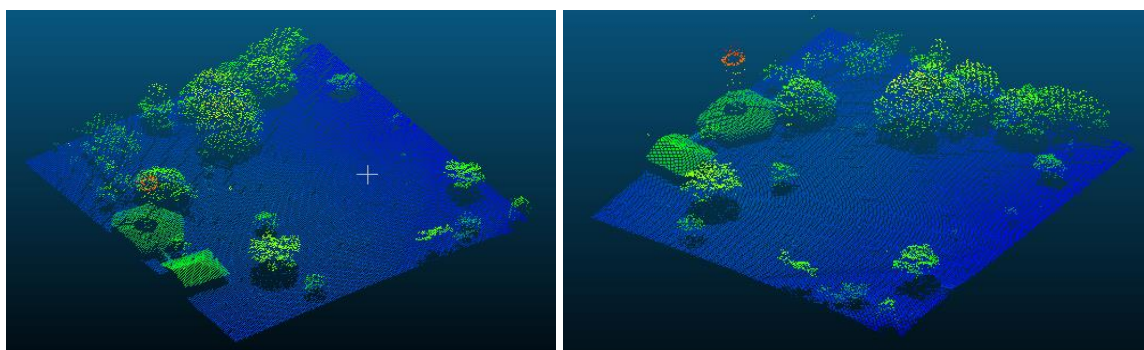
(b)

Na avaliação geral, tanto a nuvem LASER com ajustamento, quanto a nuvem sem ajustamento, apresentaram na análise e comparação de distâncias, valores próximos de 9,5 cm, indicando que esta pequena melhoria na sincronização não afeta significativamente a qualidade das altitudes geradas pelo LASER em áreas planas, devido à baixa velocidade do multirrotor e pequena declividade do terreno.

### 5.2.2 Controle de Qualidade – Nuvem SVLA

De modo similar aos experimentos da Seção anterior, nesta será utilizada, ao invés da nuvem *Photoscan*, uma nuvem SVLA, de elevada densidade de pontos. Para iniciar os experimentos, a nuvem SVLA (Figura 43) necessitou ser cortada para se adequar a nuvem do SVL embarcado em VANT, uma vez que esta abrange uma extensa área de Presidente Prudente. Os experimentos foram novamente realizados com o conjunto de nuvens com e sem ajustamento pelo MMQ.

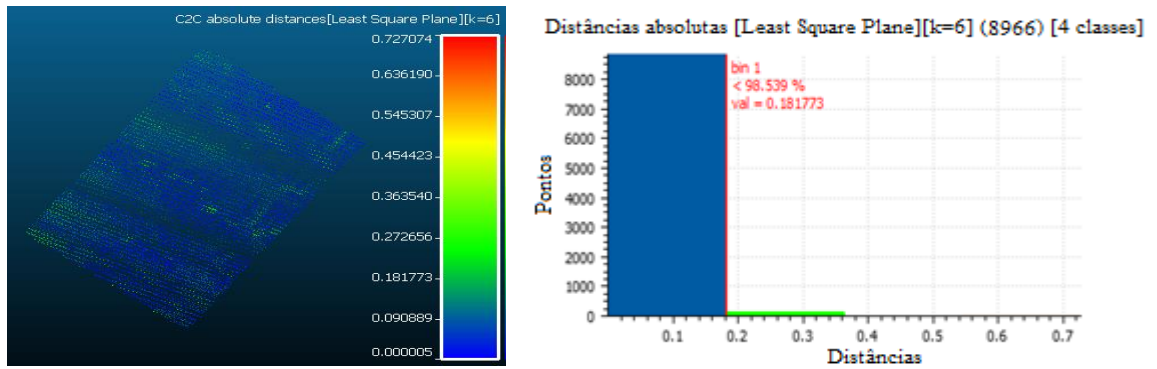
Figura 43 - Nuvem de pontos SVLA, de voo realizado sobre área do “MUSEU”.



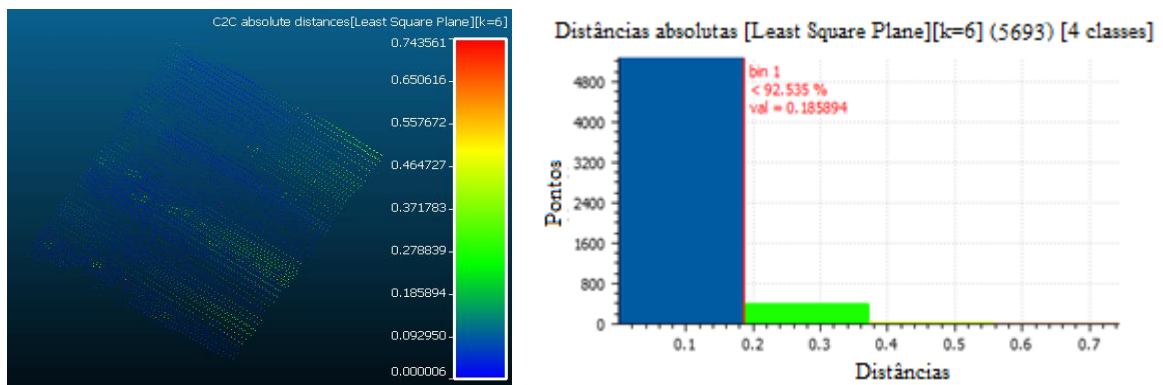
#### 5.2.2.1 Nuvem de pontos com ajustamento

Na análise comparativa por distância da nuvem LASER do VANT, com a nuvem do SVLA, foi aplicado o mesmo procedimento da Seção anterior, para avaliar apenas pequenas áreas de solo, comuns em ambas as nuvens. Para a faixa 2 (Figura 44.a), obteve-se o resultado de 98,5% do total de pontos com diferença de até 9 cm para a nuvem de referência. Para a faixa 3 (Figura 44.b), o maior número de pontos distanciou em até 9,2 cm da nuvem de referência, o que corresponde a 92,53% dos pontos do trecho selecionado. Portanto, para os testes com a nuvem com ajustamento, os resultados foram 9 cm para faixa 2 e 9,2 cm para a faixa 3.

Figura 44 - Análise de distâncias entre a nuvem SVLA e a faixa 2 (a) e faixa 3(b), com ajustamento.



(a)

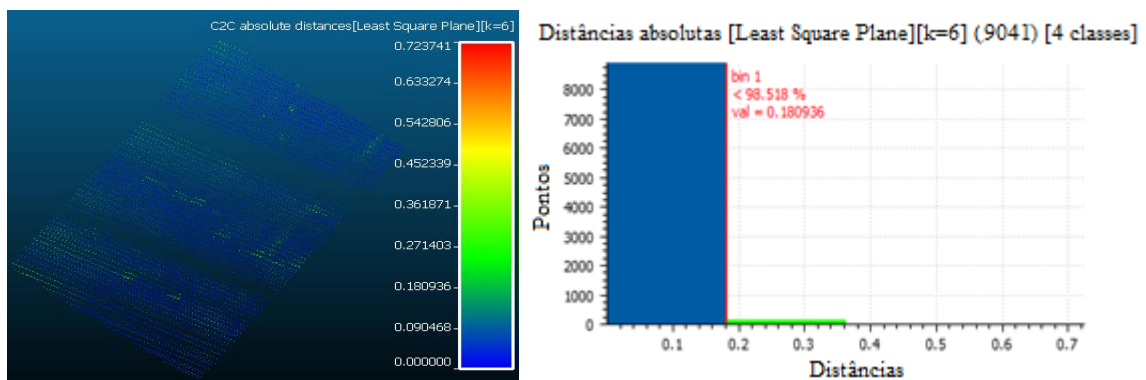


(b)

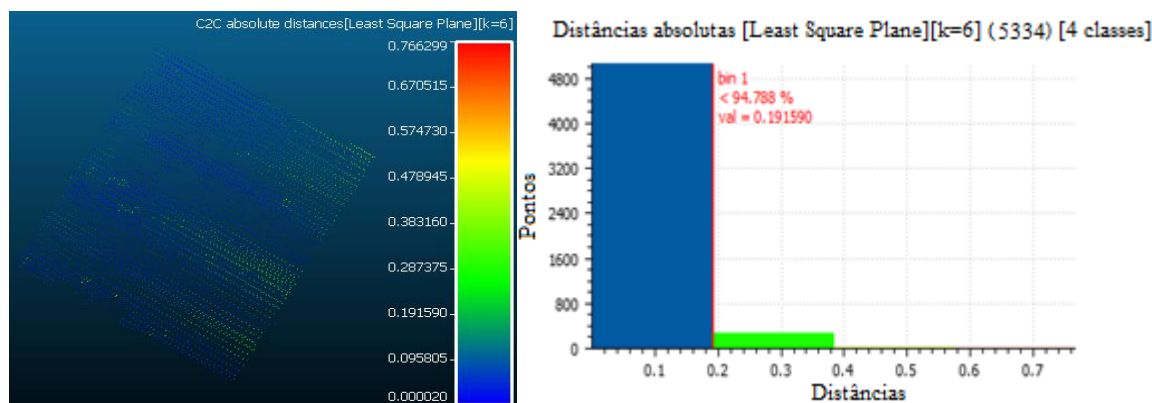
#### 5.2.2.2 Nuvem de pontos sem ajustamento

Na comparação com a nuvem sem ajustamento, o maior número de pontos da área selecionada (98,5% do total) na faixa 2 se encontra distante até 9 cm em relação à nuvem de referência (Figura 45.a). Na análise com a faixa 3 (Figura 45.b), 94,7 % do total de pontos se encontra distante até 9,5 cm da nuvem de referência.

