



Fernanda Magri Torres

**Montagem e Avaliação de um Sistema de Varredura a
LASER embarcado em VANT**



Presidente Prudente

2016

Fernanda Magri Torres

**Montagem e Avaliação 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 Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli

Presidente Prudente

2016

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI
(ORIENTADOR)



Prof. Dr. ROBERTO DA SILVA RUY
(SENSORMAR)



Prof. Dr. MAURICIO GALO
(UNESP/FCT)



FERNANDA MAGRI TORRES

Presidente Prudente (SP), 31 de março de 2016.

Resultado: APROVADO.

DEDICATÓRIA

*À minha amada família
que sempre me incentivou,
apoiou e acreditou em mim.*

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro durante o desenvolvimento da pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento da pesquisa.

À empresa SensorMap pelo suporte durante todo o desenvolvimento da pesquisa; ao engenheiro cartógrafo Thiago Tiedtke pela paciência em compartilhar seu conhecimento relativo a sistemas inerciais e comunicação entre *hardwares* envolvidos; ao Alexandre e Ricardo que se disponibilizaram a auxiliar nos planejamentos de campo e montagem da plataforma VANT, mesmo de última hora, assistindo também em soluções em campo para imprevistos com o sistema.

Ao profissional de computação, Rogério Oyama, pelas soluções em implementação do sistema.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli, exemplo de dedicação e amor à profissão, por sua exímia orientação, paciência e empenho com a pesquisa, pelos ensinamentos profissionais e pessoais oferecidos, por todo o conhecimento proporcionado e pelo apoio e suporte em cada dificuldade encarada durante o desenvolvimento da pesquisa, encorajando e incentivando a sempre querer buscar o melhor.

Aos colegas do PPGCC, em especial aos colegas do grupo de pesquisa Marcus, Gabi, Adilson, Mariana, Raquel e Henrique, por estarem sempre dispostos a ajudar, seja em atividades de campo ou em soluções de implementação, pelo apoio moral e incentivo sempre.

À UNESP, por toda a estrutura e corpo docente capacitado que tive a honra de conhecer e conviver, tanto durante a graduação quanto na pós-graduação, me proporcionando uma formação de qualidade que levarei para o resto de minha vida.

Aos professores do Departamento de Cartografia e do PPGCC, pelos conhecimentos transmitidos.

À banca de qualificação e da defesa, pelas sugestões e contribuição no trabalho.

Ao meu irmão, Renan, colega de profissão, exemplo de caráter e de profissional, que sempre esteve pronto a auxiliar com assuntos técnicos e novas soluções, por toda troca de conhecimento, amparo e amizade.

RESUMO

Com o avanço da tecnologia, sistemas de varredura a LASER vêm sendo cada vez mais utilizados como alternativa e, principalmente, como fonte de dados complementar aos procedimentos fotogramétricos convencionais em atividades de mapeamento e estudos ambientais. Os principais motivos que incentivaram o uso de sistemas a varredura a LASER para fins de mapeamento são o levantamento tridimensional da cena e a característica de “penetração” do sinal na vegetação. Apesar destas vantagens, o custo de sistemas de varredura a LASER e das missões de aerolevanteamento é alto. Estudos que dependem de Sensoriamento Remoto aéreo com alta frequência temporal são muitas vezes limitados, pois os métodos convencionais aéreos com veículos tripulados são geralmente caros e, assim, não são acessíveis para estudos detalhados que requerem informação de séries temporais de pequenas áreas. Para estas situações, a nova tecnologia baseada em VANT pode ser uma alternativa viável e de baixo custo. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e avaliação de uma plataforma de mapeamento de baixo custo, composta por um sistema de varredura a LASER embarcado em VANT, destacando-se as etapas de integração e sincronização do sistema de varredura a LASER com os sistemas de posicionamento e navegação integrados, a aquisição e processamento dos dados e a interpretação e análise dos resultados visando avaliar a precisão obtida e a aplicabilidade do sistema em áreas de florestas. Para a avaliação do sistema foram realizados experimentos em duas áreas distintas com diferentes alturas de voo, comprovando-se que esta tecnologia pode ser usada para a geração de dados tridimensionais.

Palavras-chave: Sistema de Varredura a LASER, Sistema de posicionamento e navegação, SVLA, VANT.

ABSTRACT

Technology development has improving the use of LASER scanning systems as an alternative and, mainly, as a complementary data source to conventional photogrammetric procedures in mapping and environmental study activities. The main reasons that encouraged the use of LASER scanning systems for mapping purposes are the three-dimensional surveying of the scene and the characteristic of signal penetration in vegetation. Despite these advantages, costs of LASER scanning systems and airborne surveying missions are high. Studies that depend on aerial Remote Sensing with high temporal frequency are often limited because aerial conventional methods with manned aircrafts are generally expensive and so are affordable for detailed studies of small areas requiring temporal series information. For these situations, the new lightweight UAV-based technology can be a viable and cost effective alternative. This work deals with the development and evaluation of a low cost mapping platform composed by a LASER scanning system boarded in a small UAV, highlighting the steps of integration and synchronization of the LASER scanning system with the positioning and navigation systems integrated, the acquisition and processing of data and the interpretation and analysis of the results obtained to evaluate the precision and applicability of the system in forest areas. Experimental assessment was done in two areas with different flight heights and the results were compatible with the required accuracy.

Keywords: LASER scanning system, positioning and navigation system, ALS, UAV.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Medida de distância pelo tempo de propagação do sinal LASER.	24
Figura 2: Ângulos de atitude (rolagem (r - roll) – em torno do eixo x; arfagem (p - pitch) – em torno do eixo y; guinada (y – yaw) – em torno do eixo z) da aeronave.	27
Figura 3: Mecanismos de varredura a LASER e padrões de varredura gerados.	29
Figura 4: Ângulo de divergência do pulso LASER e diâmetro do ponto projetado.	32
Figura 5: Relação entre o ângulo de abertura e a largura da faixa de varredura.	32
Figura 6: Múltiplos retornos de um pulso LASER.	33
Figura 7: Sistemas referenciais envolvidos num levantamento por SVL.	35
Figura 8: Exemplo de alvo para controle de qualidade de dados LASER.	42
Figura 9: Disposição dos alvos na nuvem de pontos LiDAR.	43
Figura 10: Alvo LiDAR retrorreflexivo hexagonal e retrorrefletor de bicicleta utilizados.	44
Figura 11: Retornos de intensidade de um alvo LiDAR retrorreflexivo hexagonal a partir de várias densidades de pontos LiDAR: (a) 27,2 pontos/m ² , (b) 7,5 pontos/m ² , e (c) 2,2 pontos/m ²	44
Figura 12: Exemplo de alvo identificado nas imagens de distância (a) e de intensidade (b), interpoladas para o controle de qualidade.	45
Figura 13: IMU NovAtel SPAN-IGM-S1.	47
Figura 14: FlexPak6 integrado à SPAN-IGM-S1.	48
Figura 15: Ibeo LUX 2010 com suas dimensões; e Ibeo LUX instalado em veículo terrestre para direção autônoma.	48
Figura 16: Interior do Ibeo LUX.	49
Figura 17: Detecção de objetos a partir da tecnologia multicamada.	50
Figura 18: Aplicação do Ibeo LUX na direção autônoma de veículos terrestres; classificação dos objetos em tempo real pelo software.	50
Figura 19: Informação de largura do pulso e múltiplos retornos de um pulso LASER.	51
Figura 20: Abrangência de varredura das camadas (vista de cima).	53
Figura 21: Abertura vertical do Ibeo LUX 2010 e suas quatro camadas de varredura.	53
Figura 22: Resolução angular diferindo por setores.	54
Figura 23: Sobre a resolução angular entre camadas.	54
Figura 24: <i>Raspberry</i> PC do projeto (a) e partes do <i>Raspberry</i> Pi 2 (b).	56
Figura 25: VANT SX8.	57
Figura 26: Caixa de conexão desenvolvida pela SensorMap.	57

Figura 27: Formato NTP Timestamp.....	60
Figura 28: Indicação do botão presente no corpo do Raspberry.	63
Figura 29: Conversão Sinal PPS para sincronização de tempo.	67
Figura 30: Diagrama de conexões entre os componentes do sistema desenvolvido.	68
Figura 31: Sistema montado e suas conexões.	69
Figura 32: Sistema montado em plataforma terrestre.....	69
Figura 33: Esquema da montagem do sistema em plataforma VANT.	70
Figura 34: Diagrama explicativo da solução inicial do processamento implementada.....	76
Figura 35: Orientação recomendada do sistema da unidade LASER em veículos.	80
Figura 36: MDL Dynascan M150.	87
Figura 37: Fachada principal da edificação levantada nos testes de varredura a LASER.....	87
Figura 38: Croqui de localização das dependências da ASA.	87
Figura 39: Configuração de instalação do SVL para levantamento terrestre.	89
Figura 40: Vistas da nuvem de pontos obtida de edificação isolada: (a) vista perspectiva; (b) vista de cima.....	90
Figura 41: Nuvem de pontos de referência obtida com o M150.	91
Figura 42: Sobreposição da nuvem de referência sobre a nuvem de pontos obtida com o Ibeo LUX: vista perspectiva (a); e vista de cima (b).....	91
Figura 43: Destaque para o deslocamento entre as representações da parede lateral da edificação.....	92
Figura 44: Vista aérea do estacionamento do Santuário “Morada de Deus” com destaque para a área sobrevoada (a) e croqui de localização (b).	93
Figura 45: Nuvem de pontos obtida de voo sobre o estacionamento do Santuário “Morada de Deus”: colorida de acordo com a elevação dos pontos (a), colorida por faixa de voo (b) e perfil com destaque para uma área onde há a presença de uma edificação (c)..	94
Figura 46: Diferença de retornos LASER em área de pavimento a diferentes alturas de voo: uma faixa de voo a 100 m de altura (a) e a mesma área sobrepondo-se a faixa a 100 m de altura de voo à “faixa de pouso” – com altura de voo decrescente (b).	95
Figura 47: Perfil da nuvem de pontos obtida da área de eucaliptos.	96
Figura 48: Localização dos pontos utilizados para o controle de qualidade altimétrico da nuvem gerada.	97
Figura 49: Pontos de quina de telhado identificados para cálculo das discrepâncias e o croqui de localização da edificação.	99
Figura 50: MDS da nuvem gerada, com espaçamento de 1m.	100

Figura 51: Nuvem de pontos obtida do voo sobre a ASA: com indicação da direção das faixas de voo (a), vista tridimensional (b), vista de cima com linha de perfil indicada (c), e perfil correspondente (d).	102
Figura 52: Nuvem de pontos do Bloco 1: vista tridimensional (a), vista aérea com linha de perfil indicada (b) e perfil correspondente (c).	103
Figura 53: Alvo utilizado para controle absoluto e calibração (a); e identificação do mesmo na nuvem de pontos (b).	104
Figura 54: Localização dos alvos observados (a) e representação das nuvens de pontos em que os mesmos são identificados (b).	105
Figura 55: Recorte da nuvem de referência para a área.	108
Figura 56: TIN do Bloco 2 com espaçamento de 1 metro (a); e discrepâncias entre a nuvem do Bloco 2 e a nuvem de referência (b).	108
Figura 57: TIN do Bloco 1 com espaçamento de 1 metro (a); e discrepâncias entre o Bloco 1 e a nuvem de pontos de referência (b).	110
Figura 58: Recortes dos MDS obtidos das discrepâncias das nuvens dos blocos com a de referência, com seta indicativa da direção de voo.	111
Figura 59: Perfil da nuvem de pontos obtida da área de mata.	111
Figura 60: Relação entre a abertura angular configurada e o tempo associado.	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Acurácia da IMU com relação à posição, velocidade e atitude.....	47
Tabela 2: Exemplos de alcance de medidas para alvos com 10% de reflexão.....	52
Tabela 3: Discrepâncias calculadas no controle de qualidade altimétrico da nuvem com as estatísticas estimadas para todo o conjunto de pontos levantados (primeira coluna de dZ) e excluindo-se os pontos com maior discrepância do conjunto (segunda coluna de dZ).	98
Tabela 4: Pontos identificados para o controle relativo de faixas.	99
Tabela 5: Discrepância entre as coordenadas de pontos de apoio no terreno e nas nuvens. ..	105
Tabela 6: Ângulos de <i>boresight</i> determinados a partir do Bloco 2 e seus respectivos desvios padrão estimados.....	106
Tabela 7: Discrepância entre as coordenadas de pontos de apoio no terreno e nas nuvens após a aplicação do <i>boresight</i>	106

LISTA DE SIGLAS

ASA	– Associação dos Servidores Administrativos
AKA	– <i>Academy of Finland</i>
BIPM	– <i>Bureau International des Poids et Mesures</i>
CAN	– <i>Controller Area Network</i>
CMOS	– <i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
FOV	– <i>Field of View</i>
FTP	– <i>File Transfer Protocol</i>
GNSS	– <i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	– <i>Global Positioning System</i>
HDMI	– <i>High-Definition Multimedia Interface</i>
IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IERS	– <i>International Earth Rotation and Reference Systems Service</i>
IFOV	– <i>Instantaneous Field Of View</i>
IMU	– <i>Inertial Measurement Unit</i>
INS	– <i>Inertial Navigation System</i>
LASER	– <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LCD	– <i>Liquid Crystal Display</i>
LiDAR	– <i>Light Detection And Ranging</i>
MDT	– Modelo Digital de Terreno
MDS	– Modelo Digital de Superfície
MED	– Medidor Eletrônico de Distâncias
MEMS	– <i>MicroEletroMechanical Systems</i>
NMEA	– <i>National Marine Electronics Association</i>
NTP	– <i>Network Time Protocol</i>
PPS	– <i>Pulse Per Second</i>
RAM	– <i>Random-Access Memory</i>
RBMC	– Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RINEX	– <i>Receiver Independet Exchange format</i>
RS232	– <i>Recommended Standard 232</i>
RTK	– <i>Real Time Kinematic</i>
SVL	– Sistema de Varredura a LASER
SVLA	– Sistema de Varredura a LASER Aerotransportado
TAI	– Tempo Atômico Internacional
TCP/IP	– <i>Transmission Control Protocol/ Internet Protocol</i>

TIN	– <i>Triangular Irregular Network</i>
TTL	– <i>Transistor Transistor Logic</i>
USB	– <i>Universal Serial Bus</i>
USNO	– <i>United States Naval Observatory</i>
UTC	– <i>Universal Time Coordinate</i>
UTM	– <i>Universal Transverse of Mercator</i>
VANT	– <i>Veículo Aéreo Não Tripulado</i>
WGS84	– <i>World Geodetic System 1984</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
	1.1 Justificativa	17
	1.2 Objetivos	18
	1.3 Estrutura do Trabalho.....	18
2	REVISÃO DA LITERATURA	20
	2.1 Estado da Arte	20
	2.2 Fundamentação Teórica	23
	2.2.1 Sistemas de Varredura a LASER – Princípio, Componentes e Aplicações.....	23
	2.2.1.1 Sistema de Posicionamento.....	26
	2.2.1.2 Sistema de Navegação Inercial	26
	2.2.1.3 Sistemas de Varredura.....	28
	2.2.2 Sistemas de Varredura a LASER – Sincronização das observações	30
	2.2.3 Sistemas de Varredura a LASER – Elementos Relacionados à Geometria de Aquisição.....	31
	2.2.4 Sistemas de Varredura a LASER – Modelo Matemático	33
	2.2.5 Sistemas de Varredura a LASER – Fontes de Erro	37
	2.2.6 Sistemas de Varredura a LASER – Métodos de Calibração.....	39
	2.2.7 Sistemas de Varredura a LASER – Controle de Qualidade.....	42
3	MATERIAIS E SUAS CARACTERÍSTICAS	46
	3.1 Hardware.....	46
	3.1.1 INS NovAtel SPAN-IGM-S1 e Acessórios	46
	3.1.2 Unidade de Varredura a LASER – Ibeo LUX 2010	48
	3.1.3 <i>Raspberry</i> PC	55
	3.1.4 VANT – SX8	56
	3.1.5 Caixa de Alimentação e Sincronização.....	57
	3.2 Softwares.....	58

3.2.1	<i>Inertial Explorer</i> e <i>GNSS Data Converter</i> (NovAtel)	58
3.2.2	Ibeo LASER View	59
3.2.3	Outros <i>Softwares</i> e Programas Importantes	59
3.3	Dados de apoio.....	63
4	DESENVOLVIMENTO.....	65
4.1	Montagem do Sistema.....	65
4.1.1	Integração de Sensores e Sincronização dos Dados	65
4.1.2	Montagem da plataforma	68
4.2	Operação e Processamento.....	71
4.2.1	Inicialização do Sistema Inercial	71
4.2.2	Processamento.....	73
4.2.2.1	Processamento dados GNSS/IMU	73
4.2.2.2	Processamento dados LASER.....	75
4.3	Extração de feições/alvos para determinação de <i>boresight</i> e controle de qualidade.....	81
4.4	Calibração do sistema	81
4.5	Controle de Qualidade	83
5	TESTES REALIZADOS E RESULTADOS OBTIDOS	85
5.1	Testes Preliminares	85
5.2	Levantamento Terrestre	86
5.3	Voo – Santuário “Morada de Deus”	92
5.4	Voo – ASA.....	100
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	112
	REFERÊNCIAS	114
	ANEXO A – Exemplo de arquivo gerado do processamento GNS/IMU	121
	ANEXO B – Exemplo de arquivo *.csv gerado	122
	ANEXO C – Relação dos <i>scripts</i> executados no <i>Raspberry</i> PC	123
	ANEXO D – Trecho de arquivo ‘falhas_LS.txt’ gerado pelo programa criado para auxiliar na	

ordenação.....	125
ANEXO E – Trecho de arquivo LS.txt gerado pelo programa criado para auxiliar na ordenação dos pacotes	126
APÊNDICE 1 – Relação entre a abertura angular e tempo associado	127
APÊNDICE 2 – Sequência de processamento aplicada	128

1 INTRODUÇÃO

No fim dos anos 60 a tecnologia LASER, acrônimo para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, começou a ser aplicada na área de mapeamento, sendo possível calcular distâncias a partir da medida do tempo de retorno de um pulso/sinal LASER emitido, o princípio LiDAR (*Light Detection And Ranging*). Este princípio foi inicialmente aplicado em instrumentos Medidores Eletrônicos de Distância (MED) em atividades de topografia e controle de redes geodésicas, sendo posteriormente aplicado em perfiladores LASER aéreos e, no início dos anos 90, em dispositivos de varredura a LASER (SHAN e TOTH, 2008).

Com o avanço da tecnologia, sistemas de varredura a LASER vêm sendo cada vez mais utilizados como alternativa e, principalmente, como fonte de dados complementar aos procedimentos fotogramétricos convencionais em levantamentos para modelagem 3D, atividades de mapeamento e planejamento urbano (HAALA e BRENNER, 1999; VOSSelman et al., 2005; MASON et al., 2007; HAALA et al., 2008; LEHTOMÄKI et al., 2010), inventário de patrimônio histórico (HAALA e ALSHAWABKEH, 2006; KERSTEN et al., 2009; ARMESTO-GONZÁLEZ et al., 2010; REMONDINO, 2011; ZALAMA et al., 2011), pesquisas voltadas ao meio ambiente e ecologia (LEFSKY et al., 2002; LIM et al., 2003; BRADBURY et al., 2005; VIERLING et al., 2008; CORONA et al., 2012), direção autônoma (KOLSKI et al., 2006; PETROVSKAYA e THRUN, 2009; GEIGER et al., 2012; JIANMIN et al., 2013), entre outros estudos (YU et al., 2003, 2004).

Os principais motivos que incentivaram o uso de sistemas a varredura LASER para fins de mapeamento são o levantamento tridimensional da cena e a característica de “penetração” na vegetação, em que há o retorno de pulsos refletidos por camadas de sub-bosque e solo, abaixo do dossel de árvores, no caso de levantamentos aéreos. Os dados obtidos pelos sistemas de varredura a LASER permitem a caracterização de *habitat* e estudo florestal, evitando a necessidade de um trabalho intensivo de medidas de campo, e facilitam a filtragem de objetos acima do solo para a geração de modelos de terreno.

Apesar destas vantagens, o uso de sistemas de varredura a LASER em levantamentos aéreos ainda apresenta alto custo devido ao valor do equipamento e da missão de aerolevanteamento. Em atividades de monitoramento e pesquisa, por exemplo, é importante realizar levantamentos em séries de tempo regulares, e o alto custo das missões restringe a frequência de coleta.

Em áreas de pequena extensão, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) são uma alternativa ao uso das aeronaves convencionais, por apresentarem menor custo operacional. A utilização de VANT permite períodos de revisita determinados pelo usuário final e voos à menor altura e velocidade, resultando em uma melhor resolução espacial e precisão do produto obtido.

Os VANT de pequeno porte, com peso inferior a 20 kg, são tecnologias de baixo custo, mas que apresentam limitação quanto à capacidade de carga e autonomia de voo. No entanto, com a miniaturização das tecnologias de medidas, esta limitação hoje é contornada, sendo possível embarcar num mesmo voo um conjunto de sensores ópticos e não ópticos para fornecer uma série de dados para uma variedade de usuários/estudos.

Este trabalho trata do desenvolvimento e avaliação de uma plataforma de mapeamento de baixo custo composta por um sistema de varredura a LASER embarcado em VANT de pequeno porte.

1.1 Justificativa

Estudos recentes vêm utilizando sistemas de varredura a LASER embarcados em VANT para caracterização da estrutura tridimensional do ecossistema, monitoramento de atividades florestais ilegais, estimativa de volume e biomassa florestal e de estoque de carbono e mapeamento da biodiversidade (JAAKKOLA et al., 2010; LIN et al., 2011; WALLACE et al., 2011; 2012; 2014a; b; HONKAVAARA et al., 2012; CHISHOLM et al., 2013; WALLACE, 2013; TULLDAHL e LARSSON, 2014).

Apesar do Brasil estar entre os países com maior biodiversidade do mundo, há uma grande carência de tecnologias para o mapeamento da biodiversidade e para estabelecer indicadores de mudanças ambientais no país. Uma possibilidade é mapear a biodiversidade com o uso de sensores transportados em VANT, devido ao baixo custo do aerolevanteamento e flexibilidade de utilização.

O uso de VANT de pequeno porte como plataforma de aquisição dos dados é uma tecnologia de baixo custo que permite a aquisição de dados de um ponto de vista aéreo da área

a ser estudada e possibilita a identificação de espécies e estimativa da biomassa através do mapeamento da estrutura e altura do dossel da vegetação e informações coletadas em campo, como o diâmetro dos troncos, no caso da estimativa da biomassa.

No entanto, o desempenho destes sistemas pode não atingir os mesmos níveis que os sistemas embarcados em aeronaves convencionais. Por se tratar de uma plataforma compacta, o espaço para a integração dos equipamentos é limitado, exigindo que os sistemas embarcados sejam menores e mais leves para garantir maior autonomia.

Assim, esta pesquisa trata da integração e sincronização dos sistemas envolvidos em um Sistema de Varredura a LASER Aerotransportado (SVLA) em VANT de pequeno porte, bem como da aquisição, processamento e análise dos dados de varredura.

As atividades desenvolvidas incluem a montagem e calibração do sistema, análise dos dados em áreas caracterizadas por feições antrópicas e avaliação da “penetrabilidade” na vegetação e densidade de pontos amostrados em regiões de floresta, visando validar a aplicabilidade do sistema para o mapeamento da biodiversidade e estimativa de biomassa florestal.

1.2 Objetivos

O objetivo geral desta investigação é desenvolver uma tecnologia de mapeamento utilizando um VANT de baixo peso como plataforma e um sistema leve de varredura a LASER.

Dentre os objetivos específicos desta pesquisa estão a montagem da plataforma de aquisição dos dados com SVLA, envolvendo a integração e sincronização do sistema de varredura a LASER com os sistemas de posicionamento e navegação, a calibração do sistema e avaliação da precisão obtida e da aplicabilidade do mesmo em áreas de florestas.

1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho é dividido em seis capítulos. O primeiro apresenta a introdução do conteúdo abordado na pesquisa, a justificativa e os objetivos da pesquisa.

O segundo capítulo trata da revisão da literatura, apresentando o estado da arte e a fundamentação teórica, abordando a descrição de alguns elementos e conceitos importantes de um SVLA, bem como a importância e como é realizada a sincronização das medidas envolvidas, o modelo matemático utilizado para o cálculo das coordenadas da nuvem de

pontos obtida da varredura, fontes de erro, métodos de calibração de um SVLA e controle de qualidade dos dados.

O terceiro capítulo trata dos materiais utilizados para a execução da pesquisa.

O quarto capítulo apresenta a descrição do desenvolvimento das atividades, abordando a montagem e operação do sistema, o processamento dos dados, a calibração do sistema e o controle de qualidade realizados.