Figura 45 - Análise de distâncias entre a nuvem SVLA e a faixa 2 (a) e faixa 3(b), sem ajustamento.



(a)



(b)

Na análise comparativa por distância, tanto os testes realizados com a nuvem *Photoscan*, quanto com a nuvem SVLA, para o trecho de solo, apresentaram-se distantes aproximadamente entre 9 e 10 cm, sendo o maior número de pontos das nuvens pertencentes a estes intervalos. Não se pode chamar de acurácia esse valor, por ser uma análise comparativa entre nuvens e, portanto, passíveis da influência de diferentes erros em ambos os produtos.

Na comparação entre as nuvens com ajustamento e sem ajustamento, as nuvens que foram refinadas pelo MMQ apresentaram melhores resultados em comparação aos seus pares. Deste modo, para obter a acurácia da nuvem LASER obtida pelo SVL em VANT e analisar a qualidade das nuvens com e sem ajustamento, foi proposto o controle de qualidade com pontos de apoio, descrito na Seção 5.2.3.

### 5.2.3 Controle de Qualidade – Pontos de apoio

Para o Controle de Qualidade com pontos de apoio foram coletados dois conjuntos de pontos em levantamento de campo com GNSS e Estação Total, descritos na Seção 4.1.2.3, e encontrados nos Apêndices D e E. Como foi feita a aquisição de pontos objetivando uma distribuição homogênea dentro da área, foram coletados pontos em quinas de caixas no chão, em quinas de paredes, em quinas de telhados, quinas de faixas pintadas ao chão, além dos alvos implantados. Dos dois conjuntos, 19 pontos foram selecionados para o Controle de Qualidade Altimétrico e 10 para Controle de Qualidade Planimétrico, dos quais apenas 6 foram de fato utilizados, devido a técnica utilizada para interpolação de retas, descrita na Seção 5.2.3.2. Para fazer o controle, foram utilizadas a nuvens com sincronização pelo ajustamento pelo MMQ e a nuvem sem ajustamento pelo MMQ.

### 5.2.3.1 Controle de Qualidade Altimétrico

Para o controle altimétrico foram selecionados pontos localizados no solo e, que não seriam utilizados no controle planimétrico da nuvem LASER. Estes pontos, portanto, serviram apenas para obter as discrepâncias altimétricas da nuvem em relação a pontos de coordenadas conhecidas (pontos de apoio). Para obter as discrepâncias (dZ) entre as altitudes dos pontos de apoio e dos pontos LASER foi usada diretamente a nuvem, com aplicativos da biblioteca *Lastools*.

A ferramenta *lasground* da biblioteca *LASTools* foi utilizada para filtrar a nuvem de pontos, deixando apenas os pontos referentes ao solo. Com a ferramenta *lascontrol*, foram calculadas as diferenças de altitude entre os pontos de apoio e a nuvem LASER permitindo obter um conjunto de discrepâncias ( $\Delta H$ ). Essa ferramenta calcula a altura dos pontos LASER em relação aos pontos de apoio e depois informa a diferença de altura entre eles. Isso é possível porque são triangulados pontos relevantes ao redor dos pontos de controle, em uma malha irregular (*Triangular Irregular Network – TIN*) (LASTools, 2017).

Após obter os valores das discrepâncias da componente vertical foram calculadas a média, o desvio padrão das amostras e o RMSE dos 17 pontos. Na análise da nuvem com ajustamento, exemplificada na Tabela 7, foi obtida uma acurácia altimétrica de 11,6 cm para, para o total de pontos de apoio em campo.

Tabela 7 - Controle de Qualidade Altimétrico: discrepâncias entre pontos de apoio no terreno e pontos da nuvem LASER com ajustamento.

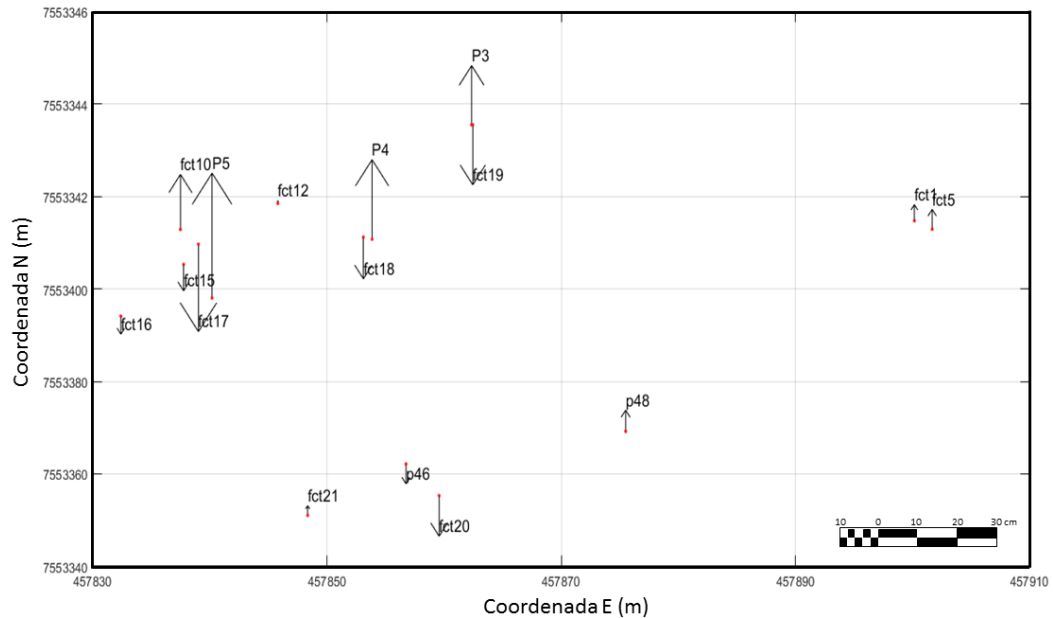
| ID                   | Laser (m) | Pt. Apoio(m) | Discrepância(m)               |
|----------------------|-----------|--------------|-------------------------------|
|                      | H_LS      | H_Pt.Ap      | $\Delta H (Z\_LS - Z\_Pt.Ap)$ |
| P3                   | 439,106   | 438,978      | 0,128                         |
| P4                   | 439,272   | 439,1        | 0,172                         |
| P5                   | 439,255   | 438,985      | 0,270                         |
| P46                  | 438,561   | 438,604      | -0,043                        |
| P48                  | 438,189   | 438,143      | 0,046                         |
| FCT1                 | 437,766   | 437,731      | 0,035                         |
| FCT 5                | 437,762   | 437,719      | 0,043                         |
| FCT 10               | 438,066   | 439,186      | 0,119                         |
| FCT 12               | 438,068   | 439,188      | 0,006                         |
| FCT 15               | 439,305   | 439,278      | -0,057                        |
| FCT 16               | 439,194   | 439,27       | -0,039                        |
| FCT 17               | 439,221   | 439,34       | -0,189                        |
| FCT 18               | 439,231   | 439,346      | -0,090                        |
| FCT 19               | 439,151   | 439,324      | -0,130                        |
| FCT 20               | 439,256   | 438,616      | -0,088                        |
| FCT 21               | 439,194   | 438,533      | 0,021                         |
| <b>Média</b>         |           |              | <b>0.013</b>                  |
| <b>Desvio padrão</b> |           |              | <b>0.119</b>                  |
| <b>RMSE</b>          |           |              | <b>0.116</b>                  |

Na Figura 46, o gráfico ilustra a distribuição das discrepâncias altimétricas, com H em função de E. Verifica-se que não há tendência entre os valores, que oscilam entre negativos e positivos. Além disso, as maiores discrepâncias são identificadas na faixa 3 (à esquerda no gráfico), que tem o maior número de pontos de controle distribuídos, em relação à faixa 2, com apenas 3. Ressalta-se que foi utilizada a coordenada E apenas para plotagem e localização das discrepâncias. A escala gráfica apresentada é referente aos vetores das discrepâncias.

Uma análise de tendência utilizando o teste T-Student, pelo *software Minitab 16*, também foi realizada para verificar a existência de tendência nos dados de altimetria. Neste

teste, a hipótese nula foi aceita, devido ao valor da probabilidade estatística ser maior que 0,05, comprovando não existir tendência nos dados.

Figura 46 - Gráfico de agulhas, para verificação de tendência no controle de qualidade altimétrico – nuvem de pontos com ajustamento.



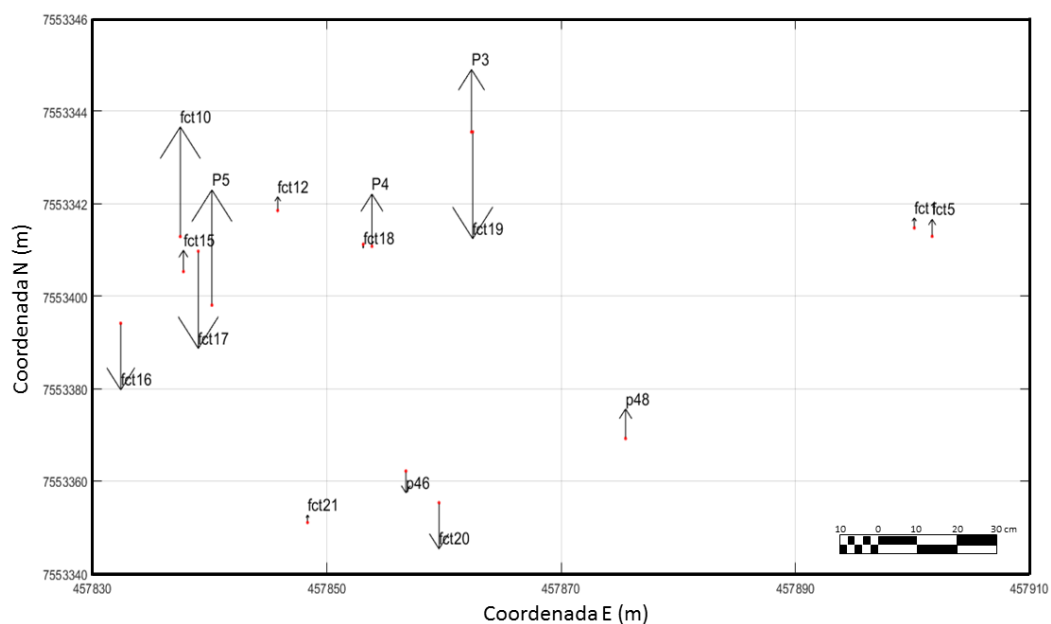
A estimativa das discrepâncias em  $h$  (altitude) também foi calculada para a nuvem sem ajustamento pelo MMQ, além da média, desvio padrão amostral e RMSE, para um total de 16 pontos. A nuvem sem ajustamento alcançou uma acurácia altimétrica da ordem de 13,4 cm, cerca de 1,8 cm de diferença com relação à nuvem com ajustamento, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Controle de Qualidade Altimétrico: discrepâncias entre pontos de apoio no terreno e pontos da nuvem LASER sem ajustamento.

| ID                   | Laser (m) | Pt. Apoio (m) | Discrepância (m)              |
|----------------------|-----------|---------------|-------------------------------|
|                      | H_LS      | H_Pt,Ap       | $\Delta H (Z_{LS} Z_{Pt,Ap})$ |
| P3                   | 439,113   | 438,978       | 0,135                         |
| P4                   | 439,213   | 439,1         | 0,113                         |
| P5                   | 439,234   | 438,985       | 0,249                         |
| P46                  | 438,557   | 438,604       | -0,047                        |
| P48                  | 438,207   | 438,143       | 0,064                         |
| FCT 1                | 437,753   | 437,731       | 0,022                         |
| FCT 5                | 437,756   | 437,719       | 0,037                         |
| FCT 10               | 439,423   | 439,186       | 0,237                         |
| FCT 12               | 439,218   | 439,188       | 0,03                          |
| FCT 15               | 439,324   | 439,278       | 0,046                         |
| FCT 16               | 439,126   | 439,27        | -0,144                        |
| FCT 17               | 439,13    | 439,34        | -0,21                         |
| FCT 18               | 439,338   | 439,346       | -0,008                        |
| FCT 19               | 439,093   | 439,324       | -0,231                        |
| FCT 20               | 438,516   | 438,616       | -0,1                          |
| FCT 21               | 438,549   | 438,533       | 0,016                         |
| <b>Média</b>         |           |               | <b>0,013</b>                  |
| <b>Desvio Padrão</b> |           |               | <b>0,138</b>                  |
| <b>RMSE</b>          |           |               | <b>0,134</b>                  |

Os vetores das discrepâncias são apresentados na Figura 47. Contudo, observa-se que na faixa 2 (à direita) há maior tendência nas discrepâncias, e o ponto fct1 apresenta o maior valor das discrepâncias observadas. Na faixa 3 verifica-se uma distribuição aleatória, não indicando tendências. No entanto, os vetores das discrepâncias indicaram uma diferença maior em relação à nuvem LASER sem correção, em comparação com a nuvem com ajustamento, correspondendo à diferença de 1,8 cm entre as nuvens. Aplicando o teste T-Student, a probabilidade estatística calculada foi superior a 0,05, com a hipótese nula aceita, indicando a ausência de tendência nas discrepâncias das coordenadas.

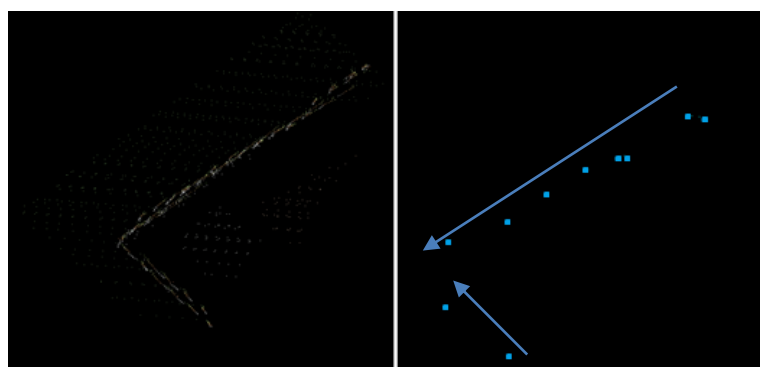
Figura 47 - Gráfico de agulhas, para verificação de tendência no controle de qualidade altimétrico –  
nuvem de pontos sem ajustamento



### 5.2.3.2 Controle de Qualidade Planimétrico

Em relação ao controle de qualidade planimétrico foram utilizados somente os pontos de apoio coletados em quinas, que permitiam a representação de feições. No software *Cloud Compare* foram feitos recortes na nuvem de pontos das áreas em que estavam cada um destes pontos de apoio (quinas de edificação, quinas de telhado e os alvos) e, posteriormente, extraído apenas uma seção horizontal de pontos (Figura 48).

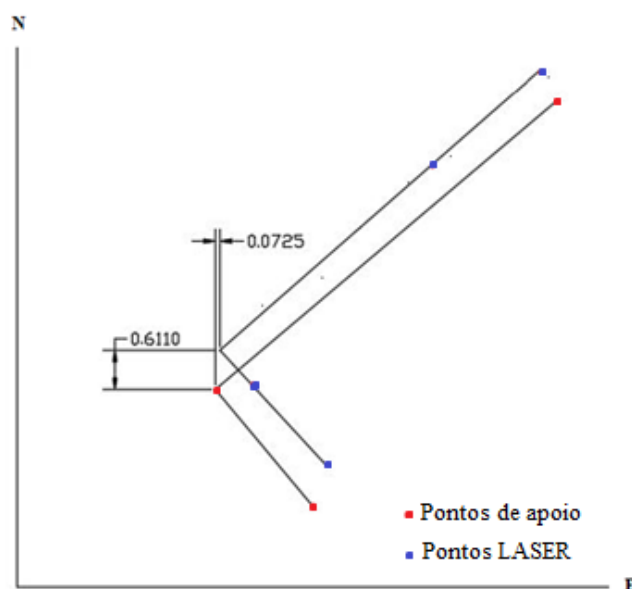
Figura 48 - Pontos da nuvem LASER para controle de qualidade planimétrico – “seção horizontal”.