O quinto capítulo traz a descrição de alguns testes realizados com o sistema, bem como os resultados obtidos e análises de cada um deles.

O sexto e último capítulo apresenta as conclusões e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção é apresentado um breve resumo sobre o estado da arte de SVLA para VANT de pequeno porte e a fundamentação teórica relacionada a sistemas de varredura a LASER.

2.1 Estado da Arte

Estudos que dependem de Sensoriamento Remoto aéreo com alta frequência temporal são muitas vezes limitados, pois os métodos convencionais aéreos com veículos tripulados são geralmente caros e, assim, não são acessíveis para estudos detalhados que requerem informação de séries temporais de pequenas áreas. Para estas situações, a nova tecnologia baseada em VANT de pequeno porte pode ser uma alternativa viável e de baixo custo, uma vez que apresenta manutenção relativamente barata e é de fácil manuseio, quando comparada a plataformas aéreas tripuladas (EVERAERTS, 2009; JAAKKOLA et al., 2010; HONKAVAARA et al., 2012).

Por permitir voos de baixa altitude, com baixa velocidade e com controle de revisita pelo usuário, a um baixo custo, os levantamentos utilizando VANT podem atingir melhor resolução temporal e espacial dos dados. Assim, constituem uma ferramenta útil para aplicações que demandam medidas em escala adequada, como investigações ecológicas (JONES et al., 2006; ANDERSON e GASTON, 2013).

Como mencionado anteriormente, os Sistemas de Varredura a LASER (SVL) apresentam a vantagem de ser uma ferramenta de rápida aquisição de informações tridimensionais da cena, assim, muito tem sido explorado sobre a alternativa do emprego de SVL em VANT (WALLACE et al., 2012; JAAKKOLA et al., 2010; GLENNIE et al., 2013; ADLER et al., 2014).

Wallace et al. (2012) apresentam um SVLA em VANT de baixo custo utilizado para inventário florestal. O sistema, denominado TerraLuma, é composto por uma unidade de varredura a LASER da IbeoLUX, dois receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de dupla frequência da NovAtel, uma unidade de medida inercial (*Inertial Measurement Unit* - IMU), uma câmara de vídeo e um microcomputador para gravação de dados e sincronização do tempo embarcados em um octocóptero. A plataforma apresenta a limitação de comportar cargas pequenas e de no máximo 2,8 kg, e tempo de voo reduzido, sendo capaz de realizar voos com duração de 3 a 5 minutos apenas, com o sistema completo (2,4 kg). Aplicações deste sistema foram apresentadas também em Wallace (2013) no mapeamento de copas e em Wallace et al. (2014), em que o sistema TerraLuma foi utilizado na detecção de árvores e delimitação de copas.

De acordo com Wallace et al. (2012), para obter uma nuvem de pontos com densidade de até 50 pontos por m² foram realizadas 8 faixas de voo, de direção e sentido diferentes, em 4 voos (devido a autonomia de voo limitada do sistema) com velocidade e altura de voo aproximadas de 3,3 m/s e 50 m, respectivamente. A acurácia horizontal e vertical da nuvem resultante foi de 0,61 m e 0,19 m, respectivamente, utilizando apenas a nuvem de pontos proveniente da varredura LASER, e de 0,34 m e 0,15 m com a inclusão das aquisições da câmara de vídeo para o processamento.

Jaakkola et al. (2010) apresentam um SVL de baixo custo desenvolvido para ser embarcado em VANT pequeno, mas que também pode ser embarcado em veículos terrestres para mapeamento. O VANT utilizado foi um helicóptero de 4,5 kg (com baterias) capaz de carregar até 7 kg. O sistema é composto por sistema de posicionamento e orientação (GNSS/IMU), dois sistemas de varredura a LASER (um IbeoLUX e um Sick LMS151), uma câmara CCD, um espectrômetro e uma câmara termal. O sistema desenvolvido é chamado de Sensei e foi utilizado para a identificação de árvores individuais.

Em Lin et al. (2011) são apresentados os resultados obtidos pelo mesmo sistema Sensei na estimativa de altura de árvore, detecção de postes, extração de rodovias e refinamento de modelos de terreno.

Em Jaakkola et al. (2010) o sistema embarcado em VANT permitiu a estimativa da altura de árvores, através de medidas manuais, com erro médio de 0,15 m e desvio padrão de 0,30 m. Já a posição planimétrica das árvores apresentou erro médio de 0,40 m com desvio padrão de 0,14 m. A altura de voo adotada para a obtenção destes resultados variou entre 10 m e 40 m, atingindo uma densidade de pontos de 100 a 1500 pontos por m². Para a avaliação dos dados na geração de modelo digital de elevação, foram levantados 115 pontos de controle

na área de estudo, tomados como dados de referência, para comparação com o modelo de elevação gerado a partir da nuvem de pontos coletada, resultando numa diferença altimétrica de 3,1 cm com desvio padrão de 9,2 cm.

Glennie et al. (2013) apresentam um sistema compacto de varredura a LASER que é empregado tanto em VANT como em uma mochila, no modo terrestre. Neste trabalho são apresentados resultados de testes realizados com o sistema na mochila e a bordo de um balão. O sistema apresenta 15 kg e é composto por uma unidade de varredura a LASER (Velodyne HDL-32E), um sistema de navegação inercial (*Inertial Navigation System – INS*) (*Oxford Technical Solutions Inertial+2 – OxTS IMU*), dois receptores GNSS (NovAtel), um microcomputador para gravação dos dados e controle do sistema, e um conjunto de baterias adicionais, tendo autonomia para até 6 horas.

Os experimentos realizados com o sistema a bordo do balão apresentaram acurácia vertical e horizontal de aproximadamente 4 cm e 17 cm, respectivamente. Dois experimentos foram realizados para esta análise: o primeiro com o balão a uma altura média de 25 m e velocidade aproximada de 1,9 m/s a 4,2 m/s, resultando em uma nuvem de pontos com densidade de 1000 pontos/m²; e um segundo levantamento a uma altura de 30 m e velocidade de 0,83 m/s, com densidade resultante de 3000 pontos/m².

Adler et al. (2014) apresentam um VANT com SVL embarcado para exploração autônoma de ambientes urbanos. O sistema é composto por um INS, com um receptor GNSS de dupla frequência e IMU, duas unidades de varredura a LASER e um microcomputador embarcados em um octocóptero. A plataforma com todos os componentes embarcados pesa aproximadamente 2,5 kg, sendo a carga útil de cerca de 790 g.

Adler et al. (2014) avaliaram a nuvem de pontos obtida pelo sistema através da comparação de distâncias medidas na nuvem de pontos com medidas manuais na cena. As discrepâncias nas distâncias apresentaram valores inferiores a 25 cm. Embora a precisão da nuvem de pontos gerada não tenha sido analisada, os resultados obtidos pelo sistema podem ser utilizados para a reconstrução de superfícies e para evitar colisões na locomoção de veículos, por exemplo.

Bird et al. (2015) apresentam o conceito e previsões de desempenho de um sistema de pequena dimensão e baixo peso para mapeamento a ser embarcado em VANT, compreendendo uma câmara Range (ou flash câmara) que utiliza o princípio LiDAR para gerar uma imagem 3D, onde cada pixel apresenta informação de distância e intensidade de retorno do pulso LASER, e uma câmara CMOS (*Complementary Metal-Oxide-*

Semiconductor) que opera nos comprimentos de onda da luz visível como os principais equipamentos de suporte para o mapeamento.

Assim sendo, fica claro como a aplicação de sistemas de tecnologia LiDAR embarcados em VANT em mapeamento e no monitoramento e estudo florestal e de ecologia vem ganhando um grande espaço na comunidade científica. A maior limitação destes tipos de sistemas é o peso da carga a ser embarcada, que limita o tempo de voo dos levantamentos, e, muitas vezes, por se buscar equipamentos compactos e de baixo custo, limita-se também a precisão posicional e a densidade de pontos amostrados, sendo importante analisar os resultados obtidos pelo sistema e a adequação às aplicações pretendidas.

A fim de entender as limitações encontradas no desenvolvimento de SVLA em VANT de baixo custo, serão revisados alguns conceitos básicos nas próximas subseções.

2.2 Fundamentação Teórica

2.2.1 Sistemas de Varredura a LASER – Princípio, Componentes e Aplicações

LASER é um acrônimo para *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ou seja, amplificação da luz por emissão estimulada de radiação. Segundo Shan e Toth (2008), um LASER é um dispositivo óptico que, quando estimulado por uma fonte de energia externa, produz e emite um feixe ou pulso de radiação monocromático (com comprimento de onda específico), coerente e colimado.

O uso de dispositivos LASER para medidas de distâncias é baseado no princípio LiDAR, no qual a distância é determinada pela medida do tempo de retorno de um pulso/sinal LASER emitido.

Com o avanço da tecnologia, dispositivos a LASER passaram a ser estudados para aplicação na área de mapeamento. No fim dos anos 60 a tecnologia LASER começou a ser utilizada para este fim, sendo empregados tanto instrumentos de medição de distância baseada em tempo de retorno do sinal, quanto os baseados em comparação da fase do sinal emitido e o refletido (SHAN e TOTH, 2008).

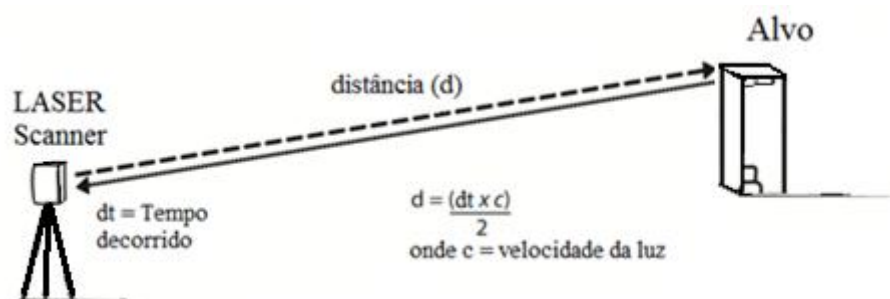
Os principais componentes de uma unidade de varredura a LASER são basicamente o gerador de pulsos LASER, conjunto óptico de emissão e recepção do pulso, detector de sinais e medidor de tempo, e unidade de controle e armazenamento. Após a geração dos pulsos

LASER, o conjunto óptico de lentes e espelhos os orienta emitindo-os em direção aos objetos. O sinal de retorno passa novamente por um conjunto óptico e é dirigido à parte eletrônica de recepção do sensor que, através de um conversor A/D, transforma o sinal analógico recebido em digital. O sinal digital da radiação refletida passa por um controlador de ruído que verifica se o sinal recebido é compatível com o sinal emitido (WEHR e LOHR, 1999; SHAN e TOTH, 2008).

Para aplicações topográficas, nas quais é necessário realizar medidas através de longas distâncias, níveis de energia muito altos são necessários para garantir uma alta intensidade do sinal com um alto grau de colimação do feixe LASER.

A Figura 1 mostra o esquema do cálculo da distância LASER através do tempo de propagação do sinal.

Figura 1: Medida de distância pelo tempo de propagação do sinal LASER.



Fonte: O autor.

Ao disparar o pulso LASER, um medidor de intervalo de tempo mede o tempo transcorrido entre a emissão do pulso LASER e o retorno do mesmo ao sistema. A unidade de controle e armazenamento permite sincronizar as medidas de distância e ângulos de varredura com as medidas de posição e orientação da plataforma em que o Sistema de Varredura a LASER (SVL) se encontra, quando presentes os sistemas de posicionamento e orientação na plataforma, através de uma referência temporal comum aos três sistemas.

No caso de levantamentos em que é necessário deslocar o SVL durante a aquisição de dados, é imperativo conhecer as mudanças de posição e atitude da plataforma durante o período de aquisição. Para isso, a integração das tecnologias GNSS/IMU a um SVL móvel é essencial. Shan e Toth (2008) ressaltam que um SVL móvel não pode ser operado de maneira prática ou útil sem estes sistemas integrados.

Portanto, um sistema de varredura a LASER móvel é constituído por três sistemas distintos: receptor GNSS e unidade de medida inercial, compondo o sistema de

posicionamento e orientação, e a unidade LASER, composta por dispositivo de emissão e recepção LASER e mecanismo de varredura. Tais sensores são responsáveis pelo fornecimento de informações de posição e orientação (atitude) da unidade LASER e medidas de distância e ângulos de varredura, respectivamente.

Assim, para obter a nuvem de pontos a partir dos dados brutos provenientes de um SVL móvel, é necessário conhecer o funcionamento e as características de operação dos sistemas envolvidos, bem como os parâmetros que os relacionam espacialmente, como translações e orientação (MORIN, 2002).

SVL podem ser utilizados tanto em plataformas no nível terrestre, quanto aéreo e orbital. No caso de SVLA (aéreo), Shan e Toth (2008) os classificam como sistemas desenvolvidos para mapeamento topográfico e sistemas desenvolvidos para mapeamento batimétrico, sendo o comprimento de onda da luz LASER que emitem a principal característica que os diferencia.

As posições do SVLA durante o levantamento são normalmente dadas por um receptor GNSS. A IMU registra acelerações lineares e velocidades angulares que permitem calcular a orientação da plataforma no espaço tridimensional, isto é, em torno dos eixos de seu sistema inercial interno. Assim, com as consecutivas posições e orientação do sistema conhecidas durante o levantamento, é possível estimar as coordenadas de pontos da cena mesmo com a plataforma em movimento.

A partir das medidas de distância calculadas e dos ângulos de varredura medidos pelo *encoder* da unidade LASER, e com a integração dos sistemas GNSS/IMU, é possível obter uma nuvem de pontos georreferenciada. Para a aplicação da orientação direta de sensor, as diferenças de posição e orientação entre os sistemas cartesianos dos sensores envolvidos devem ser determinadas com acurácia, e a variação destas diferenças, se existentes, devem ser modeladas (ŠKALOUŠ, 1999).

Devido à rápida aquisição e alta confiabilidade dos dados obtidos em levantamentos por SVL, esta tecnologia tem se tornado muito difundida nas áreas de levantamento de patrimônio histórico cultural, aplicações florestais e voltadas ao meio ambiente e de aquisição de Modelo Digital de Terreno (MDT), como mencionado anteriormente.

A alta produtividade e as características de “penetrabilidade” em áreas de vegetação e de informação posicional confiável em áreas homogêneas permitem adquirir pontos da cena que, por técnicas de fotogrametria convencional, seriam de difícil extração, ou ainda, impossíveis de serem determinados com acurácia compatível. Como é o caso da identificação de pontos abaixo do dossel de árvores em regiões com maior densidade de vegetação, em

levantamentos aéreos, que por fotogrametria convencional é, muitas vezes, impossível de realizar.

2.2.1.1 Sistema de Posicionamento

Para a determinação da posição do SVL, tanto no modo pós-processado quanto em tempo real, é usualmente empregada uma técnica de posicionamento GNSS relativo, na qual a posição de um ponto é determinada com relação à de outro ponto de coordenadas conhecidas, chamado de estação de referência. No posicionamento relativo são utilizados dois ou mais receptores de modo a rastrear, simultaneamente, os mesmos satélites de locais diferentes, permitindo atenuar os erros presentes nas medidas de pseudodistância calculadas através de princípio da dupla diferença de fase (MONICO, 2007).

Caso haja um erro nas coordenadas da estação de referência, o erro será propagado para a posição do ponto a ser determinado. Vale lembrar que o sinal GNSS é afetado por diferentes fontes de erro, podendo-se destacar os efeitos atmosféricos (troposfera e ionosfera) e de multicaminho.

Partindo do conceito de posicionamento relativo, existem métodos de aplicação de correções diferenciais de posicionamento, que são recebidas por um receptor GNSS móvel, e calculadas a partir de outras estações de referência rastreadas simultaneamente à estação móvel. Giongo et al. (2010) afirmam que as correções tornam-se menos efetivas à medida que se aumenta a distância entre a estação móvel e a de referência, degradando a qualidade do posicionamento progressivamente.

Além da linha de base, outros fatores a serem considerados em um posicionamento relativo preciso são o número de satélites em observação e a geometria destes satélites.

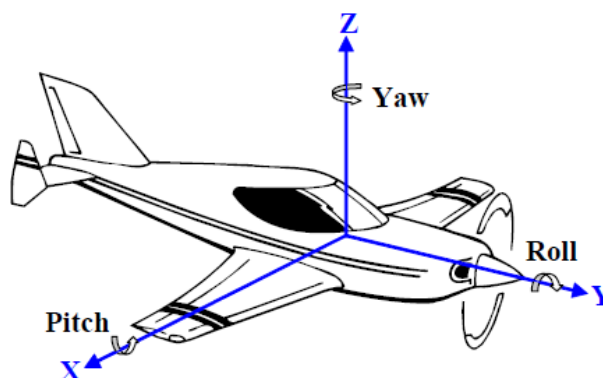
O processamento das posições da plataforma geralmente é realizado posteriormente ao levantamento, onde são obtidas as posições e atitude da plataforma num mesmo momento. Quando as considerações referentes às linhas de base, número e qualidade dos satélites em observação e geometria são atendidas, o pós-processamento dos dados GNSS permite atingir acurácia centimétrica utilizando efemérides precisas (COLOMINA e MOLINA, 2014).

2.2.1.2 Sistema de Navegação Inercial

Um Sistema de Navegação Inercial utiliza uma IMU para determinação dos movimentos de rotação da plataforma durante o seu deslocamento no espaço. Uma IMU é composta por um conjunto de três acelerômetros e três giroscópios, montados ortogonalmente entre si, sendo um para cada eixo de movimentação.

Colomina (2002) explica que a atitude de um corpo rígido é calculada a partir da medida de três velocidades angulares independentes, através da montagem dos três giroscópios que medem continuamente as velocidades angulares ao redor de três eixos mutuamente ortogonais. Sendo assim, a IMU é responsável por fornecer os ângulos de atitude: azimute (ou guinada), arfagem e rolagem do SVL (Figura 2).

Figura 2: Ângulos de atitude (rolagem (r - roll) – em torno do eixo x; arfagem (p - pitch) – em torno do eixo y; guinada (y - yaw) – em torno do eixo z) da aeronave.



Fonte: NovAtel (2010).

Os giroscópios realizam medidas de pequenas variações angulares proporcionais aos movimentos de rotação aplicados no sistema, sendo capazes de determinar para qual direção a plataforma se move, isto é, a mudança de direção do movimento da plataforma. Os acelerômetros são instrumentos capazes de obter a intensidade de uma força aplicada sobre um objeto fornecendo como saída um sinal proporcional à aceleração do mesmo (SHAN e TOTH, 2008).

Realizando sucessivas integrações da aceleração é possível calcular a velocidade e posição consecutivamente. Portanto, é possível estimar a posição da plataforma ao longo do seu deslocamento conhecendo-se a direção da trajetória, dada pelo giroscópio, suas acelerações medidas no decorrer do tempo e a posição inicial da mesma no espaço.

Os sistemas inerciais analíticos têm seu sistema de coordenadas relacionado com o sistema de coordenadas da plataforma, onde as translações e rotações do veículo são dadas em

relação a um sistema inercial. Sensores do tipo MEMS (*MicroElectroMechanical Systems* – Sistemas MicroEletroMecânicos) fornecem como saída uma voltagem proporcional às quantidades físicas, aceleração linear e angular, atuantes no sistema (SKOG e HÄNDEL, 2006).

O sistema de posicionamento GNSS depende da recepção de sinais dos satélites, e uma falha na transmissão ou recepção deste sinal pode resultar na descontinuidade do cálculo da posição do sensor. Nesse sentido, o INS é considerado um sistema autônomo por não depender de comunicação externa para realizar medidas de orientação. Esta característica, juntamente com a alta frequência de dados que um INS opera, faz do INS um sistema ideal para complementar o posicionamento GNSS cinemático. Quando o receptor GNSS perde o sinal, ou ainda, quando a visibilidade dos satélites é insuficiente para o posicionamento GNSS, a IMU pode fornecer informações contínuas da trajetória (ŠKALOUD, 1999; GALVANIN e DAL POZ, 2012).

No entanto, vale destacar que o desempenho posicional do INS degrada com o tempo devido à característica de integração das subseqüentes medidas da IMU e da própria precisão fornecida pelos sensores que a constituem (MOSTAFA, 2001; DE LIMA, 2005). Neste caso, os dados GNSS podem ser integrados aos dados do INS para a correção e minimização da degradação da solução do INS.

2.2.1.3 Sistemas de Varredura

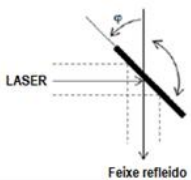
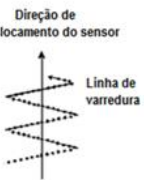
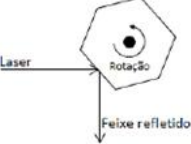
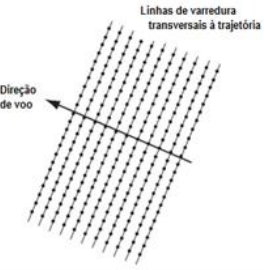
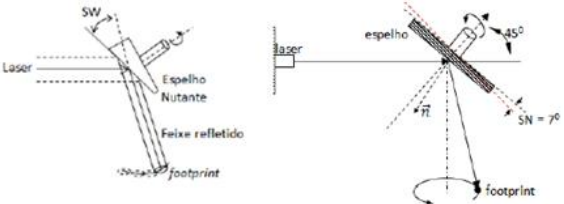
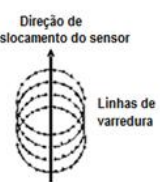
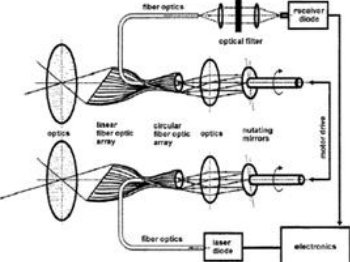

O funcionamento de um SVL também é caracterizado pelo mecanismo utilizado no conjunto óptico do sistema, ou seja, como um conjunto óptico de lentes e espelhos direciona o feixe LASER gerado, emitindo-o para os objetos do terreno e recebendo os sinais de retorno e direcionando-os para o receptor (SHAN e TOTH, 2008; GIONGO et al., 2010).

O movimento do sistema de varredura, transversal à direção do deslocamento da plataforma, combinado com o movimento da plataforma, permite realizar a varredura de uma cena. O direcionamento do feixe LASER transversalmente à trajetória e o padrão da amostragem de pontos no terreno é função do tipo de mecanismo de varredura empregado, sendo o padrão de varredura também dependente da direção e velocidade de deslocamento do sensor e da topografia do terreno.

Os SVL empregam basicamente quatro tipos de mecanismos de varredura, dos quais cada mecanismo gera um padrão de espaçamento e localização dos pontos amostrados no

terreno. Estes mecanismos são os baseados no espelho oscilante, no polígono de rotação, no espelho nutante e em fibras ópticas (Figura 3).

Figura 3: Mecanismos de varredura a LASER e padrões de varredura gerados.

	Mecanismo de varredura	Padrão de varredura
Varredura por Espelho oscilante		
Varredura por Polígono de rotação		
Varredura por Espelho nutante		
Varredura por Fibras ópticas		

Fonte: Adaptado de Wehr e Lohr (1999).

2.2.2 Sistemas de Varredura a LASER – Sincronização das observações

Para a integração dos dados de um SVL é necessária a sincronização dos dados de todos os sistemas sensores envolvidos, ou seja, os dados GNSS e IMU e as medidas de distância LASER com seus respectivos ângulos de varredura devem ser referenciados a um mesmo sistema de tempo a fim de que os dados possam ser processados corretamente (WEHR e LOHR, 1999; GALVANIN e DAL POZ, 2012). De acordo com Škaloud (1999), erros na sincronização de tempo dos dados afetam diretamente a determinação da trajetória da plataforma e as coordenadas da nuvem de pontos obtida do SVL.

Sabe-se que os dados GNSS são gerados já referenciados ao sistema de tempo GPS, sendo os dados gravados com uma “etiqueta” de tempo dada pelo relógio interno do receptor GNSS, indicando o instante em que a observação foi feita. Portanto, é muito comum adotar o sistema de tempo GPS como base de tempo para a sincronização dos demais sensores do SVL (MORIN, 2002).

Como cada sensor opera em frequências distintas e o início do funcionamento e medição de cada sensor também ocorre em instantes distintos, os dados devem ser interpolados para a correta integração. Como a frequência de repetição dos pulsos LASER é, geralmente, muito maior que a frequência de operação do receptor GNSS e maior que a de medidas da IMU, as posições e orientações devem ser interpoladas para os instantes de medida de distância LASER.

Morin (2002) explica que a sincronização é realizada através da unidade de controle e navegação do SVL. A unidade LASER é conectada com a unidade de controle que registra os movimentos do espelho de varredura e as medidas LASER obtidas. O tempo da unidade de controle é controlado por um relógio interno que é sincronizado com o tempo GPS através do sinal PPS (*Pulse Per Second* – Pulso Por Segundo) fornecido pelo relógio interno do receptor GNSS, que também é conectado à unidade de controle.

Assim, cada medida LASER, juntamente com o ângulo de varredura correspondente, é gravada com um valor de tempo associado, obtido do relógio interno sincronizado da unidade de controle, ou seja, com um tempo referenciado à escala de tempo GNSS. O mesmo acontece com o registro das atitudes provenientes da IMU, que também é conectada a esta unidade de controle.

Após os dados serem armazenados numa mesma base de tempo, a interpolação dos dados para os instantes de medida LASER é intuitiva e a integração dos dados pode ser realizada com confiabilidade.

2.2.3 Sistemas de Varredura a LASER – Elementos Relacionados à Geometria de Aquisição

Para melhor compreensão da geometria de aquisição de um levantamento realizado a partir de um SVLA, serão definidos alguns elementos básicos relacionados à varredura, como ângulo de divergência do pulso LASER – IFOV (*Instantaneous Field Of View*) ou γ , diâmetro do ponto projetado no terreno, ângulo de abertura máximo – FOV (*Field Of View*) ou θ , e largura da faixa de varredura no terreno (*Swath width*).

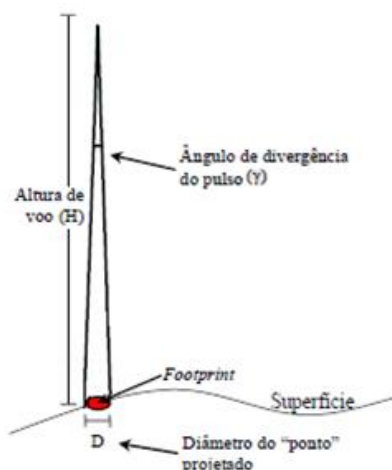
De acordo com Wehr e Lohr (1999), o ângulo de divergência do pulso LASER, também conhecido como campo de visada instantâneo, tem seu valor definido pela lei da difração da luz, sendo função da abertura do emissor LASER (d) e do comprimento de onda da luz LASER (λ), dado pela equação (1).

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

Devido às propriedades físicas da luz, ao se propagar, o feixe de luz sofre uma divergência em seu caminho óptico semelhante a uma figura cônica. No caso de um apontamento nadiral em uma superfície plana e horizontal, a projeção resultará em uma circunferência de diâmetro D . Essa circunferência recebe o nome de *footprint*.

A Figura 4 apresenta a relação entre o ângulo de divergência do pulso LASER e o *footprint*.

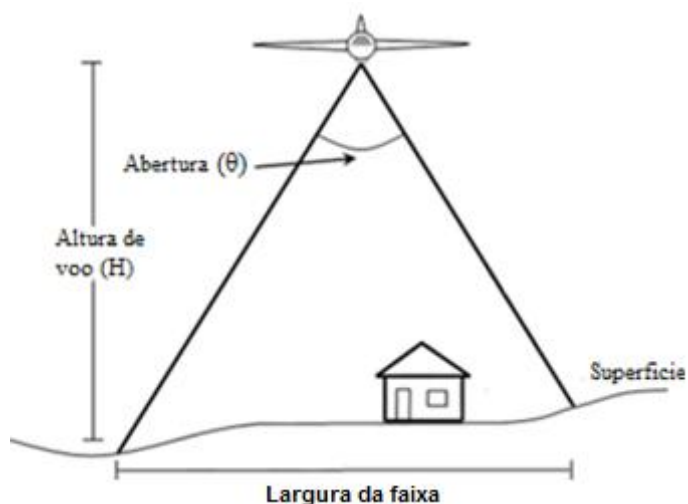
Figura 4: Ângulo de divergência do pulso LASER e diâmetro do ponto projetado.



Fonte: Adaptado de Galo (2013).

O ângulo de abertura máximo corresponde à abertura angular de uma varredura individual, sendo a largura da faixa de varredura no terreno definida por esse valor. A Figura 5 ilustra esta relação.

Figura 5: Relação entre o ângulo de abertura e a largura da faixa de varredura.



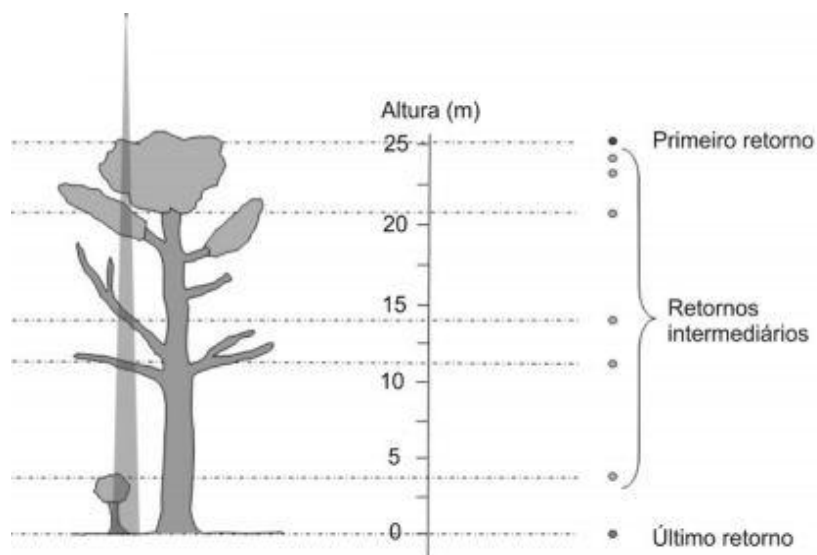
Fonte: Adaptado de Galo (2013).

Alguns sistemas LASER têm a propriedade de armazenar mais de um retorno por pulso emitido, outros somente o primeiro retorno. Devido ao tamanho do *footprint* que chega à cena, um único pulso LASER pode atingir mais de um objeto, de modo que, ao atingir o primeiro obstáculo, parte do pulso emitido é refletido de volta e recebido pelo receptor

LASER, e parte do sinal continua seu caminho óptico até atingir um objeto e ser refletido de volta ao sensor LASER.

Esta propriedade é ilustrada na Figura 6 e permite obter uma nuvem de pontos mais fiel à cena imageada.

Figura 6: Múltiplos retornos de um pulso LASER.



Fonte: Adaptado de Giongo et al. (2010).

2.2.4 Sistemas de Varredura a LASER – Modelo Matemático

Como já discutido anteriormente, para a determinação da posição de pontos obtidos por varredura a LASER é necessário a integração dos dados fornecidos por cada sistema componente do SVL.

Basicamente, pode-se assumir a existência de quatro sistemas de coordenadas distintos em um levantamento por SVL móvel: sistema de coordenadas geodésico, ao qual os dados provenientes do receptor GNSS estão referenciados (WGS84 – *World Geodetic System 84*); sistema de coordenadas da IMU; sistema de coordenadas da unidade LASER e sistema de coordenadas do dispositivo de emissão (ou do pulso LASER).

Assim, é necessário conhecer as relações geométricas entre os sistemas de coordenadas envolvidos para transformar os dados para um mesmo referencial.

O sistema de coordenadas da IMU é um sistema tridimensional cujos eixos e origem costumam ser gravados pelo fabricante na parte exterior do corpo da mesma, de modo a permitir que o usuário tenha conhecimento da posição de referência para a medida dos *lever-*

arms, que nada mais são que os deslocamentos da origem dos sistemas envolvidos com relação ao sistema de coordenadas da IMU.

Como usualmente costuma-se processar os dados coletados pela IMU com as posições obtidas da antena GNSS e com a informação do *lever-arm* da antena GNSS à IMU, as posições obtidas do processamento são referentes à origem do sistema da IMU. Assim, o modelo matemático utilizado para o cálculo da nuvem de pontos LASER considera a posição da origem do sistema da IMU, calculada no processamento dos dados GNSS/IMU.

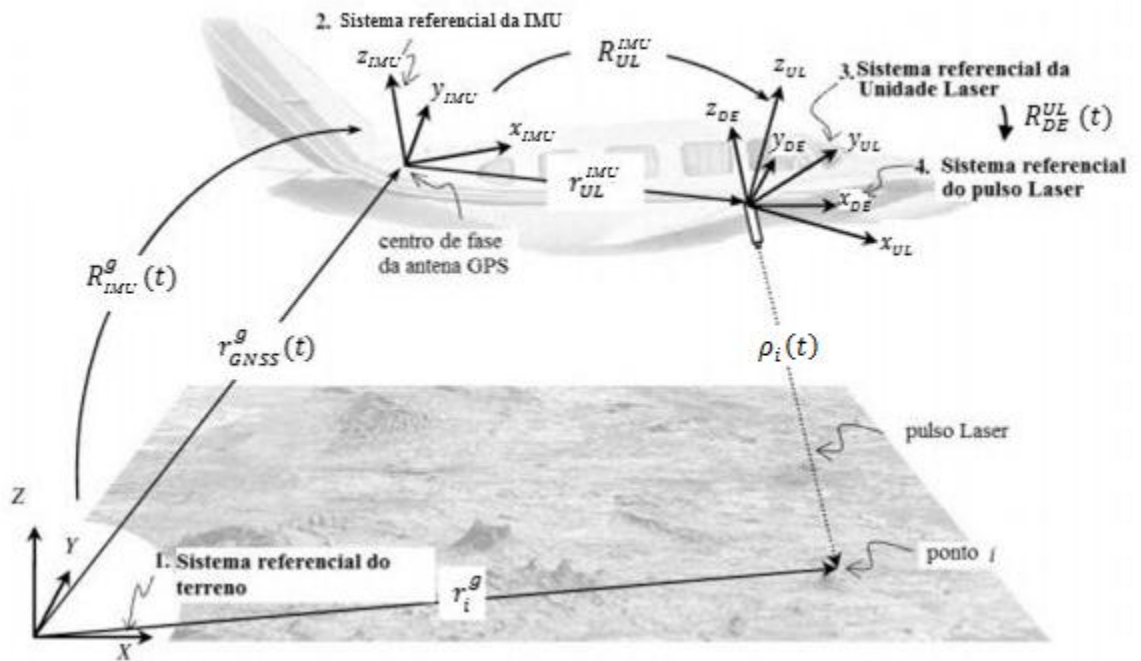
O sistema associado à unidade LASER é tridimensional e geralmente com origem no ponto inicial da medida de distância do sensor. O sistema de coordenadas do dispositivo de emissão também é tridimensional e tem a origem coincidente com a origem do sistema da unidade LASER, porém, enquanto o sistema da unidade LASER é solidário ao corpo da unidade LASER, o sistema do dispositivo de emissão é solidário ao sistema de varredura. Assim, o eixo Z do sistema do dispositivo de emissão apresenta mesma orientação e sentido contrário da direção do feixe LASER emitido.

Como a finalidade da IMU é a determinação de atitude da plataforma no momento de tomada das medidas LASER, a IMU geralmente é solidária à unidade LASER.

A posição da origem do sistema da unidade LASER com relação ao sistema da IMU é obtida por medidas diretas ou indiretas, já os ângulos de desalinhamento entre os sistemas são determinados por técnicas indiretas no processo de calibração. A relação entre o sistema da unidade LASER e do dispositivo de emissão é dada pelas contínuas variações angulares do sistema de varredura empregado.

A Figura 7 ilustra os sistemas referenciais envolvidos, bem como os vetores de translações e matrizes de rotações que os relacionam. A Figura 7 traz o esquema para o caso de SVLA, mas o mesmo pode ser generalizado para outros tipos de plataformas.

Figura 7: Sistemas referenciais envolvidos num levantamento por SVL.



Fonte: Adaptado de Habib et al. (2008).

A partir da figura tem-se:

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 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} : 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 iluminado num instante t ;

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

Vale notar que todos os sistemas são cartesianos do tipo dextrogiro.

No caso do esquema apresentado na Figura 7, a coordenada de um ponto no referencial do dispositivo de emissão (r_i^{DE}) é dada pela Equação 2:

$$r_i^{DE} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho_i(t) \end{pmatrix} \quad (2)$$

Conhecidos os parâmetros matemáticos que relacionam os sistemas envolvidos, é possível realizar a transformação entre os referenciais. 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. A equação que descreve este processo, conhecida como o modelo matemático do SVL, é dada a seguir (adaptada de HABIB e RENS (2007)):

$$r_i^g = r_{GNSS}^g(t) + R_{IMU}^g(t)r_{UL}^{IMU} + R_{IMU}^g(t)R_{UL}^{IMU}R_{DE}^{UL}(t) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\rho_i(t) \end{pmatrix} \quad (3)$$

onde:

$$\begin{aligned} R_{IMU}^g &= R_Z(\kappa(t)) R_Y(\varphi(t)) R_X(\omega(t)) \\ R_{UL}^{IMU} &= R_Z(\Delta\kappa(t)) R_Y(\Delta\varphi(t)) R_X(\Delta\omega(t)) \\ R_{DE}^{UL} &= R_Z(\alpha(t)) R_Y(\beta(t)) \end{aligned}$$

com:

$$\begin{aligned} R_Z(\theta) &= \begin{pmatrix} \cos \theta & \text{sen } \theta & 0 \\ -\text{sen } \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \\ R_Y(\theta) &= \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\text{sen } \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen } \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix}; \\ R_X(\theta) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \text{sen } \theta \\ 0 & -\text{sen } \theta & \cos \theta \end{pmatrix}; \end{aligned}$$

α, β : os ângulos de varredura do espelho;

κ, φ, ω : os ângulos de atitude estimados no processamento GNSS/IMU; e

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

2.2.5 Sistemas de Varredura a LASER – Fontes de Erro

Dentre os erros que afetam as coordenadas dos pontos LASER, pode-se classificá-los em erros sistemáticos e erros aleatórios. Os erros sistemáticos são erros cujas causas são conhecidas, podendo, na maioria das vezes, ser evitados através de técnicas apropriadas de observação ou eliminados *a posteriori* por meio de modelos matemáticos. Os erros aleatórios são resultados de flutuações probabilísticas das observações, e não podem ser vinculados a nenhuma causa conhecida, portanto são erros que permanecem nas observações mesmo após a remoção dos erros grosseiros e sistemáticos (MIKHAIL e ACKERMANN, 1976).

A partir do modelo matemático apresentado no tópico anterior, ficam claras as possíveis fontes de erro que podem influenciar nas coordenadas tridimensionais calculadas para os pontos LASER.

Os erros podem ser oriundos tanto do sistema LASER (erro no ângulo de varredura do espelho ou na medição do tempo de emissão/recepção do sinal, influenciando na distância calculada), quanto dos sistemas de posicionamento e orientação, e até do sistema de sincronização e da unidade de controle que integra os dados. A acurácia com que a relação espacial (translações e orientação) entre os sistemas envolvidos pode ser determinada também influencia na qualidade das coordenadas calculadas.

O erro na distância medida pelo sistema LASER pode derivar de um problema com o relógio interno, o qual determina o instante em que o pulso foi gerado e o instante em que foi recebido pelo sensor. Caso este relógio não esteja calibrado, o erro proveniente de seu atraso afeta diretamente o cálculo da distância percorrida pelo pulso (BALTSAVIAS, 1999a).

O erro na medida dos ângulos de varredura do espelho pode ser devido à acurácia do método de medida do ângulo de rotação do espelho pelo equipamento, onde geralmente é usado *encoder* para a determinação destes ângulos.

Além da acurácia do método de medida aplicado, os ângulos também podem ser afetados pelo próprio movimento de rotação do espelho, geralmente no sistema de varredura por espelho oscilante, onde a velocidade e aceleração do movimento não são constantes. Assim, há diferença na posição angular entre o espelho de varredura e o *encoder*, causando um registro da distância calculada em uma orientação errada. Essa diferença entre a distância verdadeira na direção do *encoder* e a distância medida a partir da posição do espelho é diretamente proporcional ao ângulo de varredura, o campo de visada e a taxa de varredura (MORIN, 2002).

Os erros no sistema de posicionamento dependem das condições de operação e configuração da antena GNSS. Como mencionado anteriormente, as principais fontes de erros no posicionamento GNSS são devido aos erros de multicaminho e efeitos atmosféricos (troposfera e ionosfera). O efeito da atmosfera na propagação do sinal LASER provoca uma refração do mesmo, e a quantidade de refração é função do comprimento de onda do pulso, atitude, ângulo de varredura e condições atmosféricas, podendo ser aplicados modelos atmosféricos para a correção destes efeitos (KRAUS, 2000).

Também influenciam na qualidade do posicionamento a linha de base da estação de referência utilizada para o processamento das posições da antena GNSS, o número de satélites visíveis e a não perda de sinal GNSS durante o levantamento, já que a solução da ambiguidade GNSS, que garante precisão posicional centimétrica, é realizada antes de iniciar o deslocamento da plataforma (MORIN, 2002).

Com relação ao sistema inercial, a acurácia dos giroscópios e acelerômetros da IMU também influenciam na qualidade dos dados inerciais medidos. As medidas dos giroscópios podem apresentar tendência, deriva e ruído, influenciando na acurácia absoluta da nuvem de pontos. De acordo com Morin (2002), a tendência e deriva são removidas no software de processamento da navegação, e os ruídos remanescentes aparentam ser correlacionados com o tempo, provocando inconsistências sistemáticas nas faixas LASER. Devido à natureza sistemática deste tipo de erro, seus efeitos podem ser modelados por parâmetros em função do tempo.

Kraus (2000) ainda destaca como fonte de erros a não sincronização correta dos fluxos de dados num mesmo sistema de tempo, resultando em associações incorretas de medidas.

Segundo Toth (2002), o desalinhamento angular entre o sistema da IMU e da unidade LASER é outra fonte de erros sistemáticos, podendo causar uma não correspondência entre conjuntos de dados obtidos de diferentes faixas LiDAR de um mesmo voo ou, ainda, com relação à verdade terrestre.

O erro mais crítico está relacionado ao desalinhamento, fazendo com que as medidas do sistema de varredura sejam associadas à atitude incorreta da aeronave (MORIN, 2002; SHAN e TOTH, 2008).

Erro na arfagem resulta numa inclinação da direção do feixe que deveria ser registrado no nadir; erro na rolagem também resulta no registro da distância inclinada incorreta, fazendo com que as diferenças de elevação aumentem de acordo com o ângulo de varredura; e erro na guinada provoca um desvio em cada linha de varredura e o efeito destas discrepâncias é maior quanto maior a altura de voo (BALTSAVIAS, 1999a; MORIN, 2002).

Para garantir a qualidade e precisão dos dados oriundos de SVL é fundamental a calibração de todos os componentes antes e depois da realização do voo, de modo a conhecer possíveis variações ocorridas nos sistemas durante o voo e, ainda, a realização de um voo de calibração que, de acordo com Habib et al. (2010), tem como objetivo determinar os ângulos de rotação entre o sistema da IMU e o sistema LASER, refinando os parâmetros de montagem do sistema, e tendências nas medidas de ângulos de varredura do espelho e distâncias.

De modo geral, os erros sistemáticos que geralmente são determinados e corrigidos no processo de calibração são resultantes de erros na medida dos *lever-arms* (dx , dy , dz) e no desalinhamento dos eixos dos sistemas envolvidos, caracterizando os ângulos de *boresight* ($d\omega$, $d\phi$, $d\kappa$), erros na distância LASER (ρ) e nos ângulos de varredura (α , β) (BALTSAVIAS, 1999b; SHENK, 2001; HABIB e RENS, 2007).

2.2.6 Sistemas de Varredura a LASER – Métodos de Calibração

Segundo Habib et al.(2010), a calibração de um SVLA é realizada basicamente em três etapas: calibração em laboratório, calibração da plataforma e calibração em voo.

A primeira geralmente é conduzida pelo fabricante, onde os componentes dos sistemas são calibrados individualmente. Nesta etapa são determinadas as relações entre a LASER e a IMU. Na calibração da plataforma são determinadas as relações entre o sistema da unidade LASER e a antena GNSS. A calibração em voo refina os parâmetros estimados durante a calibração em laboratório e da plataforma utilizando campos de testes com superfícies de controle para estimar tendências nos parâmetros do sistema LASER, onde as discrepâncias entre os dados e as superfícies de controle são utilizadas para refinar os parâmetros do sistema (*boresight* e escala) (HABIB, 2008; BANG et al, 2009; HABIB et al., 2010).

Habib e Rens (2007) destacam algumas desvantagens dos métodos de calibração em voo: são demorados e caros; são geralmente baseados em procedimentos de calibração sequenciais e complicados; requerem certo esforço para o levantamento de superfícies de controle; alguns métodos envolvem procedimentos manuais e empíricos; e alguns dos métodos necessitam da disponibilidade de medidas brutas da varredura, como distâncias, ângulos dos espelhos e informações de posição e orientação para cada pulso.

Como a calibração tem como finalidade estimar os parâmetros do sistema que minimizam as discrepâncias entre superfícies obtidas a partir de múltiplas faixas de voo, técnicas de calibração que aplicam o ajustamento em bloco com pontos de controle não são as

mais adequadas, já que não é simples estabelecer a correspondência entre pontos LASER e de controle de terreno, e nem sempre há o conhecimento da superfície do terreno sobrevoado ao nível de precisão requerido (TOTH, 2002).

Enquanto os *offsets* entre os sistemas dos sensores na plataforma podem ser determinados em solo, os ângulos de *boresight* têm que ser determinados por métodos em voo. Um método básico para estimar estes ângulos requer o estabelecimento de algum controle que seja identificável na nuvem de pontos LASER, podendo ser comparadas áreas com gradientes de elevação (BURMAN, 2000), alvos confeccionados de material altamente reflexivo gerando um alto sinal de intensidade do pulso refletido (CANAVOSIO-ZUZELSKI et al., 2013), ou ainda feições de terreno que apresentem descontinuidades possíveis de serem identificadas na nuvem de pontos. Como a correspondência entre pontos LASER e controle de terreno não é uma tarefa simples de se estabelecer, devido à natureza esparsa e irregular da nuvem de pontos coletada, são preferíveis técnicas que não requerem um conhecimento *a priori* de controle na superfície (BURMAN, 2000; TOTH, 2002; BANG et al., 2009).

Morin (2002) afirma que os erros provenientes dos ângulos de *boresight* são correlacionados com a direção de voo e, portanto, eles podem ser descorrelacionados observando alvos adquiridos a partir de diferentes direções de voo. Burman (2000) fala sobre a correspondência por diferenças de gradientes de elevação para estimar erros de alinhamento, onde desalinhamentos de rolagem e arfagem podem ser determinados por diferenças entre duas faixas sobrevoadas em direções opostas e, para solucionar os três ângulos de *boresight*, pelo menos três faixas em diferentes direções são necessárias. Para conseguir redundância, a configuração recomendada deve cobrir a área a partir de quatro diferentes direções.

Toth (2002) apresenta um método para a determinação dos ângulos de *boresight* que não requer qualquer controle de terreno e é baseado na sobreposição de duas, três ou mais faixas sobrevoadas em direções diferentes, porém é necessário que a área onde as faixas LASER se sobrepõem apresente desníveis e descontinuidades horizontais, devendo ser evitadas áreas com variações extremas de altura, áreas densamente vegetadas e de florestas. São ideais para esta finalidade as áreas próximas às bordas da área de sobreposição das faixas, onde as diferenças são mais notáveis, e terrenos suavemente ondulados, onde as discrepâncias podem ser observadas mesmo que a representação da superfície não apresente uma amostragem densa.

Skaloud e Lichti (2006) também apresentaram uma técnica de calibração através de superfícies planas em faixas sobrepostas, solucionando simultaneamente os parâmetros do

plano, os ângulos de *boresight* e o erro na medida LASER, porém esta abordagem apresenta a desvantagem de requerer áreas planas relativamente extensas, o que nem sempre é possível.

A comparação de diferentes superfícies formadas por pontos distribuídos aleatoriamente não é uma tarefa trivial e a efetividade deste processo depende da densidade de pontos amostrados e das características gerais do terreno da área de sobreposição. De acordo com Toth (2002), uma técnica frequentemente usada para a comparação de superfícies é o uso de *grid* regular, obtido por interpolação, no qual as discrepâncias podem ser determinadas pela correspondência das regiões selecionadas ou do perfil de objetos antrópicos de forma relativamente fácil.

Skaloud e Lichti (2006) apresentam o modelo matemático para a determinação dos ângulos de *boresight* e da tendência na medida LASER seguindo a mesma equação do modelo matemático de SVL apresentada anteriormente (Equação 3), porém substituindo ρ por $(\rho + \Delta\rho)$ e pré multiplicando a matriz R_{UL}^{IMU} por:

$$\begin{pmatrix} 1 & -d\kappa & d\varphi \\ d\kappa & 1 & -d\omega \\ -d\varphi & d\omega & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

sendo $d\omega$, $d\varphi$, $d\kappa$ e $\Delta\rho$ os valores a serem determinados na calibração através da sobreposição de superfícies planas.