A nuvem recortada e o conjunto de pontos de apoio que faziam parte da área foram então convertidos para formato *.las*, separadamente. No *Global Mapper*, foram abertos os dois arquivos *.las* e exportados para o formato *.dxf*, o qual foi aberto no software *AutoCAD 2018*.

Como o objetivo era encontrar as quinas das edificações, a partir de dois pontos da nuvem LASER de cada lado da edificação foram traçadas retas e, na interseção destas retas, obteve-se o ponto de coordenadas mais próximo do ponto de apoio coletado na quina das edificações, conforme exemplifica a Figura 49.

Figura 49 - Exemplo de interseção de retas no AutoCAD utilizando pontos de apoio como referência para a nuvem LASER.



A mesma técnica de interseção de retas foi empregada para as outras feições, obtendo-se um conjunto de coordenadas planimétricas da nuvem de pontos. Contudo, não foi possível obter a componente altimétrica devido à dificuldade de encontrar pontos na nuvem LASER que representassem o chão adequadamente e servissem de parâmetro para comparação com os pontos de controle.

A partir dos quatro pontos de quinas interpolados, obteve-se uma acurácia de 54,8 cm na componente E e aproximadamente 63 cm em N, com a nuvem ajustada pelo MMQ. O RMSE da resultante planimétrica da nuvem foi de 83,5 cm. A Tabela 9 apresenta a média, desvio padrão e o RMSE calculado para as componentes planimétricas pela interpolação de retas no *AutoCAD 2018*.

Tabela 9 - Controle de Qualidade Planimétrico: discrepâncias entre pontos de apoio no terreno e pontos da nuvem LASER com ajustamento.

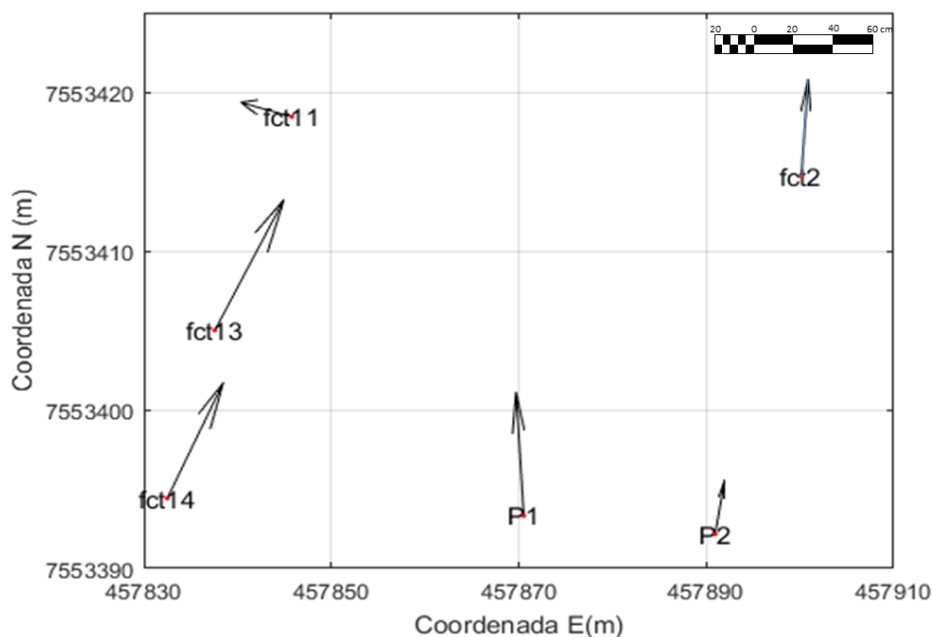
| <b>Pontos</b>        | <b><math>\Delta E</math> (m)</b> | <b><math>\Delta N</math> (m)</b> | <b>Resultante (m)</b> |
|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| fct2                 | 0,0725                           | 0,611                            | 0,615                 |
| P1                   | -0,083                           | 0,78                             | 0,784                 |
| P2                   | 0,102                            | 0,343                            | 0,358                 |
| fct11                | -0,549                           | 0,09                             | 0,556                 |
| fct13                | 0,737                            | 0,8225                           | 1,104                 |
| fct14                | 0,5955                           | 0,7265                           | 0,939                 |
| <b>Média</b>         | <b>0,145</b>                     | <b>0,562</b>                     | <b>0,726</b>          |
| <b>Desvio Padrão</b> | <b>0,467</b>                     | <b>0,288</b>                     | <b>0,271</b>          |
| <b>RMSE</b>          | <b>0,451</b>                     | <b>0,620</b>                     | <b>0,767</b>          |

No gráfico de vetores (Figuras 50), a partir da análise das discrepâncias das componentes planimétricas, do desvio padrão e da média, verifica-se claramente uma tendência em N, causada por erro sistemático. Para verificação, foi aplicada a análise de tendência pelo teste T-Student, em que as componentes foram avaliadas de forma individual, conforme Tabela 10. Na análise das duas componentes, a condição de  $T_{amostral}$  não atente ao intervalo de confiança, sendo a hipótese nula rejeitada, e portanto, a nuvem de dados não pode ser considerada livre de tendências significativas nas coordenadas testadas para um nível de confiança de 95%. Nesta análise, no entanto, a componente N mostrou uma tendência superior em relação a componente E. Na análise pela probabilidade estatística, a hipótese nula foi aceita para a componente E, e rejeitada pela componente N, reforçando a presença de tendência nesta componente.

Tabela 10 – Análise estatística T-Student para discrepâncias planimétricas - com ajustamento.

| Variável | Quantidade de amostras | Média | Desvio Padrão | Intervalo de Confiança (95%) | Estatística amostral ( $T_{amostral}$ ) | Probabilidade Estatística $\alpha = 0,05$ |
|----------|------------------------|-------|---------------|------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|
| E        | 6                      | 0,146 | 0,468         | (-0,345; 0,637)              | 0,76                                    | 0,480                                     |
| N        | 6                      | 0,562 | 0,288         | (0,260; 0,865)               | 4,78                                    | 0,005                                     |

Figura 50 - Gráfico de agulhas, para verificação de tendência no controle de qualidade planimétrico – nuvem de pontos com ajustamento.



Para os experimentos com a nuvem de pontos sem ajustamento, as análises indicaram um aumento nos erros nas componentes planimétricas em relação a nuvem com ajustamento. Na Tabela 11 são apresentados os resultados encontrados.

Tabela 11 - Controle de Qualidade Planimétrico: discrepâncias entre pontos de apoio no terreno e pontos da nuvem LASER sem ajustamento.

| Pontos               | $\Delta E$ (m) | $\Delta N$ (m) | Resultante   |
|----------------------|----------------|----------------|--------------|
| fct2                 | 0,101          | 0,562          | 0,571        |
| P1                   | -0,134         | 0,726          | 0,738        |
| P2                   | 0,043          | 0,267          | 0,270        |
| fct11                | -0,438         | 0,243          | 1,260        |
| fct13                | 0,721          | 0,802          | 1,078        |
| fct14                | 0,875          | 0,906          | 0,501        |
| <b>Média</b>         | <b>0.195</b>   | <b>0.584</b>   | <b>0.736</b> |
| <b>Desvio Padrão</b> | <b>0.506</b>   | <b>0.279</b>   | <b>0.339</b> |
| <b>RMSE</b>          | <b>0.501</b>   | <b>0.637</b>   | <b>0.811</b> |