O método de calibração apresentado por Skaloud e Lichti (2006), segundo os autores, apresenta melhores resultados quando se utiliza várias feições planas com diferentes orientações, característica facilmente encontrada em áreas urbanas.

Bang et al. (2009) apresenta uma classificação das técnicas de calibração divididas de acordo com a natureza dos dados disponíveis em: calibração simplificada, usando somente as coordenadas da nuvem de pontos; calibração quase rigorosa, usando dados de trajetória e coordenadas da nuvem de pontos rotuladas no tempo; e calibração rigorosa, utilizando medidas brutas do sistema.

2.2.7 Sistemas de Varredura a LASER – Controle de Qualidade

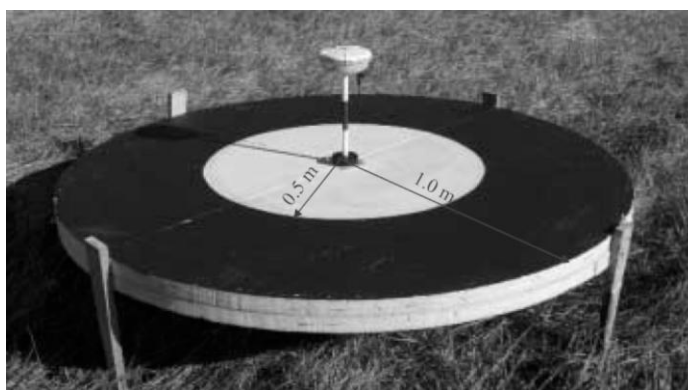
O controle de qualidade tem a finalidade de verificar se a qualidade esperada foi alcançada. Para isto, são verificadas a integridade dos dados (relacionados à consistência lógica e temporal) e a acurácia posicional. Com relação à posição, o controle de qualidade pode ser interno, ou relativo, e externo, ou absoluto (HABIB e RENS, 2007).

No controle de qualidade absoluto, a nuvem de pontos LASER é comparada com dados de referência coletados independentemente. Neste caso, as coordenadas dos pontos LASER podem ser comparadas com as coordenadas de alvos levantados independentemente por técnicas topográficas/geodésicas convencionais. 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.

No caso do controle de qualidade absoluto os alvos devem ser especialmente desenvolvidos para levantamentos por varredura a LASER, dependendo também do sistema empregado. As coordenadas destes alvos são levantadas independentemente, por posicionamento GNSS ou outra técnica topográfica convencional. Este tipo de controle pode ser aplicado tanto para projetos com múltiplas faixas de voo, como para uma única faixa. Estudos sobre as características dos alvos e seus efeitos nos dados processados podem ser encontrados em Wotruba et. al (2005).

A Figura 8 mostra um exemplo de um alvo desenvolvido para uso em levantamentos a varredura LASER, fornecendo um meio eficiente para a verificação da acurácia LiDAR e calibração apropriada do sistema (STEINER et. al, 2009).

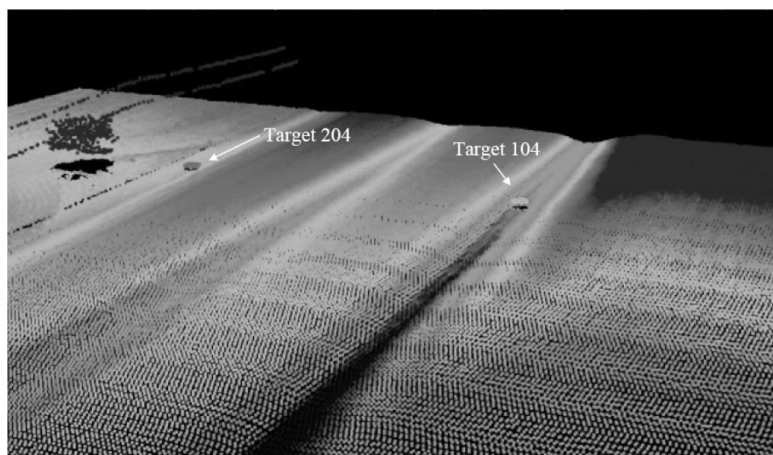
Figura 8: Exemplo de alvo para controle de qualidade de dados LASER.



Fonte: Csanyi e Toth (2007).

O alvo desenvolvido consiste em um círculo cujo interior é branco e o anel exterior é preto, que é colocado no solo sobre hastes de modo que fique mais alto que o terreno, como mostra a Figura 9.

Figura 9: Disposição dos alvos na nuvem de pontos LiDAR.

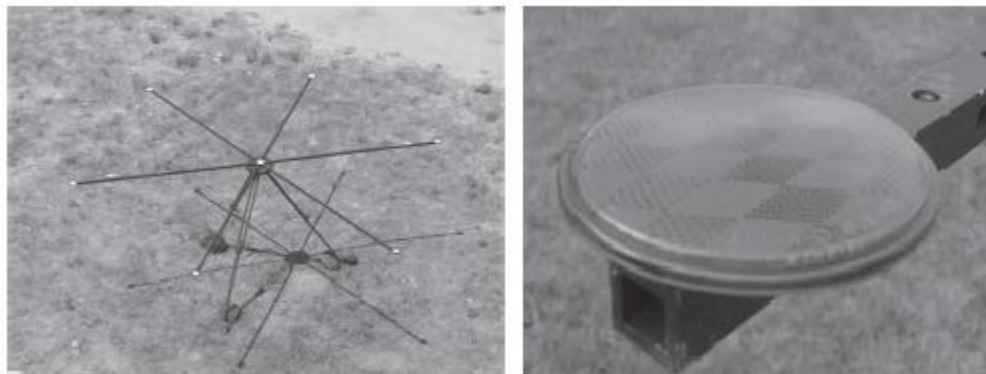


Fonte: Csanyi e Toth (2007).

O uso de alvos específicos para o controle de qualidade é geralmente caro e não fornece verificação acurada da qualidade posicional horizontal dos pontos, que é inferior à qualidade dos dados na direção vertical (HABIB et. al, 2008).

Canavosio-Zuzelski et al. (2013) utilizam um método baseado no ajustamento por mínimos quadrados para ajuste de um modelo matemático de um hexágono aos retornos do alvo por eles desenvolvido. O alvo apresenta seis braços de alumínio de comprimento conhecido, montados sobre um tripé de altura também conhecida, e no extremo de cada braço e no meio da montagem são inseridos alvos retrorreflexivos simples, como os usados em bicicletas (Figura 10), e que produzem retornos de intensidade elevados, sendo possível identificá-lo na nuvem de pontos.

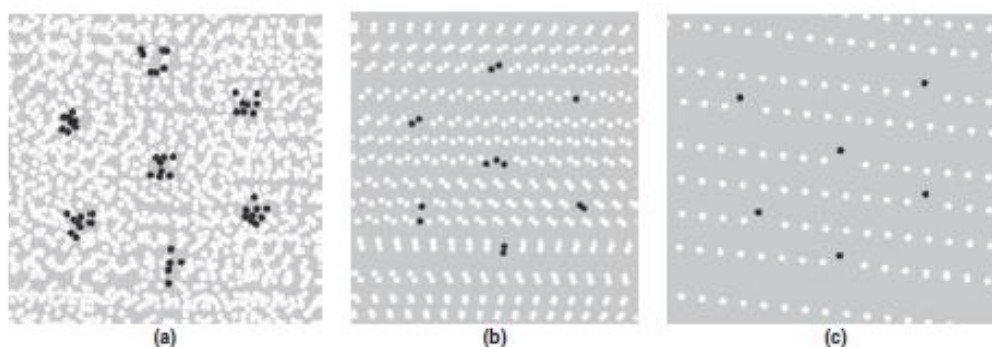
Figura 10: Alvo LiDAR retrorreflexivo hexagonal e retrorrefletor de bicicleta utilizados.



Fonte: Canavosio-Zuzelski et al. (2013).

Como a maioria dos SVLA têm a capacidade de armazenar a intensidade do retorno do pulso LASER, este tipo de alvo pode ser utilizado tanto para o processo de ajuste de parâmetros de *boresight*, como para o controle de qualidade absoluto da nuvem. O objetivo é calcular o centro do alvo nas faixas LASER. A identificação dos pontos pertencentes aos alvos pode ser feita pelo reconhecimento da forma, variações de elevação reconhecíveis, e maiores valores de intensidade nos retornos, como mostra a Figura 11.

Figura 11: Retornos de intensidade de um alvo LiDAR retrorreflexivo hexagonal a partir de várias densidades de pontos LiDAR: (a) 27,2 pontos/m², (b) 7,5 pontos/m², e (c) 2,2 pontos/m².



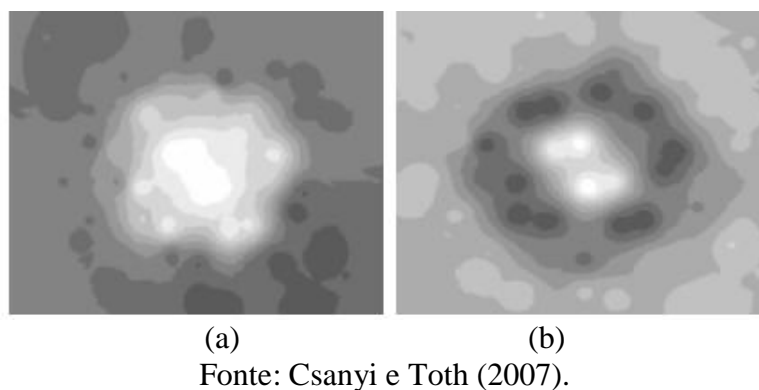
Fonte: Canavosio-Zuzelski et al. (2013).

Para o controle de qualidade relativo, a comparação entre as nuvens de pontos de diferentes faixas de voo é realizada pela correspondência de feições conjugadas nas faixas sobrepostas. Este procedimento pode ser realizado através da interpolação das intensidades de retorno e das distâncias medidas em uma malha regular, resultando em imagens de intensidade e de distâncias. São identificadas as feições nas imagens de intensidade e extraídas suas coordenadas tridimensionais. São comparadas, então, as feições situadas na

sobreposição de faixas. Como esta técnica é baseada em pontos distinguíveis, e como os pontos LASER são distribuídos irregularmente, a identificação destes pontos não é uma tarefa simples.

A Figura 12 mostra o alvo apresentado na Figura 8 em uma imagem, representando em escala de cinza, as distâncias LiDAR (a) e os valores de intensidade (b) obtidos.

Figura 12: Exemplo de alvo identificado nas imagens de distância (a) e de intensidade (b), interpoladas para o controle de qualidade.



Kager (2004) discute a sistemática de identificação de pontos ou feições homólogas em faixas de varredura sobrepostas. Como não é possível associar pontos homólogos diretamente em uma nuvem de pontos LASER, a identificação de feições geométricas, como planos e linhas retas, extraídas da intersecção de planos, podem ser mais simples. O ajuste planimétrico é executado identificando telhados de construções, ou outro tipo de feição identificável no terreno, e o ajuste altimétrico pode ser executado utilizando áreas sem a presença de vegetação. Estas feições identificadas também podem ser levantadas por posicionamento GNSS e serem utilizadas como “pontos” de controle para referenciar as faixas a um sistema de referência.

Schenk et. al (2001) usam uma outra abordagem para determinar a qualidade relativa dos dados LASER: comparando uma nuvem de pontos com elevações da superfície obtidas por fotogrametria, onde as feições geométricas derivadas da nuvem de pontos são comparadas com as extraídas de imagens aéreas.

3 MATERIAIS E SUAS CARACTERÍSTICAS

Nesta seção serão apresentados os principais materiais utilizados na pesquisa, sendo divididos em *hardware*, *softwares* e dados de apoio.

3.1 Hardware

Para o desenvolvimento de um SVLA de baixo custo, foram adquiridos, com recursos da FAPESP (processo 2013/50426-4 do projeto intitulado Sensoriamento Remoto 4D baseado em Veículos aéreos não tripulados para mapeamento da biodiversidade da Mata Atlântica Brasileira e suas alterações) um INS SPAN-IGM-S1 da NovAtel, uma unidade de varredura a LASER Ibeo LUX de aproximadamente 900 g, um *Raspberry PC* para armazenamento e integração dos dados coletados pelo sistema, o VANT SX8 produzido pela SensorMap com capacidade de voo de até 30 minutos (com carga de 5 kg), e uma unidade de conexão, também desenvolvida pela SensorMap, para a integração de todos os sistemas envolvidos e conexão dos mesmos a uma fonte de energia compatível para cada sistema.

Para o funcionamento do sistema inercial é necessário a conexão do receptor GNSS integrado ao INS a uma antena GNSS. No decorrer da pesquisa foram utilizados vários modelos de antenas GNSS de dupla frequência, de acordo com a disponibilidade durante a missão de voo e em função da dimensão das mesmas.

3.1.1 INS NovAtel SPAN-IGM-S1 e Acessórios

A SPAN-IGM-S1 (Figura 13) integra a solução do posicionamento GNSS com a IMU, constituindo um INS. A taxa de amostragem do GNSS é de até 20 Hz, enquanto que a taxa de medidas da IMU é de 125 Hz. Segundo o fabricante, a estabilidade das medidas dos giroscópios é degradada a uma taxa de 0,5° por hora. O desempenho da IMU com

interrupções de sinal GNSS, no modo de posicionamento pós-processado, é apresentado na Tabela 1. Os valores são referentes à raiz do erro médio quadrático.

Por possuir dimensão de 152 mm x 141,5 mm x 50,5 mm e peso de 540 g, é um equipamento adequado para embarcar em VANT.

Figura 13: IMU NovAtel SPAN-IGM-S1.



Fonte: NovAtel (2013).

Tabela 1: Acurácia da IMU com relação à posição, velocidade e atitude.

Duração da interrupção (seg)	Acurácia em Posição (m)		Acurácia em Velocidade (m/s)		Acurácia em Atitude (graus)		
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Roll	Pitch	Yaw
0	0,01	0,02	0,020	0,010	0,015	0,015	0,080
10	0,02	0,02	0,020	0,010	0,015	0,015	0,080
60	0,23	0,03	0,030	0,020	0,017	0,017	0,081

Fonte: NovAtel (2014).

Também foi adquirido o acessório FlexPak6 da NovAtel que é integrado à IMU e permite a utilização de duas antenas GNSS durante o levantamento. Assim é possível melhorar a qualidade do parâmetro de *heading*, ou azimute, durante o voo. O acessório montado junto à IMU é apresentado na Figura 14. Porém, devido ao aumento considerável de peso com a inclusão de mais equipamentos a bordo, os levantamentos foram realizados sem este acessório, visando primeiramente avaliar a necessidade de aumento da acurácia do azimute no levantamento.

Figura 14: FlexPak6 integrado à SPAN-IGM-S1.



Fonte: NovAtel (2013).

Como resultado do processamento dos dados do INS tem-se uma lista de pontos com coordenadas e atitude referentes às posições e orientações da plataforma durante sua trajetória, além de suas respectivas precisões e o instante correspondente a cada uma das posições. A orientação do sistema é dada em função dos ângulos κ - *kappa*, φ - *phi* e ω - *omega*.

3.1.2 Unidade de Varredura a LASER – Ibeo LUX 2010

O Ibeo LUX 2010 da Ibeo Automotive é um sistema de varredura a LASER desenvolvido para a aplicação em direção autônoma de veículos terrestres, podendo ser utilizado para a assistência ao condutor. A Figura 15 apresenta as dimensões do Ibeo LUX 2010 e um exemplo de instalação da unidade LASER em um automóvel para auxiliar na direção autônoma do veículo.

Figura 15: Ibeo LUX 2010 com suas dimensões; e Ibeo LUX instalado em veículo terrestre para direção autônoma.

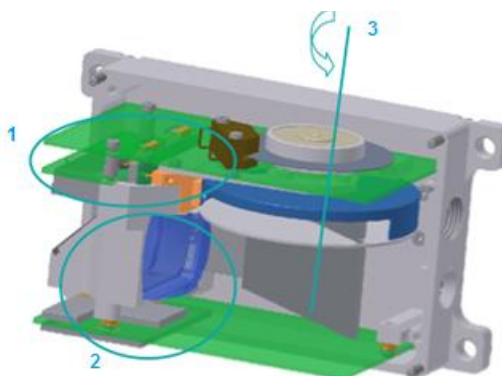


Fonte: BAIG et al. (2014).

A unidade de varredura apresenta dois emissores LASER, e quatro receptores arranjados em uma linha, que produzem quatro faixas de varredura no terreno. O mecanismo de varredura é composto por um espelho plano com superfície reflexiva nas duas faces, que rotaciona em uma única direção e gera padrões de varredura paralelos.

A Figura 16 mostra um esquema do interior da unidade LASER Ibeo LUX fornecido pelos fabricantes. Os números 1 e 2 indicam os sistemas de emissão e recepção dos pulsos LASER, respectivamente, enquanto o número 3 representa o eixo de rotação do espelho de varredura. Informações mais detalhadas sobre o funcionamento e dispositivos internos da unidade LASER não foram disponibilizadas pelo fabricante.

Figura 16: Interior do Ibeo LUX.



Fonte: Ibeo LUX – correio eletrônico.

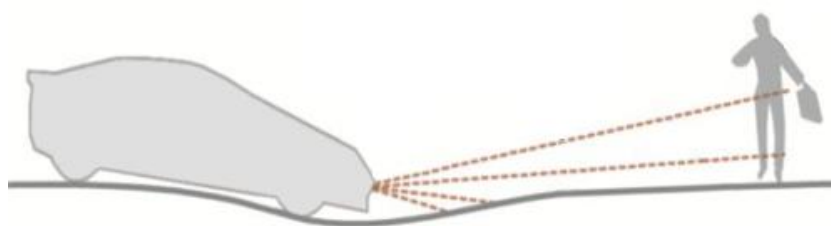
A característica de gerar quatro faixas de varredura é resultado da emissão dos feixes LASER a partir de quatro níveis de varredura com ângulos verticais diferentes. A unidade LASER apresenta dois emissores e um espelho com superfície reflexiva nas duas faces. Na varredura utilizando a primeira face do espelho são geradas duas faixas de varredura com os feixes LASER sendo emitidos em direções verticais distintas, enquanto na varredura da segunda face do espelho, os feixes LASER são emitidos em outras duas direções verticais distintas. Essa configuração de varredura é chamada de tecnologia multicamada (IBEO LUX, 2010).

No caso da aplicação do sistema em navegação terrestre, a tecnologia multicamada permite o cálculo e compensação do ângulo de arfagem (*pitch*), o que favorece a detecção dos objetos ao longo da trajetória, conseqüentemente auxiliando na tomada de decisão pelo condutor perante a proximidade de um obstáculo.

Para as aplicações desta pesquisa, a tecnologia multicamada pode ser interessante por possibilitar a “redundância” de informação, já que são emitidos dois pulsos LASER em um mesmo instante e com o mesmo ângulo de varredura do espelho.

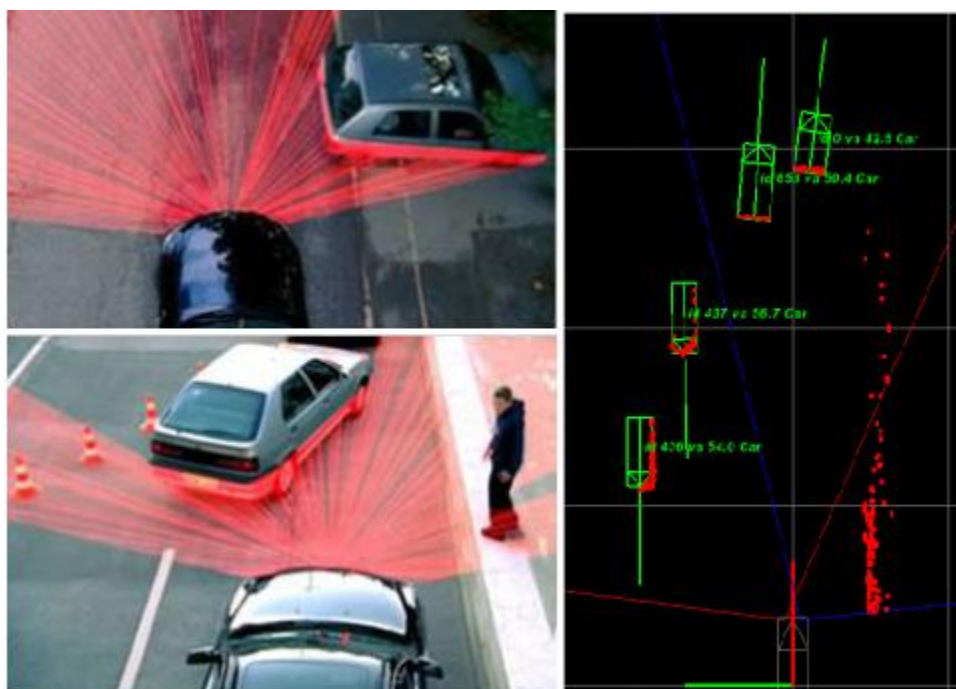
A Figura 17 mostra o esquema da detecção de objetos a partir da tecnologia multicamada, no caso da direção terrestre autônoma. A Figura 18 apresenta uma simulação da varredura a LASER com um automóvel em movimento e a detecção e classificação de objetos no campo de visão do LASER, em tempo real, utilizando o *software* da Ibeo LUX.

Figura 17: Detecção de objetos a partir da tecnologia multicamada.



Fonte: Ibeo Automotive (2010).

Figura 18: Aplicação do Ibeo LUX na direção autônoma de veículos terrestres; classificação dos objetos em tempo real pelo software.



Fonte: Project Team E-MOTION.

Além da varredura multicamada, o dispositivo também permite o armazenamento de até três ecos por emissão, característica que pode ser explorada em áreas de florestas, havendo maior probabilidade de retorno de pulsos refletidos do solo.

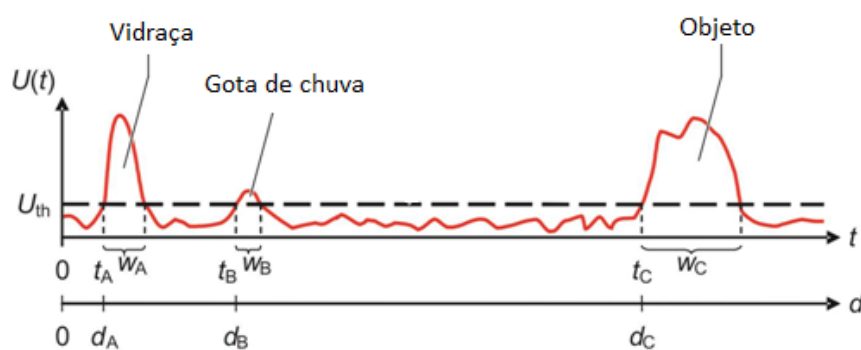
Outra característica desta unidade LASER é a baixa frequência em que opera. O Ibeo LUX 2010 pode ser configurado para operar com frequência de varredura de 12,5 Hz, 25 Hz e 50 Hz, quando configurado para operar na frequência de 25 Hz, a frequência de repetição de pulsos é de 24 kHz, resultando em uma densidade menor de pontos coletados quando comparado a sistemas de varredura a LASER aerotransportados, onde a frequência de repetição de pulsos é chega a ser de 150 kHz.

A unidade LASER fornece dois tipos de informações: dados de objeto e dados de varredura. Os dados de objeto só são fornecidos quando o sistema é configurado para operar na frequência de varredura de 12,5 Hz e é constituído por um conjunto de objetos cujas propriedades de tamanho, posição, velocidade, contorno e tipo podem ser atribuídos, porém esta configuração não será utilizada na pesquisa.

Os dados de varredura são as informações brutas da varredura: informação de ângulo (horizontal e vertical), distância e largura do pulso refletido. As distâncias são calculadas a partir do tempo de retorno do pulso LASER e velocidade da luz. A direção do objeto detectado é obtida considerando a posição angular do espelho durante a reflexão do pulso. A medida da largura do pulso refletido é apresentada na Figura 19, onde d é a distância do ponto de emissão do pulso até o objeto, w é a largura do pulso retornado, t é a metade do tempo decorrido da emissão até o retorno do pulso, U é a voltagem de saída e U_{th} é o limiar de voltagem, importante para filtrar os ruídos.

Assim, cada retorno detectado é representado por um ponto com posição, largura do pulso, nível de varredura e número do retorno.

Figura 19: Informação de largura do pulso e múltiplos retornos de um pulso LASER.



Fonte: Adaptado de Ibeo Automotive (2010).

Como características técnicas informadas pelo fabricante, pode-se destacar: divergência horizontal do feixe colimado de $0,08^\circ$; comprimento de onda de 895 nm a 915 nm; duração do pulso de aproximadamente 4,5 ns; resolução em distância de 4 cm; alcance de medida de 0,3 m até 200 m na direção 0° ; e alcance para alvos com 10% de reflexão de 50 m.

A Tabela 1 mostra exemplos de valores de alcance para os diferentes ângulos de varredura para alvos com 10 % de reflexão, segundo o fabricante.

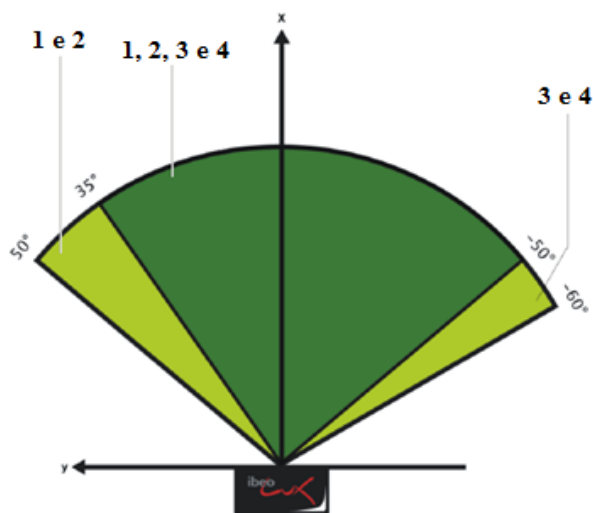
Tabela 2: Exemplos de alcance de medidas para alvos com 10% de reflexão.

Ângulo de varredura horizontal ($^\circ$)	Camada 1 (m)	Camada 2 (m)	Camada 3 (m)	Camada 4 (m)
50	8,9	9,5	0,0	0,0
46	25,8	27,1	0,0	0,0
40	32,0	33,3	0,0	0,0
36	33,1	35,0	5,0	5,7
32	34,6	36,4	34,4	34,1
25	41,8	43,8	43,3	42,5
20	45,0	47,3	47,0	46,2
10	48,5	50,0	50,6	49,5
0	50,0	51,7	51,5	51,2
-10	50,0	51,8	51,7	51,0
-20	50,0	51,9	51,6	51,5
-30	50,0	52,0	52,1	51,2
-40	46,6	48,7	48,8	47,6
-46	42,3	44,2	44,1	43,6
-48	38,4	40,0	42,5	41,5
-52	0,0	0,0	37,6	37,2
-56	0,0	0,0	32,2	31,6
-60	0,0	0,0	22,1	20,8

Fonte: Ibeo Automotive (2010).

O alcance horizontal é de 85° para as quatro camadas, podendo ser ampliado para 110° , porém com faixas angulares que apresentam informações de apenas duas camadas (Figura 20). As camadas inferiores (1 e 2) varrem de 50° a -50° , enquanto as camadas superiores (3 e 4) varrem de 36° a -60° , por isso o alcance horizontal de 85° para as quatro camadas.

Figura 20: Abrangência de varredura das camadas (vista de cima).



Fonte: Adaptado de Ibeo Automotive (2010).

A abertura vertical da varredura é de $3,2^\circ$, sendo que as duas camadas inferiores responsáveis pela informação na amplitude de 0° a $-1,6^\circ$ e as duas camadas superiores pela informação na amplitude de 0° a $+1,6^\circ$ (Figura 21).

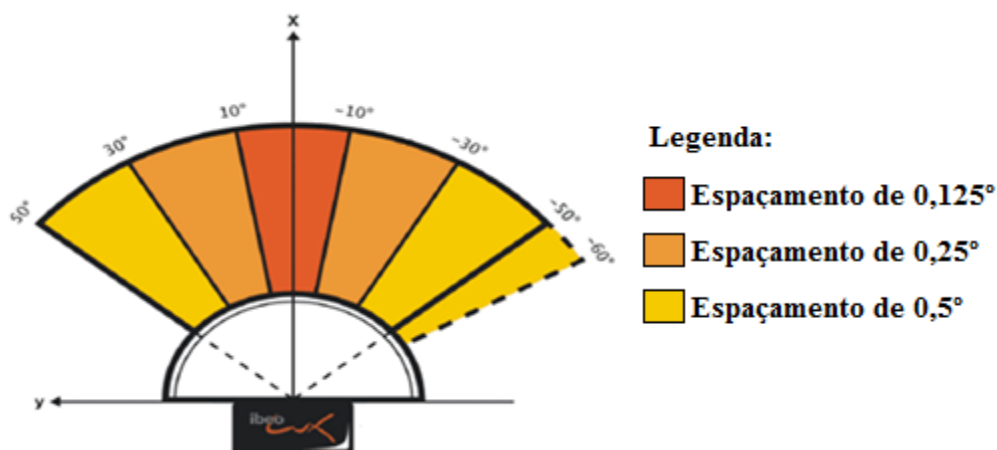
Figura 21: Abertura vertical do Ibeo LUX 2010 e suas quatro camadas de varredura.



Fonte: Ibeo Automotive (2010).

Com relação à resolução angular, o dispositivo pode ser ajustado para uma resolução constante em todo o alcance horizontal da varredura, e pode também ser ajustado para diferir por setor (somente na frequência de $12,5$ Hz), onde o setor central (10° a -10°) apresenta espaçamento angular de $0,125^\circ$, o setor mediano (30° a 10° e -10° a -30°) de $0,25^\circ$, e o setor lateral (10° a 30° e -30° a -60°) de $0,5^\circ$ (Figura 22).

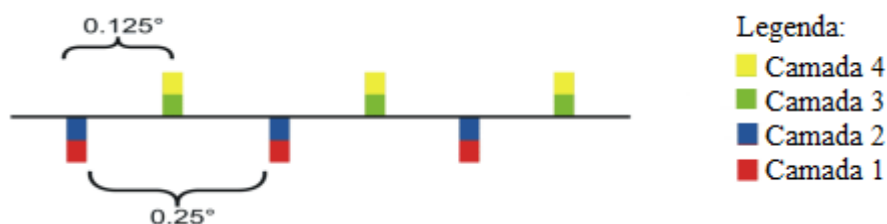
Figura 22: Resolução angular diferindo por setores.



Fonte: Adaptado de Ibeo Automotive (2010).

Quando a configuração da resolução angular for ajustada para diferir por setor, ao especificar um ângulo de resolução de $0,125^\circ$ para um certo alcance, então a distância entre duas camadas de varredura superior e inferior será $0,125^\circ$. O ângulo para a próxima medida da mesma camada será duas vezes maior, ou seja, $0,25^\circ$ (Figura 23).

Figura 23: Sobre a resolução angular entre camadas.



Fonte: Adaptado de Ibeo Automotive (2010).

O Ibeo LUX 2010 apresenta quatro tipos de interface para comunicação e transferência de dados: *Ethernet* – saída de dados de varredura, saída de dados de objeto, saída de mensagens de falha e avisos e recepção de comandos; *CAN* (*Controller Area Network*) – saída de dados de objeto, saída de mensagens de falha e avisos, recepção de informação sobre o movimento do veículo e recepção de comandos; *Sync* (*Sync IN/Sync OUT*) – sincronização do Ibeo LUX com um dispositivo externo e vice-versa; e *RS232* (*Recommended Standard 232*) – utilizada para sincronização de tempo com conexão com um receptor GNSS, por exemplo.

De acordo com Metcalfe e Boggs (1976), *Ethernet* é uma especificação desenvolvida para comunicação local entre dispositivos de rede. A *Ethernet* compreende as camadas mais

baixas de rede que possibilita a transmissão de dados por rede e a comunicação entre diversas redes conectadas. O protocolo de transmissão mais usado é o TCP/IP (*Transmission Control Protocol/ Internet Protocol*), e cada computador conectado a esta rede é identificado por um endereço IP. Assim, para um dispositivo se comunicar com a unidade LASER, é necessário que o mesmo esteja conectado na mesma sub-rede que o IP da unidade LASER.

CAN é um barramento serial para interligar dispositivos em rede (MAURICI, 2005). A comunicação é feita por eventos, o que reduz o tráfego na rede (SCHNEIDER ELECTRIC, 2007). De acordo com a documentação da interface CAN da Ibeo LUX, as mensagens têm sempre um identificador (ID), que define a mensagem e seu conteúdo, sendo o comprimento da mensagem sempre de 8 bytes.

Mensagens do tipo *Sync* servem para sincronização do tempo da unidade LASER Ibeo LUX. De acordo com a documentação da Ibeo LUX, o tempo é enviado ao sensor em um formato de tempo NTP (*Network Time Protocol* – Protocolo de Tempo para Redes) de 64 bits. O NTP é utilizado para um grupo de computadores se comunicarem e acertarem seus relógios baseados em uma fonte confiável de tempo.

O padrão de comunicação RS232 define as características elétricas e físicas, como conexões de *hardware*, pinagem e nomenclatura de sinais (SOUZA, 2015). A transmissão é serial, na qual os bytes são transmitidos *bit a bit*. De acordo com Souza (2015), no padrão RS232, sinais com tensão de -15 a -3 volts são considerados como valor binário um e sinais com tensão de 3 a 15 volts como valor binário zero.

Mesmo tendo sido desenvolvido para navegação terrestre autônoma, o Ibeo LUX 2010 tem sido utilizado em aplicações voltadas para monitoramento florestal e de identificação de árvores individuais, análise das propriedades das unidades presentes em áreas de reflorestamento e plantação de árvores, e cálculo da biomassa (JAAKKOLA et al., 2010; WALLACE et al., 2011; WALLACE et al., 2012; LIN et al., 2013).

3.1.3 Raspberry PC

O *Raspberry PC* é um microcomputador de baixo custo e pequena dimensão que abriga processador, porta para cartão de memória, porta USB (*Universal Serial Bus* – Porta Serial Universal), porta HDMI (*High-Definition Multimedia Interface* – Interface Multimídia de Alta Definição) e seus respectivos controladores, processador gráfico, além de memória RAM (*Random-Access Memory* – Memória de Acesso Aleatório), entrada de energia, e

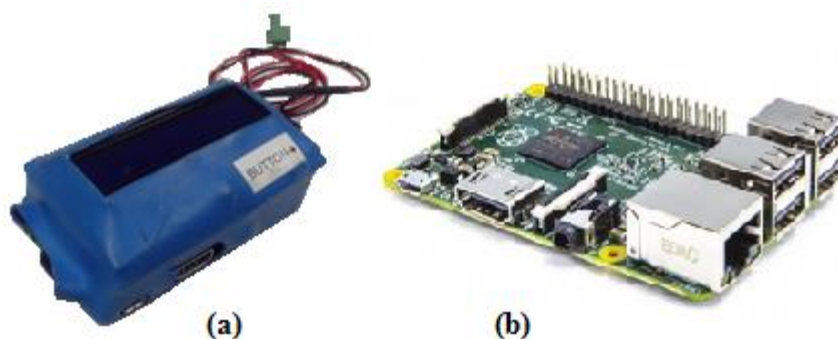
barramentos de expansão. O sistema operacional (Linux) é instalado em um cartão de memória SD, pois o computador não apresenta disco rígido próprio.

Por ser um computador de baixo consumo, é ideal para sistemas de controle e unidades que geram menos calor e gastam menos energia.

Para este projeto o *Raspberry PC* foi adquirido da empresa Autonomous Stuff, representante do fabricante Ibeo LUX nos Estados Unidos. Este equipamento veio configurado com um *script* que estabelece a comunicação do *Raspberry PC* com a unidade LASER e grava os dados coletados em um *pendrive* conectado ao microcomputador via porta USB. Além disso, foi acoplado um visor que possibilita a exibição de mensagens do sistema ao usuário e botão para controle de início e parada de gravação de dados.

A Figura 24 mostra o *Raspberry PC* utilizado para a gravação dos dados.

Figura 24: *Raspberry PC* do projeto (a) e partes do *Raspberry Pi 2* (b).



3.1.4 VANT – SX8

O SX8 consiste em um octóptero com estrutura em fibra de carbono e alumínio aeronáutico, garantindo que a estrutura seja mais leve, com redundância de componentes, garantindo maior segurança operacional. Possui autonomia de até uma hora de voo (com carga de 500 g) e opção de navegação autônoma a partir de planos de voo predefinidos na estação de controle do VANT.

A Figura 25 mostra o VANT já com o SVL montado na plataforma.

Figura 25: VANT SX8.



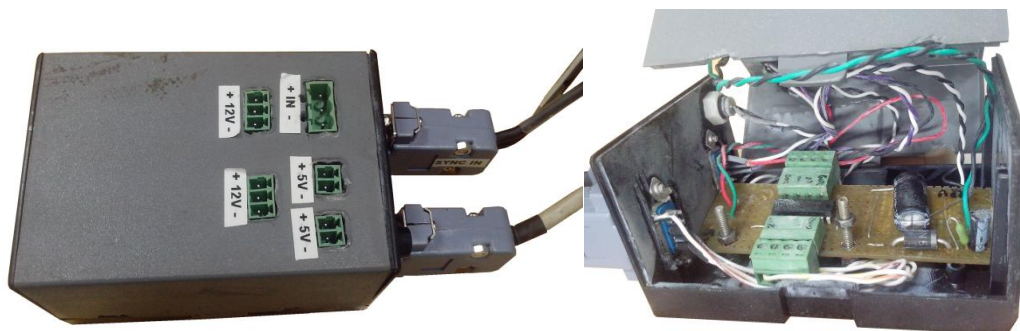
3.1.5 Caixa de Alimentação e Sincronização

Foi necessário desenvolver uma caixa de conexão que integra o INS (GNSS/IMU) com a unidade LASER e *Raspberry PC*, estabelecendo a comunicação entre eles, e que estabelece a conexão com a unidade de alimentação de energia. Esta unidade permite a comunicação com a unidade LASER e o *Raspberry PC* para a sincronização do tempo entre todos os dispositivos. A sincronização implementada é descrita no tópico 4.1.1.

Além da função de estabelecer a comunicação entre os sistemas do SVL, a caixa de conexão também é responsável pela distribuição de energia a esses sistemas. A caixa é conectada a uma fonte de energia e alimenta os sistemas através de duas saídas de 12 volts (para a unidade LASER e IMU), e duas saídas de 5 volts (onde uma delas é para suprimento do *Raspberry PC*). A antena GNSS é conectada diretamente na IMU.

A Figura 26 apresenta a caixa de conexão desenvolvida pela SensorMap.

Figura 26: Caixa de conexão desenvolvida pela SensorMap.



3.2 Softwares

Nesta seção será apresentada uma breve descrição de alguns dos programas utilizados no desenvolvimento da pesquisa.

3.2.1 *Inertial Explorer* e *GNSS Data Converter* (NovAtel)

As IMUs desenvolvidas pela NovAtel fornecem um arquivo de extensão *.gps*, no qual estão armazenadas as observações coletadas no levantamento. Para o processamento dessas informações é necessário utilizar o aplicativo *GNSS Data Converter* da NovAtel, que criará três novos arquivos a partir do arquivo *.gps* fornecido pela IMU: um com os dados inerciais (arquivo de extensão *.imr*), um com os dados GNSS brutos (arquivo de extensão *.gpb*) e outro com as efemérides (arquivo de extensão *.epp*) do levantamento.

O aplicativo *GNSS Data Converter* faz parte do pacote do *software Inertial Explorer* da NovAtel. Para extrair os dados inerciais da SPAN-IGM-S1 é necessário ter o pacote do *Inertial Explorer 8.5* ou outra versão superior.

Após convertidos os dados, o processamento é realizado no próprio *Inertial Explorer 8.5*, onde é possível processar somente os dados do GNSS da trajetória percorrida pelo sistema, ou os dados GNSS/IMU do levantamento. Este *software* permite analisar informações de posição, velocidade, aceleração, observações de satélites GNSS ao longo do tempo, perdas de sinais, precisões obtidas em cada tipo de medida, entre outras. Um documento *.txt* é exportado como dado de saída do processamento, sendo possível escolher as informações a serem apresentadas neste documento, desde informações de posição, atitude, velocidades e precisões, até o sistema referencial de projeção e intervalo de tempo entre as observações exportadas. Um exemplo de arquivo de saída do processamento GNSS/IMU é apresentado no Anexo A.

O aplicativo *GNSS Data Converter* também foi utilizado para a conversão dos arquivos RINEX (*Receiver Independent Exchange format*) das bases utilizadas no processamento das observações GNSS do levantamento, em extensões compatíveis com o *Inertial Explorer* (*.epp*, *.gpb*, *.sta* – arquivo de dados da estação).

3.2.2 Ibeo LASER View

Este *software* foi fornecido junto com a unidade LASER e permite a visualização dos dados de varredura LASER em tempo real e configuração da unidade LASER quanto às informações a serem gravadas (com/sem a largura do pulso recebido, quantidade de retornos por pulso, dados de objeto etc.), quanto à abertura angular de varredura (θ) e a frequência de varredura.

Quando a unidade LASER está conectada diretamente ao computador onde o *Ibeo LASER View* está instalado, é possível visualizar a cena escaneada e gravar as informações do levantamento no ambiente do *software*.

Quando o levantamento é gravado no ambiente do *Ibeo LASER View*, o arquivo gerado é salvo no formato binário de extensão *.idc*, sendo possível reproduzir o levantamento posteriormente no *software*. No entanto, não é possível ter acesso às informações presentes neste arquivo *.idc*, obtido da gravação no ambiente do *software*. Logo, o *software* foi utilizado apenas para a visualização de testes em laboratório e para a configuração de varredura da unidade LASER.

3.2.3 Outros Softwares e Programas Importantes

Foi necessária a modificação de alguns códigos existentes e a implementação de novos *scripts* para a adequação à pesquisa. Para isso, contou-se com o auxílio de um profissional da área de computação e da empresa SensorMap.

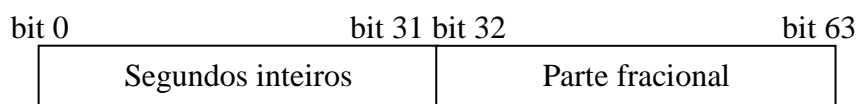
Com relação ao código de gravação dos dados provenientes da unidade LASER, o *script* python inserido no *Raspberry PC* pelo fabricante era responsável por obter e decodificar os dados do arquivo binário fornecido pela unidade LASER (formato *.idc*) e criar um arquivo em formato *.csv* com alguns dados decodificados.

No entanto, o conjunto de dados fornecido no arquivo *.csv* não era compatível com as informações de interesse para o desenvolvimento da pesquisa, e o *script* foi modificado para armazenar apenas o arquivo em formato binário (*.idc*). Posteriormente à aquisição dos dados, já em outro computador, uma segunda modificação do código original decodifica as informações contidas no arquivo *.idc* (seguindo as especificações apresentadas na documentação da interface *Ethernet* da unidade LASER) e armazena em um arquivo de formato *.csv* apenas as informações de interesse.

Os dados de varredura, de interesse para a pesquisa, conforme a documentação do protocolo de dados *Ethernet* da Ibeo LUX, são dados do tipo 0x2202 (em hexadecimal), diferente do tipo de dado configurado pelo fabricante para ser armazenado no arquivo *.csv*. No Anexo B é apresentado um trecho de um arquivo *.csv* gerado pelo *script* modificado.

Uma das informações fornecidas pela unidade LASER é o tempo inicial e final de cada varredura completa do espelho, denominada de pacote de dados. O tempo é fornecido no padrão *NTP Timestamp*, que consiste em 64 bits sem sinal, em que os primeiros 32 bits representam o número inteiro de segundos desde a época de início da contagem do tempo NTP, isto é, em 0h de 1° de janeiro de 1900, e os últimos 32 bits representam a parte fracionária dos segundos decorridos (MILLS, 1991). A Figura 27 apresenta a designação dos bits do formato *NTP Timestamp*.

Figura 27: Formato NTP Timestamp.



Para facilitar na manipulação e verificação da sincronização dos dados, foi implementado um código em linguagem C que converte o parâmetro *NTP Timestamp* recebido pela unidade LASER 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”.

Sistemas operacionais como Linux e Windows utilizam o tempo UNIX como referência para a realização de operações baseadas em tempo. Assim, para adequar o cálculo de tempo de acordo com as funções de bibliotecas de tempo do sistema operacional do *Raspberry PC*, é necessário converter o parâmetro de tempo de NTP para UNIX.

O tempo UNIX tem sua contagem iniciada à 0h de 1° de janeiro de 1970, e o NTP tem sua origem em 0h de 1° de janeiro de 1900, sendo a diferença de tempo entre os dois sistemas de 2208988800 segundos, valor que é subtraído do número de segundos inteiros do *NTP Timestamp* para conversão em tempo UNIX (HANDLEY et al., 2006). Esta operação é aplicada no *script* implementado para a conversão do tempo em data e hora. Além da conversão de NTP para UNIX, também é aplicada a função ‘localtime()’ que calcula a hora local a partir do tempo UNIX dado em segundos.

Como os dados processados do sistema inercial são fornecidos no sistema de tempo GPS, é necessário que os dados LASER estejam no mesmo sistema de tempo para o correto

processamento da nuvem de pontos. Assim, foi implementada a conversão do tempo fornecido nos pacotes de dados LASER, referenciados à hora legal local, para o tempo GPS.

A hora local consiste na hora UTC (*Universal Time Coordinate* – Tempo Universal Coordenado) corrigida do fuso horário local, ou seja, para a conversão da hora local para UTC deve-se somar as 3 horas referentes ao fuso de nossa região, ou 2 horas no caso de horário de verão.

O tempo UTC difere do tempo GPS por um número inteiro de segundos. A divulgação da relação entre o UTC e o tempo GPS é realizada através dos boletins de tempo do USNO (*United States Naval Observatory* – Observatório Naval dos Estados Unidos) e do BIPM (*Bureau International des Poids et Mesures* – Escritório Internacional de Pesos e Medidas) (NADAL e HATSCHBACH, 2000).

De acordo com o *Bulletin C 51* do IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service* – Serviço Internacional de Sistemas de Referência e Rotação da Terra), a partir da data de 1º de julho de 2015 a diferença de tempo entre os sistemas UTC e TAI (Tempo Atômico Internacional) é de -36 segundos. Como o TAI difere do tempo GPS por 19 segundos, a diferença entre o UTC e o tempo GPS é de 17 segundos, sendo que de 1º de julho de 1012 até 1º de julho de 2015 a diferença era de 16 segundos. Portanto, para a conversão para o tempo GPS são somados 17 segundos ao tempo UTC, operação também implementada no *script* de conversão do tempo de *NTP Timestamp* para data e hora.

Também foi implementado um programa para armazenar, a cada 5 minutos, a temperatura do sistema do *Raspberry PC*, juntamente com a hora correspondente, em um arquivo *.txt* na memória interna do microcomputador, sendo possível correlacionar eventos de falhas durante o levantamento com temperaturas elevadas do sistema acessando o arquivo *.txt* com as medidas de temperatura em função do tempo posteriormente.

Para a comunicação com o sistema GNSS/IMU e gravação dos dados brutos provenientes do sistema inercial, foi desenvolvido pela SensorMap um *script* que, além de realizar estas tarefas, também atualiza a data e hora do *Raspberry PC* através de mensagens de tempo recebida do sistema inercial.

Foi implementada também uma solução para que os dados brutos de posicionamento e navegação provenientes do GNSS/IMU fossem armazenados na própria memória do *Raspberry PC*, evitando problemas com relação à entrada e saída de dados num mesmo local, no caso a porta USB, podendo gerar conflitos e até perda de informações.

Como em testes em laboratório e em campo foi constatado o travamento de portas virtuais do sistema inercial com frequência, prejudicando a comunicação com o sistema

inercial, foi desenvolvido um *script* que realiza a reinicialização do *script* responsável por realizar a comunicação com o sistema inercial, reinicializando e reconfigurando as portas virtuais do sistema.

Para controlar a ordem de execução dos *scripts* e exibir informações de controle e monitoramento no painel LCD (*Liquid Crystal Display* - Tela de Cristal Líquido) do *Raspberry PC*, foi desenvolvido outro *script*. Todos os códigos foram integrados no *Raspberry PC* de modo que a seguinte sequência seja executada:

- 1) Ao iniciar o *Raspberry PC*, o programa de medida de temperatura é inicializado e as temperaturas são enviadas ao painel até que o usuário solicite o início do programa de comunicação com o INS;
- 2) Ao ser iniciado o programa de comunicação com o INS, o *Raspberry PC* apresenta no painel o tamanho do arquivo *.gps* (em *KiloBytes* - KB), gerado durante o funcionamento do sistema GNSS/IMU e as mensagens de situação do alinhamento da IMU (processo necessário para seu correto funcionamento e que será descrito mais adiante no item 4.2.1) a cada segundo;

Caso o sistema operacional do *Raspberry PC* ou a própria IMU falhem, o que pode ser constatado através da estagnação do tamanho do arquivo *.gps* apresentado no painel LCD, é possível reiniciar o sistema e solucionar o problema antes de iniciar o levantamento.