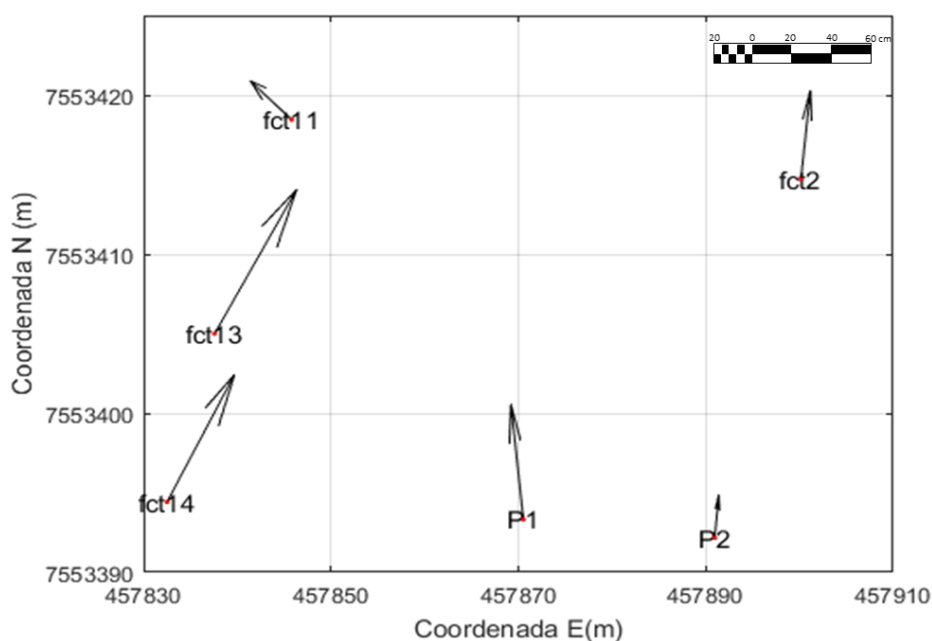
Na análise de tendência das duas componentes sem ajustamento, novamente a condição de  $T_{amostral}$  não atente ao intervalo de confiança, sendo a hipótese nula rejeitada, e

portanto, a nuvem de dados não pode ser considerada livre de tendências significativas nas coordenadas testadas para um nível de confiança de 95%. Na análise pela probabilidade estatística, a hipótese nula permanece aceita para a componente E, não indicando tendência, e rejeitada no que se refere a componente N, reforçando a tendência. As análises são apresentadas conforme Tabela 12 e Figura 51.

Tabela 12 - Análise estatística T-Student para discrepâncias planimétricas - sem ajustamento.

| Variável | Quantidade de amostras | Média | Desvio Padrão | Intervalo de Confiança (95%) | Estatística amostral ( $T_{amostral}$ ) | Probabilidade Estatística $\alpha = 0,05$ |
|----------|------------------------|-------|---------------|------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|
| E        | 6                      | 0,195 | 0,506         | (-0,336; 0,726)              | 0,94                                    | 0,389                                     |
| N        | 6                      | 0,584 | 0,279         | (0,292; 0,877)               | 5,13                                    | 0,004                                     |

Figura 51 - Gráfico de agulhas, para verificação de tendência no controle de qualidade planimétrico – nuvem de pontos sem ajustamento.



Os resultados obtidos do controle planimétrico mostram uma melhora dos dados da nuvem LASER com o refinamento da sincronização por meio do ajustamento pelo MMQ, em comparação com a nuvem LASER sem ajustamento. Contudo, as análises mostraram uma tendência planimétrica que pode ser explicada pela ausência de correção do

desalinhamento entre a IMU e o LASER (*boresight*), isto é, existe uma diferença angular não compensada que se reflete principalmente nas componentes planimétricas.

Como é de se esperar, os resultados do controle altimétrico foram melhores em relação aos planimétricos, devido ao desalinhamento angular entre os sensores afetar principalmente a posição planimétrica. Os resultados do controle de qualidade mostraram, portanto, que a nuvem com ajustamento pelo MMQ foi a que apresentou os melhores resultados nos experimentos com pontos de apoio, com cerca de 11,6 cm de acurácia na componente vertical (h), aproximadamente 45 cm na componente E, e 62 cm em N.

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um Sistema de Varredura a Laser embarcado em um VANT, em que a sincronização eletrônica entre os sensores não pôde ser utilizada, devido à problemas de comunicação entre os dispositivos. Assim, uma metodologia alternativa para obtenção da nuvem de pontos foi desenvolvida e testada, provando ser eficiente a partir da sincronização de dispositivos do sistema por meio da análise do sinal gerado pela trajetória do voo, considerando variáveis como distância (m) x tempo (s), e altitude (m) x tempo (s), dados originários da unidade LASER, responsável pela varredura LASER e do receptor GNSS, responsável pelos dados de posição do sistema, respectivamente.

Com relação à aplicação, a nuvem de dados LASER gerada a partir desta sincronização pelo sinal da trajetória apresenta acurácia altimétrica de 11,6 cm e acurácia planimétrica de 45 cm para a componente E e 62 cm para a componente N, com a resultante planimétrica de 76 cm. Esse resultado permite a utilização do sistema para aplicações em estudos florestais, quando comparado a sistemas similares e de maior custo, uma vez que pode ser empregado em pesquisas relacionadas à conservação e manejo florestal, monitoramento de recursos naturais e elaboração de inventário florestal, a partir da obtenção de parâmetros como densidade e altura de árvores, controle da degradação de florestas, bem como monitoramento de culturas.

Com relação à precisão do SVL embarcado em plataforma VANT, esta poderá ser melhorada a partir de refinamentos no sistema, aumento na coleta de pontos de apoio e melhorias no processamento de dados. Uma das recomendações deste trabalho, é que a metodologia empregada com o sistema, reconhecida como viável, seja automatizada, a fim de possibilitar a geração de nuvem de pontos de maior qualidade, e consequentemente, ser uma alternativa em situações em que a sincronização eletrônica dos dispositivos não seja possível. Para isso, a implementação de um processo de correlação pode possibilitar a automatização da etapa inicial da sincronização, realizada neste trabalho por inspeção visual.

No que concerne ao sistema, problemas como falhas nas gravações de dados, problemas com a solução *heading* e sincronização do tempo entre a unidade LASER e o tempo GPS, obtido pelo dispositivo IMU, obtiveram relativa melhora em relação ao sistema desenvolvido por Torres (2016). A inclusão de componentes como um microcomputador, uma antena GNSS, o receptor *FlexPak6* da NovAtel, além da montagem de um *payload* para

possibilitar maior segurança do sistema ao longo do voo, contribuíram para as melhorias do sistema.

Para a gravação de dados, dois microcomputadores *Raspberry Pi* passaram a ser utilizados, a fim de coletar dados LASER e dados inerciais, respectivamente. O *script* de decodificação do arquivo binário do LASER foi modificado e dados antes eliminados por problemas nos pacotes de dados, foram utilizados, aumentando a densidade de pontos dos arquivos. Entretanto, foi verificado por meio dos testes, que a falha na gravação de dados ainda existe quando decodificadas as informações. Assim, recomenda-se que seja feita uma verificação dos dados binários do arquivo. *idc* e uma possível recuperação e extração das informações aparentemente corrompidas.

No que se refere ao agrupamento do receptor *Flexpak6* à IMU e da inserção de uma segunda antena GNSS, não houve melhora significativa na solução *heading*, em relação aos dados processados por Torres (2016). Fatores que podem ter afetado estes resultados são o não alinhamento da IMU e a possível deformação e vibração da haste que suporta a antena GNSS. Portanto, recomenda-se para estudos futuros, que seja feito um alinhamento da IMU antes de iniciar execução do planejamento de voo e uma possível troca de material da haste.

Em relação à sincronização do tempo da unidade LASER e do tempo GPS dos dados do dispositivo IMU foi necessário obter uma diferença entre estes tempos, a fim de que o tempo dos dados LASER fosse corrigido em relação ao tempo GPS. Esse tempo GPS do LASER foi então, refinado por um  $\Delta t$  calculado pelo MMQ, por meio de implementação de um *script* em *Matlab*, que informava a correção a ser aplicada no tempo GPS do LASER, contribuindo para uma pequena melhora na nuvem de pontos gerada com correção, em relação à sem correção. Isto mostra que é possível trabalhar com estes sensores desacoplados, fazendo-se a sincronização posterior, desde que a velocidade do veículo seja pequena, como foi o caso estudado.

Tratando-se do controle de qualidade, é recomendado que para experimentos futuros seja coletada maior quantidade de pontos de apoio para o controle altimétrico e planimétrico, a fim de uma distribuição homogênea na área, além de novos testes utilizando os *softwares Cloud Compare, Fugro Viewer e LasTools*.

Como nesta pesquisa foi apresentado um breve estudo de calibração para o sistema, anterior ao controle de qualidade, recomenda-se que este seja aprofundado em trabalhos futuros, bem como o desenvolvimento de metodologias de calibração que possam

auxiliar na melhora da qualidade de dados LASER e que utilizem o tempo como uma importante variável a ser considerada na sincronização dos dados.