- 3) Ao ser constatado o correto funcionamento do sistema GNSS/IMU pelo usuário, o usuário solicita a execução do programa que realiza a comunicação com a unidade LASER e a gravação dos dados de varredura só é iniciada quando o usuário solicita o início da varredura.

A interação do usuário com a sequência de execução dos programas implementados é realizada através da pressão do botão presente no corpo do *Raspberry PC*, indicado por uma seta gravada na capa protetora do microcomputador (Figura 28). A documentação dos códigos implementados e integrados no *Raspberry PC*, bem como um diagrama explicativo da sequência de execução dos *scripts*, são apresentados no Anexo C. Todos os programas mencionados acima foram terceirizados.

Figura 28: Indicação do botão presente no corpo do Raspberry.



Após o levantamento com o SVL, é possível transferir os arquivos gerados para posterior processamento dos dados. Para a transferência de arquivos entre o *Raspberry PC* e outro computador foi utilizado o *software FileZilla*, por ser um *software* livre e de fácil operação. Este utiliza o protocolo de transferência de arquivos (*File Transfer Protocol – FTP*), que é uma forma rápida de transferir arquivos entre um computador chamado “cliente” e um servidor. Para estabelecer a conexão com o servidor, o “cliente” deve fornecer um nome de usuário e senha e o nome ou endereço de IP do servidor. A conexão entre o servidor (*Raspberry PC*) e o cliente (outro computador) é via cabo de rede *Ethernet*.

Para o processamento dos dados da varredura LASER e geração das nuvens de pontos, foi implementado pela autora um conjunto de programas em linguagem C++ (descritos no item 4.2.2.2) que têm como dados de entrada o arquivo *.txt* gerado do processamento dos dados GNSS/IMU e o arquivo *.csv* convertido do arquivo *.idc* da varredura LASER.

Para a visualização, identificação de pontos, realização de medidas aproximadas e análise de perfis das nuvens de pontos geradas, foi utilizado o *software Fugro Viewer*.

Para o cálculo dos ângulos de *boresight* foi implementado um *script* em ambiente *Scilab*.

Para a realização de algumas etapas do controle de qualidade foi utilizada a biblioteca *LASTools*, por ser uma ferramenta livre que auxilia na manipulação de nuvens de pontos, e o *software Global Mapper* para a geração de Modelo Digital de Superfície (MDS) e alguns resultados gráficos para a análise.

3.3 Dados de apoio

Para a verificação da qualidade das nuvens de pontos obtidas pelo sistema desenvolvido, os resultados obtidos foram comparados com produtos obtidos de levantamentos utilizando outros sistemas de aquisição.

Um MDS obtido de um levantamento fotogramétrico utilizando uma câmara hiperspectral embarcada em VANT, realizado por pesquisadores da UNESP no Santuário “Morada de Deus”, foi utilizado para auxiliar na verificação da sincronização do tempo dos sistemas em um dos experimentos.

Para a análise da nuvem de pontos obtida de um levantamento terrestre com o sistema desenvolvido, foi utilizada como referência uma nuvem de pontos, da mesma área, obtida de um levantamento utilizando o sistema de varredura a LASER DynaScan M150, instalado em um veículo terrestre, para comparação.

Para o controle de qualidade de um levantamento com o sistema embarcado em VANT, foi utilizada como referência uma nuvem de pontos densa, disponibilizado pela empresa SensorMap. A nuvem de pontos fornecida foi obtida de um levantamento aéreo, de parte da área urbana do município de Presidente Prudente, utilizando o sistema comercial RIEGL LMS Q680i.

4 DESENVOLVIMENTO

Antes da aquisição de dados a bordo do VANT, foram realizados experimentos em laboratório e em plataformas terrestres para analisar o desempenho do sistema montado e verificar a consistência da nuvem de pontos adquirida em cenas com a presença de objetos bem definidos, contendo planos e quinas.

O desafio inicial era a integração dos sistemas e a gravação das informações necessárias obtidas, de modo a permitir realizar a correta sincronização das medidas e o cálculo das coordenadas da nuvem de pontos, já que os dados da varredura a LASER precisam ser associados à posição e atitude da plataforma no exato momento da medida.

Além do desafio inicial mencionado, foram estudadas abordagens para a calibração do sistema utilizando tipos de alvos específicos inseridos na cena em posições conhecidas e o uso de feições identificáveis na nuvem de pontos para a estimativa dos ângulos de *bore sight* e para o controle de qualidade absoluto e relativo das nuvens geradas.

Neste tópico serão descritas as fases do desenvolvimento da pesquisa, desde a montagem do sistema até o controle de qualidade realizado.

4.1 Montagem do Sistema

Esta etapa inclui o estabelecimento da comunicação entre os sensores envolvidos e a sincronização dos dados medidos, além da própria montagem do sistema através da disposição e fixação dos equipamentos na plataforma terrestre e no VANT.

4.1.1 Integração de Sensores e Sincronização dos Dados

A integração dos sistemas foi realizada pela SensorMap, que desenvolveu as conexões de alimentação e comunicação entre os sensores. Foram, então, realizados testes em laboratório para a verificação da sincronização e gravação dos dados de cada um dos sistemas, além da análise do conjunto de dados gerados pelo INS e pela unidade LASER, objetivando

também a familiarização com os tipos de dados que seriam processados e quais as informações possíveis de serem obtidas de cada sistema.

Como o SVL é composto por três sistemas que precisam ser configurados individualmente e se comunicarem para a gravação dos dados necessários, foi preciso estudar quais as portas de comunicação disponíveis em cada um dos sensores e qual seria a melhor maneira de integrá-los.

Como discutido anteriormente, é necessário que as medidas obtidas dos componentes de um SVL estejam referenciadas a um mesmo sistema de tempo para a posterior associação correta dos valores de posição e atitude da plataforma com as medidas de ângulo e distância da varredura. Com base nisso, foi definido que todos os sistemas deveriam ser sincronizados com o tempo GPS em função de sua precisão e estabilidade.

Segundo o fabricante, a unidade LASER sincroniza seu cronômetro interno com uma referência de tempo externa, podendo ser sincronizado por ajuste de tempo via *Ethernet*, via *CAN* e por ajuste de tempo autônomo por sinais GNSS externos via *Sync In* e interface RS232.

No método de sincronização de tempo automático (configuração padrão) o sensor recebe um comando de sincronização de tempo via *CAN* ou *Ethernet* ou detecta um sinal GNSS (NMEA – *National Marine Electronics Association/PPS*) ajustando seu cronômetro interno. Porém a sincronização pode ser configurada para que seja baseada somente via uma das três interfaces (NMEA/PPS, *ETHERNET*, *CAN*) ignorando os comandos de sincronização de tempo de outras interfaces.

Para a sincronização de tempo por sinal GNSS, a fonte de tempo deve fornecer um sinal PPS e mensagens de dados NMEA com a informação de tempo absoluta atual. Enquanto o sinal NMEA geralmente é fornecido como um fluxo de dados RS232 e pode então ser conectado diretamente à entrada RS232 do sensor, o sinal PPS é geralmente fornecido como sinal TTL (*Transistor Transistor Logic*), que precisa ser convertido em fluxo de dados RS232 antes de enviá-lo à entrada de sincronização do sensor (Ibeo Automotive, 2013).

O protocolo NMEA é o padrão utilizado para interfacear dispositivos de navegação, como receptores GNSS. O padrão NMEA 0183 define as características elétricas dos sinais, protocolo de transmissão de dados, especificação de tempo e formato das sentenças (SILVA, 2009).

As mensagens NMEA são transmitidas no formato ASCII na forma de sentenças de tamanho variável, mas com um número limitado de caracteres, em que todo início de sentença NMEA começa com um “\$”, sendo seguido por cinco caracteres que designam o campo de

endereços, e o restante da linha é composto por campos de dados delimitados por vírgulas. De acordo com Gomes (2012), ao receber os dados, os interpretadores utilizam o último campo da sentença recebida, um controle de soma, para verificar a integridade do conteúdo.

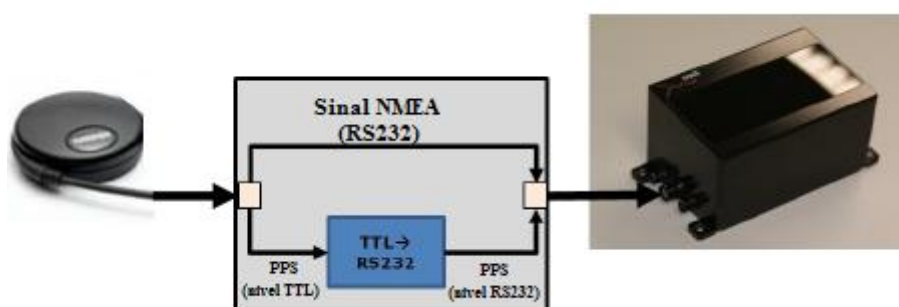
Existem vários tipos de mensagens NMEA, cada uma com uma designação própria que indica qual o tipo de dado que contém, podendo fornecer informações referentes à localização (latitude, longitude, e altitude), velocidade e dados temporais (data e hora) (GOMES, 2012).

O padrão TTL também define um padrão elétrico de tensão identificada por dispositivos.

Em Reis (2009) é descrito o processo de sincronização de tempo, por servidor NTP, entre um receptor GNSS e um computador através das mensagens NMEA e PPS, trazendo uma breve explicação sobre o que trazem estes dois tipos de mensagens.

A Figura 29 mostra o esquema de uma unidade LASER Ibeo LUX conectada a uma antena GNSS para a sincronização de tempo, utilizando um conversor de sinal TTL em RS232.

Figura 29: Conversão Sinal PPS para sincronização de tempo.

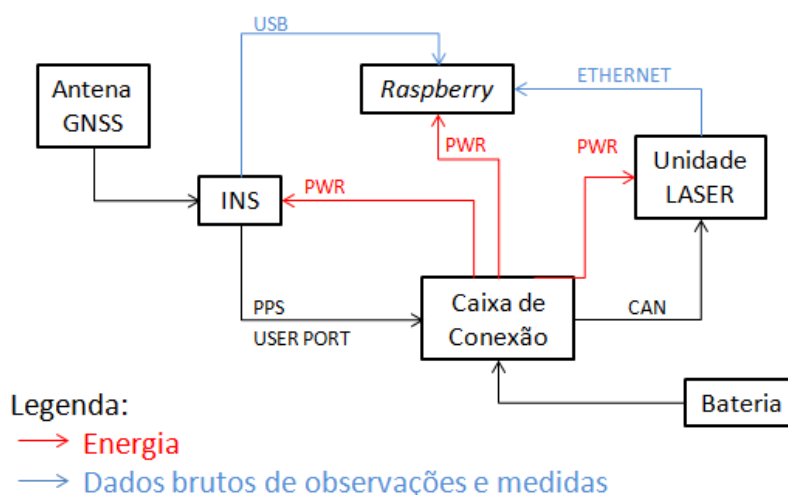


Fonte: Ibeo Automotive (2013).

A conversão do sinal PPS do nível TTL para o nível RS232 foi implementada pela empresa SensorMap, de modo que, ao conectar a unidade LASER à caixa de alimentação e sincronização desenvolvida, o sensor sincroniza o seu relógio interno com o tempo GPS e os pacotes de dados já são gravados com “etiquetas” de tempo sincronizadas com o sistema de tempo utilizado pelo INS. A caixa de alimentação e sincronização recebe do INS as mensagens NMEA/PPS e as envia para a unidade LASER já com o sinal PPS convertido para RS232.

A Figura 30 apresenta um diagrama com os componentes do SVL desenvolvido e as conexões entre eles.

Figura 30: Diagrama de conexões entre os componentes do sistema desenvolvido.



Como as mensagens de varredura da unidade LASER são enviadas via *Ethernet*, para o armazenamento dos dados, a conexão é feita diretamente na porta de rede do *Raspberry PC*. Já os dados provenientes da IMU são enviados pela porta USB, que também é conectada diretamente no *Raspberry PC*. Para facilitar a verificação dos dados ainda em campo, optou-se por armazenar os dados da unidade LASER em um *pendrive*. Assim, ao receber as mensagens de varredura, o programa executado pelo *Raspberry PC* envia o comando para a gravação na porta USB correspondente à porta do *pendrive*. Os dados da IMU são gravados na memória do próprio *Raspberry PC* e são acessados via rede após o levantamento.

4.1.2 Montagem da plataforma

Para a realização de testes em veículo terrestre, foi desenvolvida uma estrutura de suporte para a instalação de todos os componentes do sistema de forma que a posição relativa entre a IMU e a unidade LASER não fosse alterada durante o levantamento. Para isto o suporte foi perfurado de modo que os dois sensores fossem fixados na estrutura. Com relação à antena GNSS, buscou-se a instalação da mesma em local onde esta também não alterasse sua posição relativa à IMU durante o levantamento. A Figura 31 mostra o sistema montado em um suporte para instalação em veículo terrestre e suas conexões físicas e a Figura 32 mostra o sistema montado em veículo terrestre.

Figura 31: Sistema montado e suas conexões.

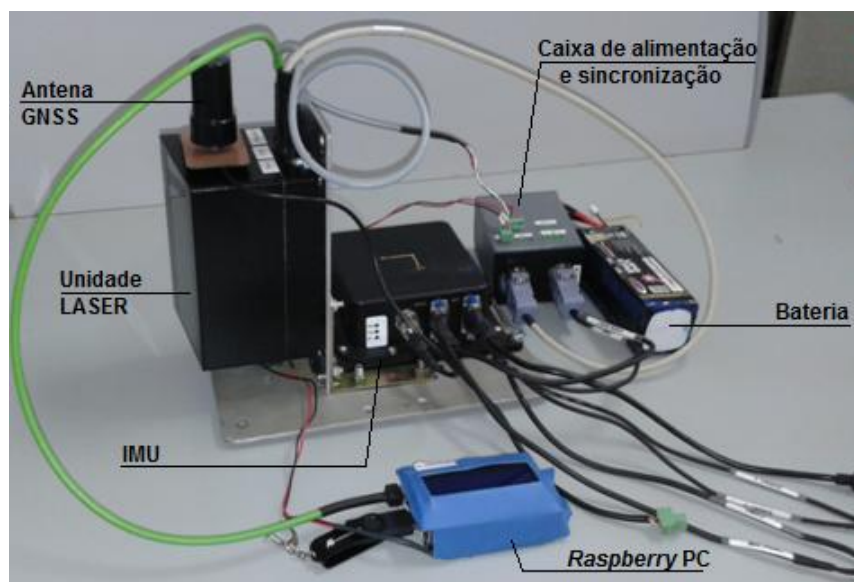
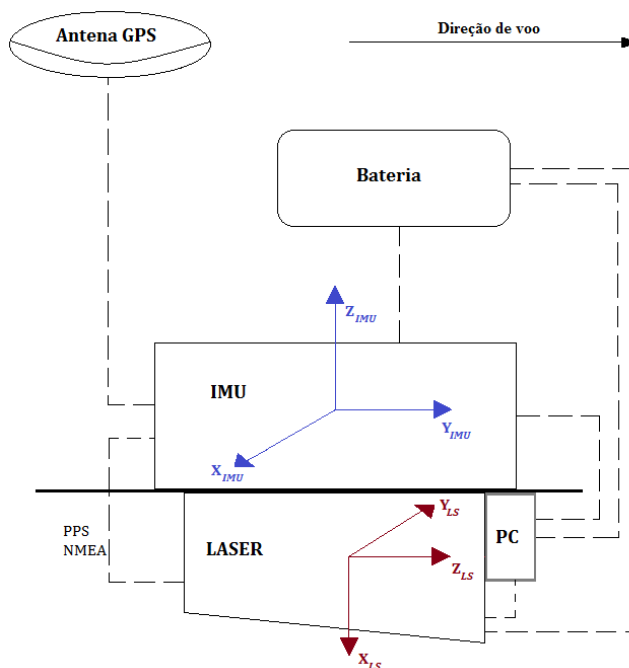


Figura 32: Sistema montado em plataforma terrestre.



Para a montagem do sistema na plataforma VANT, foi definido o esquema ilustrado na Figura 33, onde é possível visualizar a orientação dos sistemas da IMU e da unidade LASER em relação à direção do voo. A plataforma montada é apresentada na Figura 25.

Figura 33: Esquema da montagem do sistema em plataforma VANT.



Uma observação importante a considerar na montagem dos sensores nas plataformas é a disposição dos eixos da IMU e unidade LASER com relação à direção de deslocamento da plataforma.

De acordo com o manual da SPAN-IGM-S1, além de ser necessário montar a IMU em uma posição fixa, de modo que a distância entre o centro de fase da antena GNSS e a mesma não se altere, a mesma deve ser posicionada de forma que o eixo Z positivo marcado no corpo da IMU aponte para cima e o eixo Y aponte para a direção de deslocamento do sistema. É importante também que a antena GNSS seja instalada o mais próximo possível da IMU e a distância entre elas deve ser medida com precisão milimétrica preferencialmente. Quanto mais próxima a antena GNSS da IMU, mais acurada a solução da posição do sistema inercial (NOVATEL, 2013).

A orientação dos eixos da unidade LASER em relação à plataforma não segue uma imposição, como à da IMU, porém é importante atentar à disposição dos mesmos em relação à IMU por serem parâmetros de entrada importantes no processamento dos dados.

4.2 Operação e Processamento

4.2.1 Inicialização do Sistema Inercial

Para o bom desempenho da IMU é necessário realizar o chamado alinhamento inicial, que é o processo de estimativa da atitude inicial do sistema. Ao ser iniciado, o sistema não possui informação de posição, velocidade ou atitude, por isso o alinhamento é uma etapa importante.

Quando o sistema é ligado, os primeiros satélites são rastreados e o tempo é grosseiramente solucionado. Com o rastreamento de satélites em número suficiente, a posição é calculada e o tempo do receptor é refinado, sendo preciso o suficiente para iniciar as medições de tempo da IMU. A rotina de alinhamento é iniciada e, quando o alinhamento é completo, o sistema faz a transição para o modo navegação. No modo navegação a IMU calcula a solução pelo acúmulo dos incrementos de velocidade e rotação medidos, gerando posição, velocidade e atitude. A solução é refinada utilizando atualizações de posição do receptor GNSS (NOVATEL, 2013).

O alinhamento pode ser tanto estático quanto cinemático, e ambas as formas são recomendadas pelo fabricante.

Para o alinhamento estático refinado, é necessário pelo menos 10 minutos de coleta estática dos dados inerciais. Um alinhamento grosseiro é realizado nos primeiros 2 minutos de dados estáticos e o refinamento é realizado posteriormente a este período. No entanto, de acordo com o manual da NovAtel, com 5 a 10 minutos de observação, atualizações obtidas do GNSS permitem que a IMU forneça informação de atitude consistente com o nível de acurácia alcançado pelo conjunto de acelerômetros e giroscópios, sendo o alinhamento estático refinado opcional.

De acordo com o fabricante, são necessários de 1 a 2 minutos de alinhamento estático no início e fim de cada conjunto de dados para o processamento GNSS/IMU. Se nenhum dado de alinhamento estático estiver disponível, ou for necessário realinhar o sistema devido a uma falha nos dados inerciais, é possível realizar o alinhamento em movimento que, sob condições adequadas, produz resultados aceitáveis. Para isso, é necessário que o veículo esteja em movimento retilíneo e nivelado por pelo menos 4 segundos (NOVATEL, 2010).

Segundo o fabricante, o alinhamento cinemático começa quando o receptor tem uma boa posição determinada pelo GNSS, a solução de tempo estiver refinada e a plataforma estiver a uma velocidade mínima de 5 m/s (aproximadamente 18 km/h). Durante o

alinhamento cinemático o ângulo de rolagem deve ser mantido a menos de 10°, sendo preferível o deslocamento em linha reta.

No alinhamento cinemático a solução GNSS é usada como uma aproximação inicial da orientação dos eixos da IMU, sendo a atitude estimada a partir do vetor de velocidade GNSS. Por isso, é importante que a IMU seja orientada na plataforma conforme o fabricante sugere, ou seja, com o eixo Z positivo apontando para cima e o eixo Y positivo apontando para a direção de deslocamento da plataforma (para frente).

Para o bom funcionamento da rotina de alinhamento cinemático, o azimute e arfagem (*pitch*), estimados a partir da trajetória observada pelo GNSS, devem corresponder ao azimute e arfagem da orientação da caixa da IMU durante o levantamento. Ou seja, a trajetória da plataforma deve corresponder com a direção Y da IMU, observação importante a ser considerada quando embarcada em plataforma aérea, em situações em que ocorra o movimento de deriva da plataforma ocasionado por ventos laterais.

A precisão do posicionamento durante o voo é totalmente dependente da solução da ambiguidade GNSS determinada antes da realização do voo. Para a solução da ambiguidade GNSS é recomendado que a antena permaneça estática por um período mínimo de 5 minutos, em local aberto onde não tenha obstrução do sinal GNSS.

As coordenadas iniciais podem ser inseridas no processamento ou simplesmente lidas nos arquivos de dados GNSS processados. Independente do tipo de alinhamento escolhido, os primeiros 5 a 10 minutos de qualquer levantamento devem ser reservados para o processo de alinhamento.

Após o alinhamento, os valores iniciais de atitude são estimados grosseiramente, principalmente a componente azimute (*heading*). Visando melhorar a precisão desta componente, o fabricante recomenda realizar algumas manobras de calibração com a plataforma em movimento. A rotina de calibração consiste em realizar uma série de manobras semelhantes à figura de um ‘oito’, evitando o deslocamento com um desnível constante, para prevenir tendências nos ângulos calculados, e com velocidade maior que 5 m/s. A mudança de direção brusca obtida por essas manobras específicas contribui para o refinamento do azimute estimado pelo sistema.

4.2.2 Processamento

O processamento dos dados obtidos do SVL desenvolvido é dividido em duas etapas: o processamento dos dados inerciais e o processamento dos dados LASER com os dados inerciais processados.

Os dados do sistema inercial são processados no próprio *software* da NovAtel, o *Inertial Explorer 8.5*. Para o processamento dos dados LASER com os dados INS foi implementado pela autora um código em linguagem de programação C++, tendo como base o modelo matemático apresentado no tópico 2.2.4. Um fluxograma apresentando a sequência de processamento é apresentado no Apêndice 2.

Neste tópico serão descritas algumas etapas e configurações para o processamento dos dados no *software* da NovAtel e as etapas implementadas para o processamento dos dados LASER.

4.2.2.1 Processamento dados GNSS/IMU

Para o processamento dos dados inerciais coletados, são necessários os arquivos de observações GNSS de uma ou mais bases de referência, próximas à área do levantamento e com dados GNSS rastreados simultaneamente ao período de tempo do levantamento, além de dados de efemérides referentes ao mesmo dia da coleta.

As bases de referência utilizadas para o processamento são dependentes da região em que o levantamento foi realizado. Para levantamentos realizados próximo ao campus da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) de Presidente Prudente, foi utilizada a estação PPTTE pertencente à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). Em levantamentos realizados em áreas afastadas da região urbana e distantes de bases conhecidas, foram rastreadas e processadas as observáveis GNSS de pontos com mais de uma hora de coleta na própria região do levantamento (e com linha de base inferior a 20 km).

Os arquivos RINEX de bases pertencentes à RBMC são obtidos da página do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). As efemérides podem ser obtidas a partir de páginas web apropriadas, como em: “<http://www.gnsscalendar.com/>”, por exemplo, ou a partir do próprio *Inertial Explorer*, que realiza a busca de dados em fontes específicas da *web* para *download*. Como o *software* reconhece apenas formatos específicos de arquivos como entrada, o arquivo RINEX deve ser convertido utilizando o *software GNSS Data Converter*,

sendo criados 3 novos arquivos (.gpb, .epp, .sta). Além da conversão para formato específico, é recomendado que as observações sejam reamostradas para o intervalo de 0,2 segundos. A configuração de intervalo de amostragem comumente utilizada em receptores GNSS para rastreamento é de 1 segundo ou maior, e das estações RBMC igual a 15 segundos. Esta reamostragem é realizada no próprio *Inertial Explorer* (em: *File > GBP Utilities > Concatenate, Slice and Resample*).

Ao criar o projeto para processamento dos dados, são carregados os arquivos de observações da base de referência já interpoladas para 0,2 segundos, os arquivos de efemérides e os arquivos obtidos do sistema inercial (arquivo de dados remotos – GNSS – e arquivo de dados da IMU). Após carregados os arquivos de entrada, é dado início ao processamento.

Há a opção de se processar os dados GNSS/IMU simultaneamente (fortemente acoplado) e a opção de primeiro processar os dados GNSS, e processar os dados da IMU posteriormente (fracamente acoplado). A possibilidade de processar os dados GNSS *a priori* é importante para a análise do comportamento do sistema durante o levantamento.

Ao processar os dados GNSS, gráficos referentes à altura e velocidade da plataforma, PDOP e número de satélites rastreados em função do tempo são disponibilizados para análise. Estes gráficos são importantes por permitir analisar perdas de sinal GNSS e sua qualidade, possibilitando identificar longos períodos com ausência de dados e modificar o tempo inicial e final do processamento, a fim de buscar melhores resultados no processamento dos dados inerciais, que necessitam de certa continuidade de coleta. Também é possível analisar a concordância do levantamento com relação às especificações de alinhamento e rotinas de calibração sugeridas pelo fabricante, como tempo de coleta estático e velocidade mínima para realização da rotina de calibração.

Para o processamento dos dados GNSS foi utilizada a configuração padrão, alterando-se apenas o intervalo de processamento para 0,2 segundos.

Após analisados os gráficos que permitem a identificação de períodos com perda de sinal GNSS e modificado, se necessário, o tempo inicial e final para processamento dos dados da IMU, executa-se o processamento dos dados inerciais.

Nas configurações de processamento é preciso atentar ao perfil de levantamento selecionado (aéreo, marinho ou terrestre). Cada perfil apresenta parâmetros internos específicos de processamento mais adequados a cada situação. No momento da configuração do processamento também devem ser informados os valores de *lever-arm* entre a IMU e a antena GNSS; o tipo de método para o alinhamento inicial, sendo ajustado para o modo

automático, recomendado pelo fabricante para o processamento; e o modelo de erro adequado para a IMU utilizada, de acordo com o modelo da mesma.

Após processados os dados é possível exportar os resultados em arquivo *.txt* selecionando as informações de interesse a serem exportadas, o *datum* de saída (WGS84), o sistema de projeção para transformação (UTM – zona 22), o intervalo de tempo entre as medidas exportadas no arquivo e o *lever-arm* entre o sensor (unidade LASER) e a IMU. Além disso, devem ser definidos os eixos para transformação das coordenadas (ordem de aplicação dos ângulos de rotação para transformação do sistema global para o sistema embarcado (IMU) e orientação dos eixos da IMU durante o levantamento). A ordem de aplicação das rotações foi configurada para a sequência *ômega, phi e kappa*, e o sistema foi orientado com o eixo Y apontando na direção *forward*, o eixo X para a direita do sentido de movimento da plataforma e o eixo Z para cima).

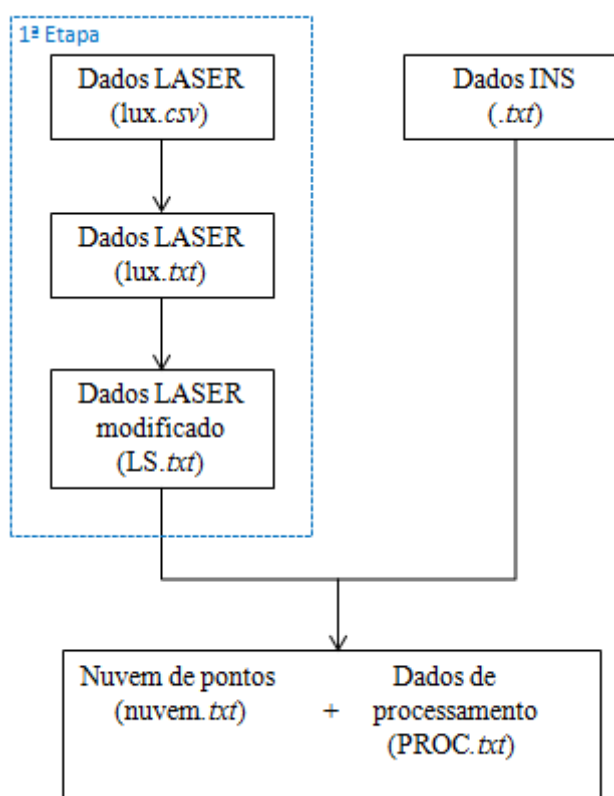
4.2.2.2 Processamento dados LASER

Após processados os dados GNSS/IMU, é possível processar os dados LASER e gerar a nuvem de pontos. O arquivo *.csv* dos dados LASER é aberto e salvo como *.txt*, e o código implementado utiliza como dados de entrada o arquivo de saída do processamento inercial e o arquivo *.txt* obtido do arquivo *.csv*.

O código calcula a nuvem de pontos proveniente da varredura a LASER usando as informações de posição e orientação do sistema inercial e as observações de ângulos e distâncias provenientes da unidade LASER, além da informação de tempo para a correta associação entre os dois conjuntos de dados.

O processamento é realizado em duas etapas: interpolação do tempo de cada instante de observação LASER, a partir do tempo inicial e final de cada pacote de dados de varredura, e filtragem de observações inadequadas de acordo com critérios de restrição; e processamento dos dados resultantes com os dados processados do sistema inercial. A Figura 34 apresenta um diagrama explicativo do processo inicial da solução implementada.

Figura 34: Diagrama explicativo da solução inicial do processamento implementada.



Como o arquivo fornecido pela unidade LASER não segue uma cronologia na sequência de gravação dos pacotes de dados gerados, foi necessário realizar a ordenação cronológica desses pacotes. Para isso, foi implementado um programa em linguagem C++, que realiza a leitura do arquivo de dados LASER (.txt), calcula o tempo para cada medida LiDAR por interpolação do tempo inicial e final de cada pacote de dados fornecido, e salva as informações relevantes do levantamento em um arquivo .txt, onde cada medida é associada a um instante, para posterior ordenação cronológica dessas informações.

Cada pacote de dados corresponde aos pontos obtidos de uma varredura de cada um dos quatro níveis verticais do sistema, compreendendo as varreduras das duas camadas inferiores simultaneamente e das duas camadas superiores, também simultaneamente.

De acordo com o exemplo de arquivo de dados LASER anexado a esta dissertação (Anexo E), a informação de tempo dada pelo sistema LASER utilizado refere-se apenas aos instantes de início e fim de um pacote de dados, isto é, não fornece informação de tempo para cada ponto observado, sendo necessário o cálculo destes instantes por interpolação do tempo fornecido em cada pacote.

Verificou-se que, independente da abertura horizontal de varredura configurada (podendo ser de até 110°), o número de “instantes angulares” informado no cabeçalho de cada

pacote de dados continua sendo 11520 e a duração de tempo de cada pacote é sempre a mesma (aproximadamente 13,33 milissegundos). Como no arquivo .csv convertido são apresentadas apenas as informações de varredura dentro da abertura angular configurada, concluiu-se, então, que o sistema apenas deixa de armazenar as informações de varredura nos intervalos angulares fora do configurado, mas o espelho de varredura continua realizando sua rotação à mesma velocidade angular que teria, caso fosse configurado para uma abertura de varredura maior. Portanto, os instantes (tempo) inicial e final de cada pacote de dados correspondem ao que seriam os instantes do primeiro e último pulsos, emitidos nas posições angulares limítrofes do sistema (Apêndice 1).

Foi utilizado o modelo linear para a interpolação do tempo, que foi realizada considerando sempre a abertura total de varredura que o sistema comporta. A duração de cada pacote foi dividida pelo intervalo de posições angulares possíveis de varredura das camadas inferiores e superiores, ou seja, considerando a sequência de varredura das camadas inferiores (abertura de 100°), seguida das camadas superiores (abertura de 95°), e determinando o intervalo de tempo entre cada posição angular da abertura total.

O tempo da primeira medida realizada dentro da abertura angular configurada para a varredura (foi utilizada a abertura de -30° a $+30^\circ$) foi calculado somando ao tempo inicial do pacote de dados o tempo decorrido da posição angular limítrofe de varredura das camadas inferiores (-50°) até a posição angular configurada para a varredura (-30°). Após percorrer a abertura angular de varredura para as camadas inferiores (de -50° a $+50^\circ$), a sequência é dada a partir da posição angular inicial limítrofe de varredura das camadas superiores (-60°) percorrendo a abertura até $+35^\circ$.

Assim, a interpolação do tempo foi realizada considerando a que nível de varredura a medida era correspondente, através do ângulo vertical informado, e qual o ângulo de varredura horizontal da medida.

Neste programa também foi implementada a verificação da coerência dos valores informados em cada um dos campos dos dados LASER. Foram estabelecidas as seguintes restrições:

- Restrições em função do valor correspondente ao número de retorno e ao número da camada de varredura, devendo apresentar identificadores de 0 a 2 e de 0 a 3, respectivamente, uma vez que o sistema é capaz de armazenar até 3 retornos por pulso e escanear apenas 4 camadas;
- Restrições para a verificação da relação dos identificadores das camadas de varredura com os valores dos ângulos verticais correspondentes;

- Verificação da correspondência entre os identificadores de valores de ângulo horizontal com os ângulos horizontais informados, com tolerância de $\pm 0,3^\circ$;
- Verificação dos identificadores de valores de ângulo horizontal dentro do intervalo angular configurado para a varredura;
- Restrição para os valores de distância ($0,1 \text{ m} < \text{distância} < 200 \text{ m}$); e
- Restrição para os valores de largura do pulso ($0 < \text{largura do pulso} < 1000 \text{ cm}$).

Caso alguma informação não esteja em concordância com as restrições de validação dos dados, as informações do ponto são descartadas, porém, salvas em um arquivo *.txt* de falhas (falhas_LS.txt) de acordo com o critério que justificou sua exclusão. Um exemplo de arquivo de falhas gerado é apresentado no Anexo D.

Portanto, o programa criado para auxiliar na ordenação dos pacotes tem como entrada o arquivo *.txt*, obtido do arquivo *.csv* proveniente da unidade LASER, e tem como saída um arquivo *.txt* com as medidas validadas associadas a um instante, e um arquivo de falhas com as informações descartadas no processo de validação. Um exemplo de arquivo *.txt* gerado por este programa é apresentado no Anexo E.

Para a ordenação dos pacotes, o arquivo contendo as informações de varredura com o tempo interpolado para cada medida pode ser aberto em uma planilha *Excel* e classificado, em ordem crescente, de acordo com o campo referente à informação de tempo das medidas. O arquivo é salvo e este é utilizado como dado de entrada no código implementado para a segunda etapa do processamento. Esta etapa manual poderá ser automatizada no futuro, realizando-se automaticamente este processo de ordenação.

Para a segunda etapa do processamento da nuvem de pontos foi implementado pela autora outro programa em linguagem C++ que lê o arquivo proveniente do processamento do INS e salva em uma estrutura as informações de tempo, de atitude (*omega*, *phi*, *kappa*), de posições (XYZ) fornecidas pelo processamento GNSS/IMU já transladadas para a origem da unidade LASER através dos *lever-arms* informados no processamento, e suas respectivas precisões.

Após o armazenamento das informações relevantes provenientes do processamento INS, é realizada a leitura e armazenamento das informações relevantes provenientes da varredura a LASER. O programa principal lê este arquivo de dados de varredura já modificado e armazena as informações de varredura numa outra *struct*.

O processamento consiste em encontrar os instantes de medida de dados inerciais logo antes e logo após o instante de medida LASER, realizar a interpolação linear das informações

de posição e atitude do sistema para o instante da observação LASER e aplicar o modelo matemático descrito no item 2.2.4 deste relatório.

Para a verificação da sincronização do tempo entre os dados foi implementada uma solução que compara as diferenças de alturas de voo obtidas da varredura a LASER e do INS durante a decolagem e aterrissagem do VANT, tendo como base os ângulos e distâncias fornecidos pela unidade LASER, as coordenadas tridimensionais fornecidas pelo processamento dos dados do INS e um MDS da área levantada, obtido por triangulação de imagens da área, tomadas por câmara hiperespectral também embarcada em VANT, ou por varredura a LASER de outro levantamento aéreo.

As alturas de voo do sensor obtidas a partir dos dados do INS foram estimadas com o auxílio da ferramenta '*lascontrol*' da biblioteca LASTools. Esta ferramenta fornece, a partir de um MDS em formato *.las* de uma área e de uma lista de coordenadas tridimensionais em formato *.csv* correspondentes à mesma área abrangida pelo MDS, um arquivo *.txt* com as diferenças de altitude em cada ponto da lista, com relação às altitudes do MDS. Foi implementado pela autora um programa, também em linguagem C++, que realiza a leitura do arquivo proveniente do processamento do INS e salva, sequencialmente à leitura de cada linha do arquivo *.txt*, as informações relativas à posição do sensor em um arquivo no formato *.csv*.

Para estimar as alturas do sensor através das informações de varredura foram realizados cálculos por trigonometria, tendo como dados de entrada os ângulos de varredura e a distância medida para cada pulso.

Após o cálculo das alturas do sensor pelos dados fornecidos pela unidade LASER, a correção do tempo de sincronização é calculada comparando-se as alturas obtidas da diferença entre o MDS da área e da altura da unidade LASER obtida do sistema INS e as alturas calculadas por trigonometria a partir dos dados de varredura no período de subida e descida do sistema durante o levantamento.

Como a unidade LASER adquirida para este projeto foi desenvolvida para navegação terrestre, embarcada em automóveis, a medida de distâncias foi configurada para ser realizada no eixo X da unidade LASER, orientação distinta da apresentada na Figura 7. Seu sistema de coordenadas é dextrogiro, porém com o eixo X apontando para a direção de emissão do pulso LASER. A Figura 35 mostra a orientação da unidade LASER recomendada pelo fabricante para instalação em veículos terrestres.

Figura 35: Orientação recomendada do sistema da unidade LASER em veículos.



Fonte: Adaptado de Ibeo Automotive (2010).

Por apresentar essa diferença na direção de emissão LASER, foi padronizada a montagem da unidade LASER nas plataformas de modo que a orientação do eixo Z apontasse para a direção de movimento, tanto nos levantamentos terrestres quanto nos embarcados em VANT. Assim, o modelo matemático utilizado para o cálculo da nuvem de pontos difere do apresentado no item 2.2.4 no último termo da equação, sendo:

$$r_i^{DE} = \begin{pmatrix} \rho_i(t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Por se tratar de um sistema de varredura que apresenta variações angulares tanto em relação ao eixo Z do sistema de coordenadas da unidade LASER, quanto em relação ao eixo Y, para a matriz de rotação R_{DE}^{UL} , foram consideradas as rotações em torno dos eixos Y e Z dadas pelas matrizes de rotação na forma passiva, sendo aplicada a rotação em Y seguida da rotação em Z. As matrizes de rotação foram definidas na forma passiva por considerar que o objeto se mantém estacionário e a transformação é aplicada no sistema de coordenadas envolvido (LUGNANI, 1987).

Como dados de saída do processamento da nuvem de pontos são gerados arquivos *.txt* contendo as nuvens de pontos separadas por faixas de voo, no caso de levantamentos utilizando o VANT como plataforma, e um arquivo 'PROC.txt' contendo a relação das medidas utilizadas para o cálculo de cada ponto da nuvem, útil para a análise da coerência do processamento e para as etapas de calibração e controle de qualidade.

A separação das nuvens de pontos por faixas de voo é realizada a partir da análise dos valores de *kappa* do arquivo resultante do processamento do sistema inercial. Ao verificar mudança de direção de voo através dos valores de *kappa*, o tempo aproximado correspondente ao momento de mudança de direção é anotado e inserido no código na etapa

de criação dos arquivos de nuvens de pontos, sendo realizada esta análise para cada faixa de voo.

4.3 Extração de feições/alvos para determinação de *boresight* e controle de qualidade

Uma vez que o sistema LASER utilizado não fornece informação de intensidade do retorno do pulso, que é uma característica importante para a identificação de alvos específicos na nuvem de pontos, processo utilizado nas etapas de calibração e controle de qualidade de SVL, os métodos utilizados nessas etapas são baseados apenas na identificação de alvos e feições a partir da geometria 3D apresentada pela nuvem de pontos.

Em um primeiro momento foram realizados testes utilizando um conjunto de alvos de material retrorreflexivo (dimensões aproximadas de 10 cm x 3 cm e 5 cm x 4 cm) na cena, para tentativa de identificação dos mesmos na nuvem de pontos, a partir da informação de largura do pulso armazenada pelo sistema, porém não foi obtido sucesso na identificação destes alvos.

Para estes testes buscou-se, então, identificar objetos da própria cena levantada para serem utilizados como alvos. Os alvos deveriam aparecer em pelo menos duas faixas de voo para viabilizar o ajuste de faixas relativo em função dos ângulos de *boresight*.

Como alternativa de alvo para auxiliar na calibração e controle de qualidade de levantamentos realizados com o VANT, foram utilizadas placas quadradas de 90 cm x 90 cm instaladas sobre tripés geodésicos e distribuídas na área do levantamento, além da identificação estimada de quinas de feições antrópicas e veículos presentes na cena.

Nos próximos tópicos serão detalhados os procedimentos para estas etapas.

4.4 Calibração do sistema

A calibração do sistema consistiu na determinação dos ângulos de *boresight*, que são valores angulares muito pequenos que representam incrementos nos ângulos que descrevem a diferença de orientação entre os eixos do sistema LASER e do sistema da IMU. Neste sistema, a unidade LASER e o INS foram conectados rigidamente por uma placa de alumínio aeronáutico, esperando-se, portanto, valores muito pequenos.

Para a estimativa destes valores angulares foram identificadas feições homólogas em diferentes faixas de voo e implementado um *script* em ambiente *Scilab*, cujo cálculo é

baseado nas equações de colinearidade para o ajuste dos ângulos calculados no processamento.

Como no processamento dos dados inerciais os parâmetros de *lever-arm* entre a unidade LASER e a IMU são inseridos, o processamento fornece como saída as coordenadas do centro da unidade LASER no referencial geodésico (r_{LS}^g). Assim, partindo do modelo matemático apresentado no item 2.2.4, o modelo matemático utilizado pode ser simplificado por:

$$r_i^g = r_{LS}^g(t) + R_{IMU}^g(t)R_B R_{UL}^{IMU} r_i^{UL}(t) \quad (6)$$

Onde:

$r_{LS}^g(t) = r_{GNSS}^g(t) + R_{IMU}^g(t)r_{UL}^{IMU}$, posição da unidade LASER no referencial geodésico;

$r_i^{UL}(t) = R_{DE}^{UL}(t)r_i^{DE}$, posição do ponto i no referencial da unidade LASER;

R_{UL}^{IMU} corresponde à matriz de rotação que relaciona o sistema referencial da unidade LASER com o sistema referencial da IMU, dada em função dos ângulos aproximados observados em campo ($\Delta\kappa, \Delta\varphi, \Delta\omega$);

R_B corresponde à matriz de rotação 3D passiva relativa à correção do desalinhamento, dada em função dos ângulos $d\omega, d\varphi$ e $d\kappa$ incógnitos, seguindo a ordem de multiplicação $R_Z(d\kappa) R_Y(d\varphi) R_X(d\omega)$.

Manipulando os elementos na equação a fim de adequá-la para a solução dos ângulos de *boresight*, tem-se:

$$R_{IMU}^g(t)^{-1} * [r_i^g - r_{LS}^g(t)] = R_B R_{UL}^{IMU} r_i^{UL}(t) \quad (7)$$

Os elementos da matriz R_B são determinados através do ajustamento pelo método paramétrico ($L_b = AX$). De acordo com a quantidade de pontos de apoio identificados nas diferentes faixas de voo, é montado um sistema de equações no qual o termo à esquerda da equação passa a compor o vetor de observações (L_b).

O procedimento consiste em realizar as medidas de coordenadas dos pontos de apoio presentes em mais de uma faixa de voo e, com estas coordenadas, buscar no arquivo de processamento (PROC.txt) as medidas que permitiram seu cálculo, ou seja, $r_{LS}^g, \kappa, \varphi, \omega, \alpha, \beta$ e ρ_i .

Para o cálculo, a componente r_i^g é substituída pela posição do ponto de apoio obtida de MDS da região, ou por levantamento geodésico, sendo considerada como a posição verdadeira do ponto.

Na montagem do sistema na plataforma VANT, a relação entre o referencial da unidade LASER com o referencial da IMU é estimado como sendo igual a: $\Delta\kappa = -90^\circ$ $\Delta\varphi = -90^\circ$ e $\Delta\omega = 0^\circ$, considerando a ordem de multiplicação das matrizes de rotação apresentada em 2.2.4. Como a disposição da IMU e unidade LASER na montagem da plataforma VANT é sempre a mesma, estes valores angulares são utilizados para todos os levantamentos embarcados no VANT.

Como resultado do processamento em ambiente *Scilab*, são estimados os valores dos ângulos de *boresight* para o voo. Estes valores são introduzidos no programa em linguagem C++ utilizado para o processamento da nuvem de pontos e os dados são reprocessados.

As posições dos pontos de apoio são recoletadas das nuvens de pontos e comparadas com as posições tomadas como verdadeiras, assim como as posições extraídas da nuvem de pontos processada anteriormente. A identificação dos pontos de apoio é possível pelo fato dos alvos e feições utilizadas como controle estarem localizados em áreas de relevo aproximadamente plano, permitindo identificá-los pela diferença de altura com relação aos demais pontos “vizinhos”. A comparação das posições dos pontos de controle nas nuvens antes e depois da aplicação dos ângulos de *boresight* permite analisar a adequação da solução.

A solução da calibração foi desenvolvida em ambiente *Scilab* devido às funções das operações matriciais já estarem implementadas no *software*, no entanto, a solução pode posteriormente ser implementada em linguagem C++.

4.5 Controle de Qualidade

Para o controle de qualidade relativo buscou-se identificar feições homólogas em mais de uma faixa de voo para comparação das coordenadas. Para o controle de qualidade absoluto utilizou-se pontos presentes na cena ou alvos, quando disponíveis, levantados por técnicas geodésicas, além de nuvens de pontos de referência provenientes de levantamentos por varredura a LASER da área em períodos anteriores.

O voo teste realizado sobre o Santuário “Morada de Deus”, em Álvares Machado, não contou com pontos de apoio identificáveis. No entanto, foram levantados, por posicionamento GNSS, pontos na área para aplicação de controle absoluto altimétrico da nuvem.

O voo realizado sobre outra área de teste contou com alvos específicos dispostos em porções de relevo suave da área, para facilitar a identificação dos mesmos nas nuvens de pontos. Este levantamento contou com controle de qualidade planimétrico e altimétrico.

Neste último voo foi realizada a calibração do sistema, por apresentar alguns alvos identificáveis, e em seguida foi aplicado o controle de qualidade para comparação dos resultados obtidos antes e depois da calibração. A nuvem também foi comparada com uma nuvem de referência, disponibilizada pela empresa SensorMap, obtida por levantamento aéreo empregando o sistema de varredura a LASER LMS Q680i da RIEGL.

Os resultados do controle de qualidade das nuvens são apresentados no tópico seguinte.

5 TESTES REALIZADOS E RESULTADOS OBTIDOS

A priori foram realizados alguns experimentos para compreensão do funcionamento dos sistemas envolvidos, tanto individualmente quanto integrados.

Após a familiarização com os sistemas, foram executados três levantamentos para avaliação do desempenho do SVL desenvolvido: um no modo terrestre, com o sistema instalado na parte superior de um veículo, e dois no modo aéreo, com o sistema embarcado na plataforma VANT.

Os resultados obtidos e a avaliação da qualidade das nuvens são apresentados neste capítulo.

5.1 Testes Preliminares

Preliminarmente, foram realizados testes em laboratório para a verificação da sincronização e gravação dos dados de cada um dos sistemas, além da análise do conjunto de dados gerados pela IMU e pela unidade LASER, objetivando também a familiarização com os tipos de dados que seriam trabalhados e quais as informações possíveis de serem obtidas de cada sistema.

Neste primeiro momento foi possível compreender um pouco do funcionamento da unidade LASER e adequar os tipos de dados fornecidos pela mesma, de acordo com os objetivos do projeto, além de realizar ajustes com relação à sincronização do tempo entre os sistemas.

Após a familiarização com os equipamentos e com a integração física e eletrônica, foram realizados testes de operação do sistema inercial em campo. A antena GNSS foi instalada sobre o teto de um automóvel e a IMU no assoalho do veículo.

Os primeiros testes do comportamento do INS foram realizados nas vias do campus da UNESP, percorrendo trechos com a cobertura de copas de árvores, para analisar a influência da perda de sinal durante o percurso, e realizando as manobras de calibração em retornos e

rotatórias do campus, para verificar a possibilidade de substituir as manobras em forma de “oito”.

Foi realizado um teste também para análise do comportamento do INS no estacionamento do Santuário “Morada de Deus”, por se tratar de uma área extensa de campo aberto que permitiu analisar o tempo reservado para o procedimento de inicialização do sistema (alinhamento) e manobras de calibração para refinamento do *heading*, simulando a trajetória que um VANT realizaria.