No que se refere à trabalhos desenvolvidos com sistemas similares, observa-se uma melhora na acurácia altimétrica do sistema desenvolvido nesta pesquisa, quando comparada com a obtida por Wallace et al. (2012.a), apresentando uma diferença de 2,4 cm. Na comparação com os resultados obtidos por Torres (2016), verifica-se uma melhora de 8,4 cm em altimetria. Como não foi realizada a determinação dos ângulos de *boresight*, não foi observada melhora na qualidade planimétrica deste trabalho.

Apesar das dificuldades impostas nas diferentes etapas do projeto, a alternativa de sincronização por pós-processamento para dispositivos desacoplados de um SVL embarcado em VANT se mostrou viável, quando comparada a sistemas similares que utilizam técnicas de sincronização eletrônica. Portanto, essa técnica associada ao SVL de baixo custo, com precisão centimétrica, pode ser empregada em diversas aplicações, dentre as quais estão pesquisas florestais.

## REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, F. Airborne laser scanning—present status and future expectations. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing**, v. 54, n. 2, p. 64–67, 1999.
- ADLER, B.; XIAO, J.; ZHANG, J. Autonomous exploration of urban environments using unmanned aerial vehicles. **Journal of Field Robotics**, v. 31, n. 6, p. 912–939, 2014.
- BALTSAVIAS, E. P. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2–3, p. 199–214, 1999.b.
- BALTSAVIAS, E.P. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote sensing**, v. 54, n. 2, p. 164–198, 1999.a.
- BANG K; HABIB, A.; MÜLLER, M. LIDAR System Calibration Using Overlapping Strips. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 5, 2009.
- BANG, K. **Alternative methodologies for LiDAR system calibration**. 2010. Tese de Doutorado. University of Calgary, Calgary, 2010.
- CSANYI, N; TOTH, C.K. Improvement of LIDAR data accuracy using LIDAR-specific ground targets. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 73, n. 4, p. 385–396, 2007.
- CLOUDCOMPARE. **Cloudcompare - User Manual, version 2.6.1. 2015**. Disponível em: <http://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>. Acesso em: 08 de fevereiro de 2018.
- DE LIMA, S.R.S. **Integração GPS/INS utilizando sensores inerciais baseados em sistemas microeletromecânicos (MEMS)**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2005.
- EISENBEISS, H. A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 5/W1, p. 1–7, 2004.
- EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital Terrain Modeling: Acquisition, Manipulation and Applications (Artech House Remote Sensing Library)**. Norwood, MA: Artech House, 2005. 257 p.
- EVERAERTS, J.; LEWYCKYJ, N.; FRANSAER, D. Pegasus: design of a stratospheric long endurance UAV system for remote sensing. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 35, n. Part B, 2004.
- GALO, M. **Notas de aula – Fotogrametria III**. Departamento de Cartografia. FCT – Unesp, Presidente Prudente – SP, 2012.
- GEMAEL, Camil. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Editora UFPR, 1994. 319 p.
- GLENNIE, C.; BROOKS, B.; ERICKSEN, T.; HAUSER, D.; HUDNUT, K.; FOSTER, J.; A, J. Compact multipurpose mobile laser scanning system—Initial tests and results. **Remote Sensing**, v. 5, n. 2, p. 521–538, 2013.

GUO, Q.; SU, Y.; HU, T.; ZHAO, X.; WU, F.; LI, Y.; LIU, J.; CHEN, L.; XU, G.; LIN, G.; ZHENG, Y.; LIN, Y.; MI, X.; FEI, L.; WANG, X. An integrated UAV-borne LIDAR system for 3D habitat mapping in three forest ecosystems across China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 8–10, p. 2954–2972, 2017.

HABIB, A., BANG, K. I., KERSTING, A. P., CHOW, J. Alternative methodologies for LiDAR system calibration. **Remote Sensing**, v.2, n.3, p. 874-907, 2010.

HABIB, A.; BANG, K.; KERSTING, AP. Impact of LIDAR System Calibration on the Relative and Absolute Accuracy of derived Point Cloud. **CGC10**, 2010.

HABIB, A.; RENS, J. Quality assurance and quality control of LIDAR systems and derived data. In: **Advanced LIDAR Workshop**, University Of Northern Iowa, 2007.

HYYPÄ, J.; HYYPPÄ, H.; LITKEY, P.; YU, X.; HAGGREN, H.; RONNHOLM, P.; PYYSALO, U.; PITKANEN, J.; MALTAMO, M. Algorithms and methods of airborne laser scanning for forest measurements. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 36, n. 8, p. 82–89, 2004.

IBEO AUTOMOTIVE. **Operating Manual Ibeo LUX 2010 Laserscanner**. Ibeo Automobile Sensor GmbH, 2010.

JAAKKOLA, A.; HYYPPÄ, J.; KUKKO, A.; YU, X.; KAARTINEN, H.; LEHTOMALI, M.; LIN, Y. A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 65, n. 6, p. 514–522, 2010.

JAAKKOLA, A. **Low-cost Mobile Laser Scanning and its Feasibility for Environmental Mapping**. 2015. Tese de Doutorado. Aalto University, Aalto, 2015.

JOHNSON, P. **Unmanned aerial vehicle as the platform for lightweight laser sensing to produce sub-meter accuracy terrain maps for less than \$5/km<sup>2</sup>**. Report. Mechanical Engineering Department Columbia University. 48 p. 2006.

KERSTING, A. P. B. **Quality assurance of multi-sensor systems**. 2012. Tese de Doutorado, University of Calgary, Calgary, 2012.

KRAUS, K., WALDHÄUSL, P. **Photogrammetry: Fundamentals and Standard Processes**, 1. Dümmler Verlag, Bonn, 1994. 397 p.

KRAUS, K. **Photogrammetry: Geometry from images and laser scans**. Walter de Gruyter, Berlin, 2007. 477 p.

KRAUS, K.; PFEIFER, N. Advanced DTM generation from LIDAR data. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 34, n. 3/W4, p. 23–30, 2001.

KUHNERT, K.D.; KUHNERT, L. Light-weight sensor package for precision 3D measurement with micro UAVs EG power-line monitoring. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 40, p. 235–240, 2013.

KUKKO, A; HYYPPÄ, J. Laser scanner simulator for system analysis and algorithm development: A case with forest measurements. *In: ISPRS Workshop on Laser Scanning*, 2007.

LAStools. **LAScontrol**. 2017. Disponível em: [https://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/download/lascontrol\\_README.txt](https://www.cs.unc.edu/~isenburg/lastools/download/lascontrol_README.txt). Acesso em: 08 de fevereiro de 2018.

LEFSKY, M.; COHEN, W. B.; ACKER, A.A.; PARKER, G.G; SPIES, T.A; HARDING, D.. LIDAR remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 70, n. 3, p. 339–361, 1999.

LIN, Y; HYYPPA, J; JAAKKOLA, A. Mini-UAV-borne LIDAR for fine-scale mapping. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 8, n. 3, p. 426–430, 2011.

MALLET, C; BRETAR, F. Full-waveform topographic LIDAR: State-of-the-art. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 64, n. 1, p. 1-16, 2009.

MAY, N.; TOTH, C. Point positioning accuracy of airborne LIDAR systems: A rigorous analysis. *In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v 36, p.107–111, 2007.

MISRA, P.; ENGE. P. **Global Positioning System Signals, Measurements, and Performance**, Ganga-Jamuna Press, Lincoln, MA. 2001.

MONICO, J. F. G. **High precision inter-continental GPS network**. 1995. Tese de Doutorado, University of Nottingham, Nottingham, 1995.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. Editora Unesp, 2007, 480 p.

MONTAGHI, A.; CORONA, P.; DALPONTE, M.; GIANELLE, D; CHIRICI, G., OLSSON, H. Airborne laser scanning of forest resources: an overview of research in Italy as a commentary case study. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 23, p. 288–300, 2013.

MORIN, K. W. **Calibration of Airborne Laser Scanners**. 2002. Tese de Doutorado, University of Calgary, Calgary, 2002.

MOSTAFA, M.M.; SCHWARZ, K.P. Digital image georeferencing from a multiple camera system by GPS/INS. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 56, n. 1, p. 1-12, 2001.

NAGAI, M.; CHEN, T.; SHIBASAKI, R.; KUMAGAI, H., AHMED, A. UAV-borne 3-D mapping system by multisensor integration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 3, p. 701–708, 2009.

NOVATEL Inc. **SPAN-IGM-S1 Product Sheet**. Version 3, 2014. Disponível em: <[http://www.novatel.com/assets/Documents/Papers/SPAN-IGM-S1-PS\\_2.pdf](http://www.novatel.com/assets/Documents/Papers/SPAN-IGM-S1-PS_2.pdf)>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2017.

PFEIFER, N; BRIESE, C. Geometrical aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning. *In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 36, n. 3/W52, p. 311–319, 2007.

POLEZEL, W.G.C; DE SOUZA, E.M.; MONICO, J. F. G. Método de posicionamento relativo por satélite GPS com correção do efeito do multicaminho em estações de referência: formulação matemática, resultados e análises. **Trends in Applied and Computational Mathematics**, v. 9, n. 1, p. 133–142, 2008.

POREBA, M. Use of integrated GPS and INS systems in aerial photogrammetry. **Geomatics and Environmental Engineering**, v. 5, p. 79–87, 2011.

RASPBERRY PI. Compute Module **Datasheet**, 2016. Disponível em: [https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/computemodule/RPI-CM-DATASHEET-V1\\_0.pdf](https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/computemodule/RPI-CM-DATASHEET-V1_0.pdf). Acesso em: 04 de fevereiro de 2018.

RASPBERRY PI. **Introducing the Raspberry Pi 2 - Model B**, 2016. Disponível em: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/introducing-the-raspberry-pi-2-model-b.pdf>. Acesso em: 04 de fevereiro de 2018.

RIEGL. **RIEGL VQ-780i Datasheet**. 2017. Disponível em: [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegl/downloads/RIEGL\\_VQ-780i\\_DataSheet\\_2017-12-04\\_Preliminary.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegl/downloads/RIEGL_VQ-780i_DataSheet_2017-12-04_Preliminary.pdf). Acesso em: 27 de março de 2018.

SCHENK, T. Photogrammetry and LASER altimetry. *In: The International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 32, n. Part 3, p. W14, 1999.

SCHWARZ, K.P.; MARTELL, H. E., EL-SHEIMY, N., LI, R., CHAPMAN, M. A., COSANDIER, D. VIASAT-A mobile highway survey system of high accuracy. *In: Vehicle Navigation and Information Systems Conference*, p. 476-481, 1993.

SCHWARZ, K.P; WEI, M. INS/GPS integration for geodetic applications. **Lecture Notes ENGO**, v. 623, 2000.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods, and applications**. Walter de Gruyter, 2003. 692 p.

SHAN, J.; TOTH, C. K. **Topographic laser ranging and scanning: principles and processing**. CRC press, 2008, 593 p.

ŠKALOUD, J. **Optimizing georeferencing of airborne survey systems by INS/DGPS**. University of Calgary, 1999.

SKALOUD, J.; LICHTI, D. Rigorous approach to bore-sight self-calibration in airborne laser scanning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 61, n. 1, p. 47-59, 2006.

SKOVSGAARD, J.P.; VANCLAY, J. K. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, v. 81, n. 1, p. 13–31, 2008.

TOMMASELLI, A. M. G.; TORRES, F. M. A light-weight laser scanner for UAV applications. *In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v.41, p711-715, 2016.

TORRES, F.M. **Montagem e avaliação de um sistema de varredura a LASER embarcado em VANT**. 2016. Dissertação de Mestrado em Ciências Cartográficas. Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2016.

VOSSELMAN, G.; MAAS, H-G. Adjustment and filtering of raw laser altimetry data. *In: Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Terrain Models*, Estocolmo, Suécia. 2001.

VOSSELMAN, G; MAAS, H-G. **Airborne and terrestrial laser scanning**. CRC Press, 2010. 442 p.

WALLACE, L.; LUCIEER, A.; WATSON, C.; TURNER, D. Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. **Remote Sensing**, v. 4, n. 6, p. 1519-1543, 2012.

WALLACE, L.; LUCIEER, A.; WATSON, C. Assessing the feasibility of UAV-based LIDAR for high resolution forest change detection. *In: The 12th Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012.

WALLACE, L. Assessing the stability of canopy maps produced from UAV-LIDAR data. *In: Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2013.

WARD, P. W., BETZ, J. W.; HEGARTY C. J. Satellite Signal Acquisition, Tracking and Data Demodulation. *In: Understanding GPS Principles and Applications*, 2nd ed, Norwood, MA: Artech House, p. 153–241, 2006.

WEHR, A; LOHR, U. Airborne laser scanning—an introduction and overview. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2, p. 68–82, 1999.

WOODMAN, O. J. **An introduction to inertial navigation**. 2007. Tese de Doutorado, University of Cambridge, Cambridge, 2007.

**APÊNDICE A – Trecho do arquivo de “Processamento de dados Inerciais”.**

Project: 2017\_04\_30  
Program: Inertial Explorer Version 8.60.6717  
Profile: LDS  
Source: GNSS/INS Epochs(Smoothed TC Combined)  
ProcessInfo: 2017\_04\_30 by Unknown on 5/10/2017 at 18:57:49  
Datum: WGS84, (processing datum)  
Master 1: Name PPTE, Status ENABLED  
Antenna height 0.002 m, to ARP [TRM59800.00(NONE)]  
Position -22 07 11.65710, -51 24 30.72251, 431.050 m (WGS84, Ellipsoidal hgt)  
Remote: Antenna height 0.000 m, to L1PC [Generic(NONE)]  
IMU to GNSS Antenna Lever Arms:  
x=0.065, y=0.953, z=0.018 m (x-right, y-fwd, z-up)  
Body to Sensor Rotations:  
xRot=0.000, yRot=0.000, zRot=180.000 degrees (Rotate IMU into Vehicle Frame)  
IMU->Secondary Sensor Lever Arms:  
x=-0.078, y=0.290, z=-0.058 m (x-right, y-fwd, z-up, IMU->SENSOR)  
Map projection Info:  
Defined grid: UTM, Zone 22  
UTM Zone: 22  
SD Scaling Settings:  
Position: 1.0000  
Velocity: 1.0000  
Attitude: 1.0000  
W-P-K Settings:  
System: Map (UTM, Zone 22)  
Order: W primary, P secondary, K-tertiary  
Axes: User (TX=0.0, TY=0.0, TZ=0.0 deg)  
Boresight: On (BX=0.00000, BY=0.00000, BZ=0.00000 deg)

| SeqNum | Week    | GPSTime     | Latitude        | Longitude       | H-Ell   |
|--------|---------|-------------|-----------------|-----------------|---------|
|        | (weeks) | (HMS)       | (+/-D M S)      | (+/-D M S)      | (m)     |
| 0      | 1946    | 18:56:58.00 | -22 07 26.46802 | -51 24 30.75962 | 438.939 |
| 1      | 1946    | 18:56:58.02 | -22 07 26.46802 | -51 24 30.75962 | 438.939 |
| 2      | 1946    | 18:56:58.04 | -22 07 26.46802 | -51 24 30.75962 | 438.939 |
| 3      | 1946    | 18:56:58.06 | -22 07 26.46802 | -51 24 30.75962 | 438.939 |
| 4      | 1946    | 18:56:58.08 | -22 07 26.46802 | -51 24 30.75962 | 438.939 |
| 5      | 1946    | 18:56:58.10 | -22 07 26.46802 | -51 24 30.75962 | 438.939 |
| 6      | 1946    | 18:56:58.12 | -22 07 26.46802 | -51 24 30.75962 | 438.939 |
| 7      | 1946    | 18:56:58.14 | -22 07 26.46802 | -51 24 30.75962 | 438.939 |

[illegible]

| Omega<br>(deg) | Phi<br>(deg)  | Kappa<br>(deg) | OmPhSD<br>(deg) | KappaSD<br>(deg) |
|----------------|---------------|----------------|-----------------|------------------|
| 1.0506743636   | -0.0347011098 | 220.4026004959 | 0.0198475752    | 0.1839870065     |
| 1.0504560622   | -0.0344735968 | 220.4022136045 | 0.0198439499    | 0.1839834452     |
| 1.0501659505   | -0.0345739273 | 220.4018949626 | 0.0198403233    | 0.1839798838     |
| 1.0498226612   | -0.0345716109 | 220.4020649612 | 0.0198366973    | 0.1839763373     |
| 1.0496750082   | -0.0345076158 | 220.4023927423 | 0.0198330701    | 0.1839727610     |
| 1.0493407784   | -0.0344730743 | 220.4024644027 | 0.0198294428    | 0.1839692146     |
| 1.0492909550   | -0.0346718433 | 220.4030514199 | 0.0198258136    | 0.1839656532     |
| 1.0494244123   | -0.0348183948 | 220.4032654150 | 0.0198221843    | 0.1839620918     |

| Roll<br>(deg) | Pitch<br>(deg) | Heading<br>(deg) | RollSD<br>(deg) | PitchSD<br>(deg) | HdngSD<br>(deg) |
|---------------|----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| 0.7074650000  | -0.7775890000  | 139.7467830000   | 0.0140457004    | 0.0140230004     | 0.1839870065    |
| 0.7071450000  | -0.7775750000  | 139.7471700000   | 0.0140431384    | 0.0140204355     | 0.1839834452    |
| 0.7070290000  | -0.7772930000  | 139.7474920000   | 0.0140405744    | 0.0140178706     | 0.1839798838    |
| 0.7068070000  | -0.7770310000  | 139.7473250000   | 0.0140380114    | 0.0140153058     | 0.1839763373    |
| 0.7066670000  | -0.7769560000  | 139.7469980000   | 0.0140354475    | 0.0140127400     | 0.1839727610    |
| 0.7064250000  | -0.7767230000  | 139.7469290000   | 0.0140328836    | 0.0140101742     | 0.1839692146    |
| 0.7065520000  | -0.7765490000  | 139.7463440000   | 0.0140303187    | 0.0140076065     | 0.1839656532    |
| 0.7067530000  | -0.7765530000  | 139.7461300000   | 0.0140277529    | 0.0140050398     | 0.1839620918    |

## APÊNDICE B – Arquivo .csv\*

"PACKET\_START"

# scan number, number of scan points, angle ticks, start angle, end angle, scan\_start, scan\_end

# LIST OF SCAN POINT DATA:

# point ID, layer, echo, angle, vertical scan angle(radian),

# horizontal scan angle(radian), distance(m), width(cm)

# IF POINT DOES NOT PASS SANITY CHECK:

# point ID, layer, echo, angle, vertical scan angle(radian),

# horizontal scan angle(radian), distance, width(cm) DROP

#####

2017-07-14\_16-34-09,"192.168.0.242","12002"

PACKET\_START

8826,"461","11520","960",-960,"07:02:2036-03:43:49:621.899343241","07:02:2036-03:43:49:635.23234791"

1,"2","0","960","0.00698132","0.52359878","0.18","172"

2,"3","0","960","0.02094395","0.52359878","0.17","180"

3,"0","0","952",-0.02094395,"0.51923545","0.1","168"

4,"1","0","952",-0.00698132,"0.51923545","0.07","176"

5,"2","0","944","0.00698132","0.51487213","0.13","164"

6,"3","0","944","0.02094395","0.51487213","0.14","160"

7,"0","0","936",-0.02094395,"0.51050881","0.03","164"

8,"1","0","936",-0.00698132,"0.51050881","0.1","152"

9,"2","0","928","0.00698132","0.50614548","0.22","176"

10,"3","0","928","0.02094395","0.50614548","0.17","180"

11,"0","0","920",-0.02094395,"0.50178216","0.1","168"

**APÊNDICE C – Arquivo da nuvem de pontos LASER para ordenação do pacote de dados e interpolação de tempo.**

|      |    |   |   |          |          |      |     |          |
|------|----|---|---|----------|----------|------|-----|----------|
| 8826 | 1  | 2 | 0 | 0.006981 | 0.523599 | 0.18 | 172 | 20629.63 |
| 8826 | 2  | 3 | 0 | 0.020944 | 0.523599 | 0.17 | 180 | 20629.63 |
| 8826 | 3  | 0 | 0 | -0.02094 | 0.519235 | 0.1  | 168 | 20629.62 |
| 8826 | 4  | 1 | 0 | -0.00698 | 0.519235 | 0.07 | 176 | 20629.62 |
| 8826 | 5  | 2 | 0 | 0.006981 | 0.514872 | 0.13 | 164 | 20629.63 |
| 8826 | 6  | 3 | 0 | 0.020944 | 0.514872 | 0.14 | 160 | 20629.63 |
| 8826 | 7  | 0 | 0 | -0.02094 | 0.510509 | 0.03 | 164 | 20629.62 |
| 8826 | 8  | 1 | 0 | -0.00698 | 0.510509 | 0.1  | 152 | 20629.62 |
| 8826 | 9  | 2 | 0 | 0.006981 | 0.506145 | 0.22 | 176 | 20629.63 |
| 8826 | 10 | 3 | 0 | 0.020944 | 0.506145 | 0.17 | 180 | 20629.63 |
| 8826 | 11 | 0 | 0 | -0.02094 | 0.501782 | 0.1  | 168 | 20629.62 |
| 8826 | 12 | 1 | 0 | -0.00698 | 0.501782 | 0.04 | 168 | 20629.62 |
| 8826 | 13 | 2 | 0 | 0.006981 | 0.497419 | 0.14 | 164 | 20629.63 |
| 8826 | 14 | 3 | 0 | 0.020944 | 0.497419 | 0.14 | 156 | 20629.63 |
| 8826 | 15 | 0 | 0 | -0.02094 | 0.493056 | 0.03 | 160 | 20629.62 |
| 8826 | 16 | 1 | 0 | -0.00698 | 0.493056 | 0.1  | 152 | 20629.62 |
| 8826 | 17 | 2 | 0 | 0.006981 | 0.488692 | 0.22 | 176 | 20629.63 |

\*Conforme Torres ( 2016), as variáveis são referentes à: número do pacote de varredura, identificação do ponto, número da camada, número de retorno, ângulo vertical (radianos), ângulo horizontal (radianos), distância (m), largura do pulso (cm), tempo (segundos).

### APÊNDICE D – Pontos de Apoio – GNSS.

Pontos de apoio obtidos pelo rastreo GNSS.

| Pontos | E (m)      | N (m)       | h (m)   | $\sigma_{XY}$ | $\sigma_Z$ |
|--------|------------|-------------|---------|---------------|------------|
| P1     | 457870.540 | 7553393.319 | 440.476 | 0.001         | 0.003      |
| P2     | 457890.959 | 7553392.157 | 439.356 | 0.001         | 0.003      |
| P3     | 457862.355 | 7553435.430 | 438.978 | 0.001         | 0.003      |
| P4     | 457853.856 | 7553410.715 | 439.100 | 0.001         | 0.003      |
| P5     | 457840.192 | 7553398.010 | 438.985 | 0.002         | 0.004      |

### APÊNDICE E – Pontos de Apoio – Estação Total.

Pontos de apoio obtidos pelo levantamento com Estação Total.

| Pontos         | E (m)      | N (m)       | h (m)   |
|----------------|------------|-------------|---------|
| RÉ - P46       | 457856.754 | 7553362.151 | 438.604 |
| VANTE - P48    | 457875.508 | 7553369.174 | 438.143 |
| AUXILIAR - fct | 457856.671 | 7553388.682 | 440.848 |
| fct1           | 457900.160 | 7553414.686 | 437.731 |
| fct2           | 457900.158 | 7553414.691 | 439.531 |
| fct3           | 457905.494 | 7553419.195 | 439.549 |
| fct4           | 457905.493 | 7553419.195 | 437.749 |
| fct5           | 457901.683 | 7553412.868 | 439.521 |
| fct6           | 457901.683 | 7553412.868 | 437.719 |
| fct7           | 457898.580 | 7553414.782 | 439.512 |
| fct8           | 457898.583 | 7553414.779 | 439.971 |
| fct9           | 457837.496 | 7553412.824 | 441.538 |
| fct10          | 457837.492 | 7553412.829 | 439.186 |
| fct11          | 457845.812 | 7553418.443 | 441.538 |
| fct12          | 457845.811 | 7553418.447 | 439.188 |
| fct12          | 457845.811 | 7553418.447 | 439.188 |
| fct13          | 457837.572 | 7553404.988 | 443.113 |
| fct14          | 457832.507 | 7553394.418 | 443.080 |
| fct15          | 457837.760 | 7553405.271 | 439.278 |
| fct16          | 457832.409 | 7553394.085 | 439.270 |
| fct17          | 457839.027 | 7553409.653 | 439.340 |
| fct18          | 457853.113 | 7553411.158 | 439.346 |
| fct19          | 457862.456 | 7553435.460 | 439.324 |
| fct20          | 457859.582 | 7553355.317 | 438.616 |
| fct21          | 457848.360 | 7553351.026 | 438.533 |

**APÊNDICE F – Processo para geração da nuvem de pontos.**