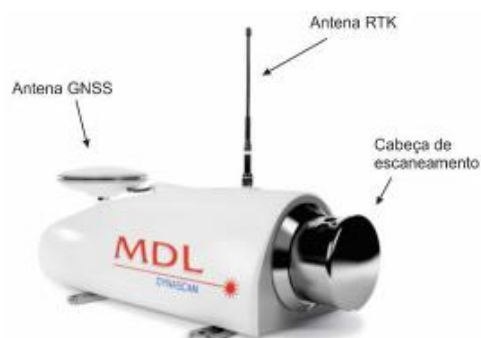
A partir destes testes foi verificado que manobras em formato de “alças” e 2 minutos de percurso a 5 m/s são suficientes para permitir o processamento dos dados com qualidade aceitável, de acordo com classificação do próprio *software* de processamento, tomando apenas a precaução de permanecer em posição estática por 4 a 5 minutos, para solução da ambiguidade GNSS e auxílio na solução do alinhamento, no início e fim de cada percurso.

5.2 Levantamento Terrestre

Para analisar o desempenho do sistema como um todo, foram realizados testes terrestres com o sistema preso em um suporte fixado na parte superior de um veículo (Figura 32). O objetivo era o levantamento da fachada de uma edificação isolada cujas coordenadas de seus limites foram determinadas por técnicas topográficas convencionais, com precisão centimétrica.

A mesma edificação foi escaneada por um sistema de varredura a LASER DynaScan M150 (Figura 36), que usa posicionamento RTK (*Real Time Kinematic*) integrado a uma IMU, permitindo a geração instantânea da nuvem de pontos, e que opera a uma frequência de até 20 Hz com taxa de repetição de pulso de 36 kHz, mantendo uma acurácia de 5 cm . O scanner foi configurado para operar a uma frequência de rotação da cabeça de emissão de pulsos de 10 Hz gerando uma nuvem com pontos a cada 2 cm, aproximadamente, a uma distância de 10 m (MORAES, 2016). A nuvem de pontos gerada por este levantamento também é utilizada como referência para a análise da acurácia do levantamento obtido pelo Ibeo LUX 2010.

Figura 36: MDL Dynascan M150.



Fonte: Moraes, 2016.

Os testes terrestres foram realizados em área dentro do próprio campus da UNESP, no entorno do salão de festas da ASA (Associação dos Servidores Administrativos, atualmente cedida à UNESP de Presidente Prudente). A Figura 37 mostra a fachada principal da edificação, que apresenta dimensão aproximada de 35 m x 5m, e a Figura 38 apresenta o croqui de localização das dependências da ASA no campus.

Figura 37: Fachada principal da edificação levantada nos testes de varredura a LASER.



Figura 38: Croqui de localização das dependências da ASA.

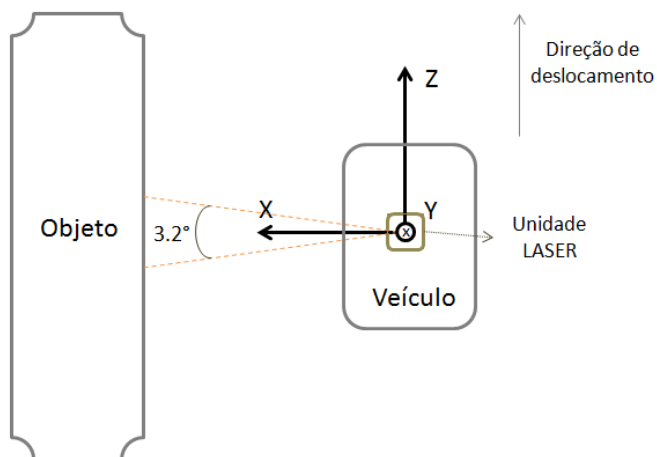


A partir dos testes terrestres realizados nesta área foi possível identificar a ocorrência de falhas na gravação dos dados, falhas em conexões físicas e comunicação entre os sistemas, erros de sincronização do tempo dos dados do INS com o tempo do microcomputador e dos dados LASER gravados, bem como inconsistência nas informações presentes nos próprios pacotes de dados LASER armazenados.

Os problemas identificados foram solucionados junto ao profissional da computação, que auxiliou na parte da programação computacional do sistema usado nesta pesquisa, e junto à SensorMap, que ficou responsável pelas conexões físicas e comunicação entre os sistemas, principalmente. As inconsistências nas informações presentes nos pacotes de dados LASER puderam ser solucionadas a partir de validações dos dados utilizando restrições impostas durante o pré-processamento dos dados LASER (descritas no item 4.2.2.2 e implementadas em linguagem C++).

Para os testes terrestres, a unidade LASER foi montada de modo que a varredura fosse lateral (ao veículo) e não frontal, isto é, com o eixo X de seu sistema orientado para a lateral esquerda do veículo, o eixo Z apontando para o sentido de deslocamento do carro (para frente) e o eixo Y positivo orientado para cima (Figura 39). Assim, toda a cena à esquerda do veículo foi levantada, conforme o deslocamento do mesmo, sendo as linhas de varredura tomadas no sentido de baixo para cima.

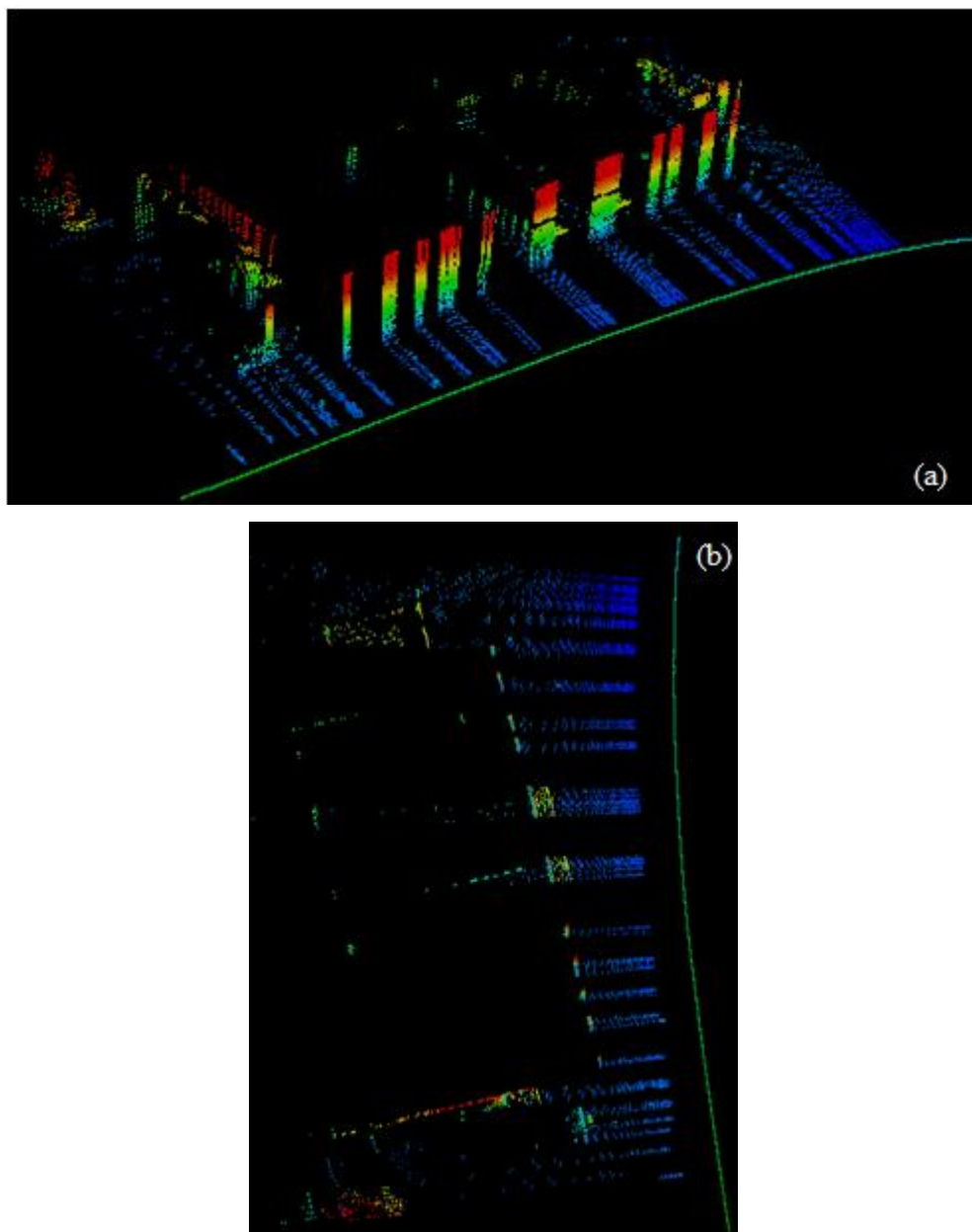
Figura 39: Configuração de instalação do SVL para levantamento terrestre.



Um recorte da nuvem de pontos obtida, abrangendo a área da edificação de interesse, é apresentado por dois pontos de vista distintos na Figura 40, na qual a linha contínua representa a trajetória realizada pelo sistema e os pontos à esquerda da mesma representam a nuvem de pontos processada.

A escala de cor apresentada na figura segue o critério de elevação dos pontos, sendo a ordem crescente dos valores do azul para o vermelho.

Figura 40: Vistas da nuvem de pontos obtida de edificação isolada: (a) vista perspectiva; (b) vista de cima.



Devido à orientação do sentido da varredura, há a presença de pontos de solo durante todo o percurso do levantamento e, como a edificação apresenta portas e janelas de vidro em sua fachada, foram obtidos retornos de pontos localizados no interior da própria edificação.

A Figura 41 apresenta a nuvem de pontos obtida com o M150, tomada como referência para a análise da nuvem de pontos gerada. A Figura 42 apresenta as nuvens de pontos obtidas pelos sistemas Ibeo LUX e M150 sobrepostas.

Figura 41: Nuvem de pontos de referência obtida com o M150.

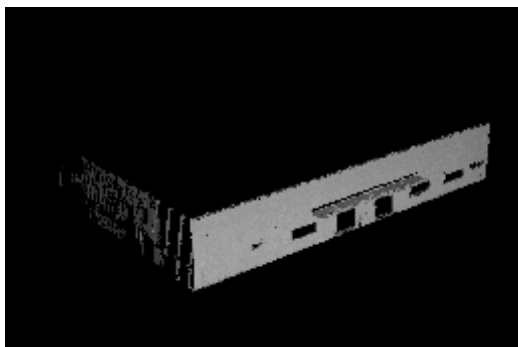
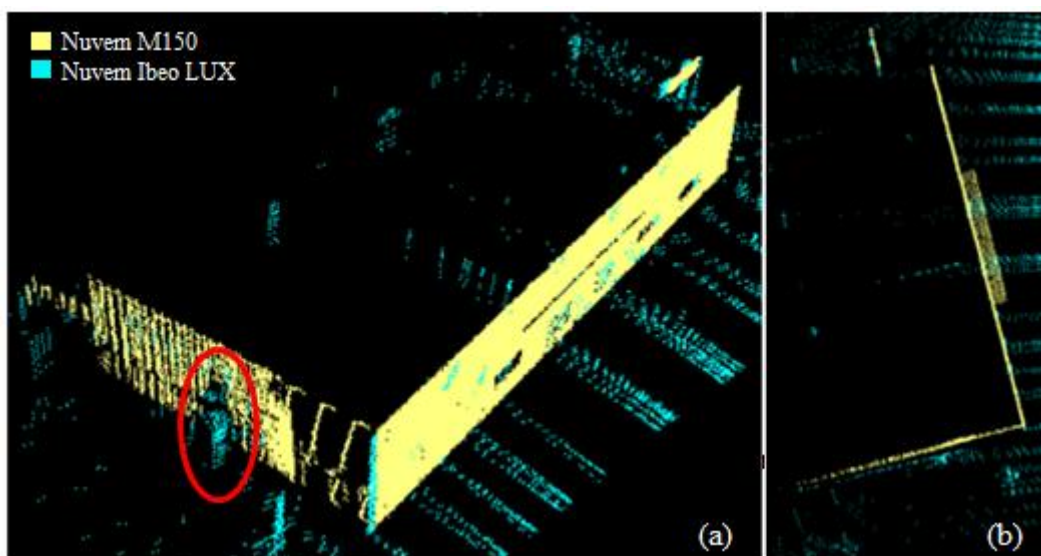


Figura 42: Sobreposição da nuvem de referência sobre a nuvem de pontos obtida com o Ibeo LUX: vista perspectiva (a); e vista de cima (b).



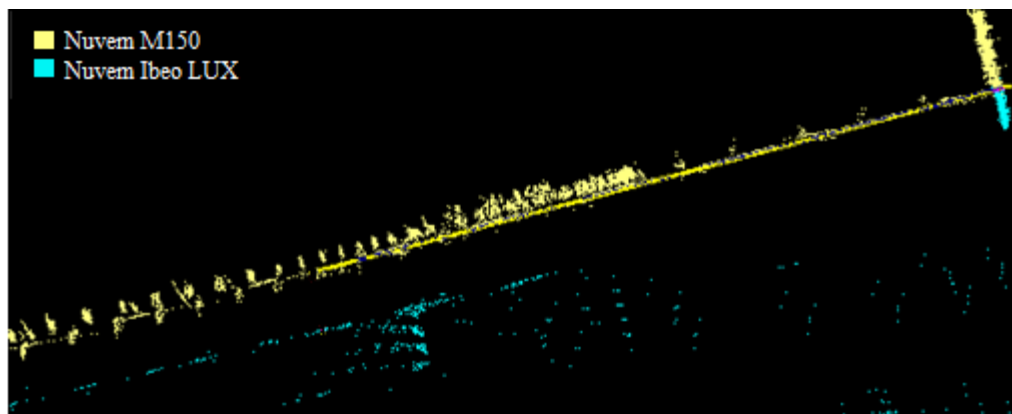
Analisando os resultados obtidos, foi possível verificar a consistência da nuvem de pontos obtida com o SVL desenvolvido com a nuvem de pontos tomada como verdade terrestre (obtida com o scanner M150). Analisando a Figura 42 (a) é possível identificar a figura de uma churrasqueira de tijolos anexada à parede (em destaque), objeto presente na cena. No entanto, analisando a sobreposição das nuvens na Figura 42 (b) é possível verificar um deslocamento da posição do que seria a parede lateral da edificação.

Essa diferença de posição entre as duas representações da parede é de 80 centímetros, aproximadamente. Este deslocamento pode ser justificado pelo fato de não ter sido aplicado nenhum tratamento para a geração da nuvem de pontos, como o cálculo da calibração, e pelo fato do sistema de varredura a LASER utilizado apresentar a propriedade de alongamento do *footprint* gerado, provocando um alongamento dos objetos na direção do deslocamento da plataforma, de acordo com a orientação em que foi instalado no veículo.

Jaakkola et al. (2010), que também utilizaram uma unidade LASER Ibeo LUX no sistema Sensei, destacaram que este efeito de alongamento deve ser considerado na análise das nuvens de pontos obtidas pelo sistema.

A Figura 43 apresenta este deslocamento na representação com maior detalhe.

Figura 43: Destaque para o deslocamento entre as representações da parede lateral da edificação



Com este levantamento foi possível notar falhas em várias linhas de varredura da nuvem de pontos obtida pelo sistema Ibeo LUX. Estas falhas são decorrentes da própria gravação dos dados, em que informações são descartadas por verificação lógica do sistema, ou são informações descartadas por verificações implementadas no processamento dos dados LASER (item 4.2.2.2).

5.3 Voo – Santuário “Morada de Deus”

Após a verificação da consistência da nuvem de pontos obtida com o sistema embarcado em plataforma terrestre, foram realizados dois voos sobre a área do estacionamento do Santuário “Morada de Deus”, com o sistema embarcado em VANT. A Figura 44 apresenta a vista aérea da área sobrevoada e o croqui de localização da mesma com relação à área urbana do município de Álvares Machado.

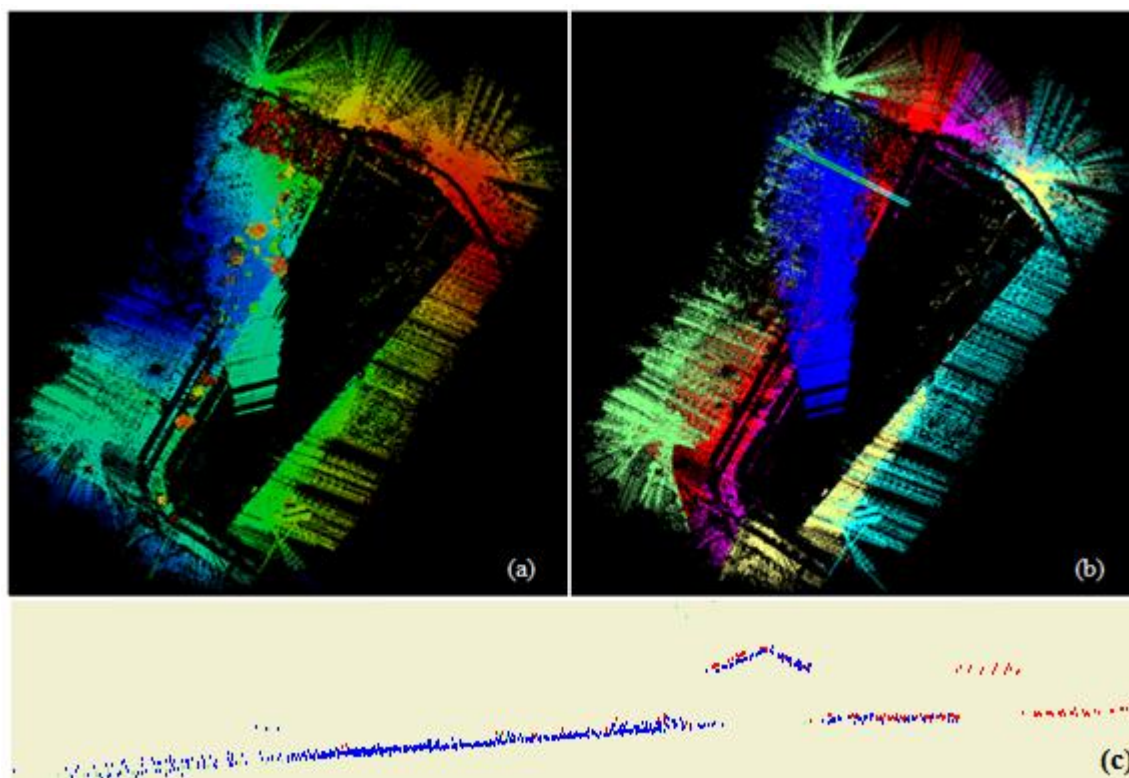
Figura 44: Vista aérea do estacionamento do Santuário “Morada de Deus” com destaque para a área sobrevoada (a) e croqui de localização (b).



Os dois levantamentos aéreos realizados na área seguiram o mesmo plano de voo com as faixas orientadas no sentido da maior extensão do estacionamento. Apenas a nuvem de pontos obtida em um dos voos será discutida neste trabalho devido à semelhança dos conjuntos de dados obtidos dos dois voos.

Uma das nuvens de pontos obtida é apresentada na Figura 45, colorida de acordo com a elevação dos pontos (a), colorida por faixa de voo (b) e perfil, aproximadamente transversal à orientação das faixas de voo, indicando a correspondência entre as nuvens de pontos em uma área onde há a presença de uma edificação (c).

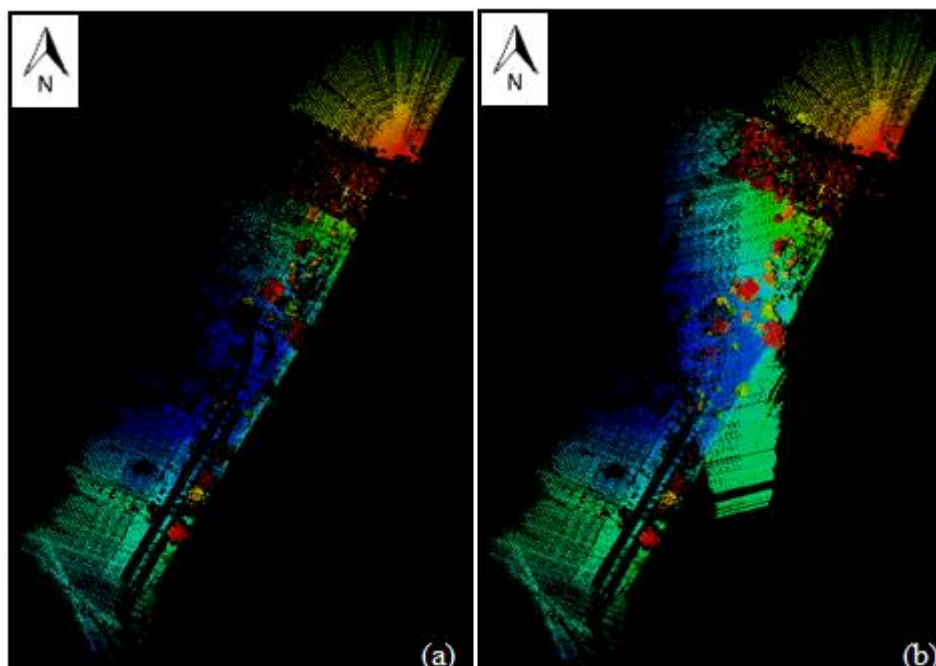
Figura 45: Nuvem de pontos obtida de voo sobre o estacionamento do Santuário “Morada de Deus”: colorida de acordo com a elevação dos pontos (a), colorida por faixa de voo (b) e perfil com destaque para uma área onde há a presença de uma edificação (c).



Analisando as nuvens de pontos obtidas é possível notar a baixa resposta em área de pavimento asfáltico, exceto na faixa em que o VANT está pousando (faixa azul da Figura 45b). Como o índice de reflexão do asfalto é baixo, a altura de voo do levantamento (100 metros, aproximadamente) contribuiu para o baixo retorno dos pulsos LASER nestas áreas. Na faixa de pouso, quando o sistema estava a uma altura de cerca de 60 m do solo, há uma maior resposta da área de pavimento.

Na Figura 46 (a) é apresentada a nuvem de pontos obtida por uma faixa a 100 m de altura, e em (b) a nuvem obtida pela mesma faixa com sobreposição da nuvem obtida pela “faixa de pouso”, mostrando a diferença de cobertura das nuvens de pontos na mesma área.

Figura 46: Diferença de retornos LASER em área de pavimento a diferentes alturas de voo: uma faixa de voo a 100 m de altura (a) e a mesma área sobrepondo-se a faixa a 100 m de altura de voo à “faixa de pouso” – com altura de voo decrescente (b).

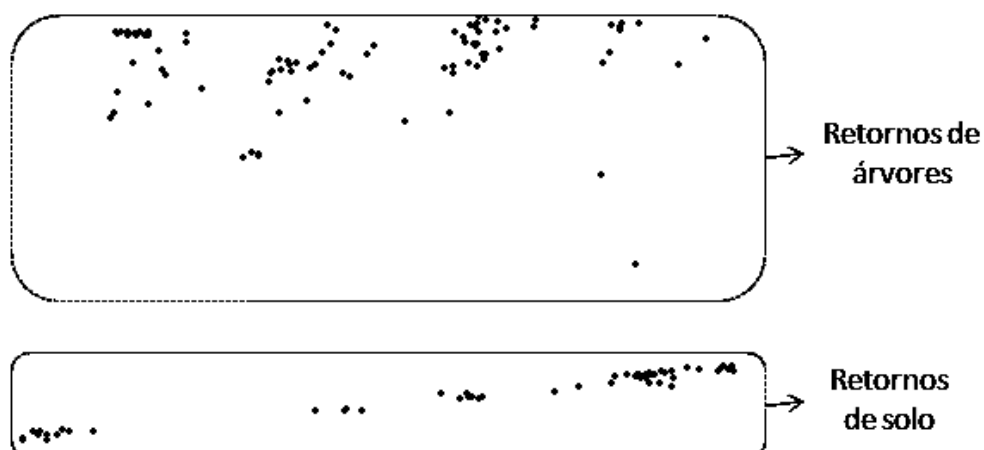


Analisando a área de vegetação, é possível identificar pontos no solo e em copas de árvores, mas a penetração na vegetação é maior na faixa de pouso, que tem início a 80 m de altura do solo. Também é possível identificar árvores isoladas no bloco, porém a geometria da copa é melhor detalhada com o sistema voando a uma altura abaixo de 80 m.

A partir destas análises fica clara a importância do planejamento da altura de voo nos levantamentos, de acordo com o nível de detalhes desejado.

Para analisar a penetrabilidade dos pulsos LASER na área coberta por eucaliptos na porção noroeste do bloco, foram extraídas 3 amostras de 5 m x 5 m da área. A densidade média de pontos é de 45 pontos por amostra ($1,8 \text{ pontos/m}^2$), dos quais cerca de 19 são pontos de solo. A Figura 47 apresenta um perfil da área, em que há a possibilidade de se estimar a altura do conjunto de árvores através de medidas indiretas sobre a nuvem de pontos, ou mesmo pela subtração da altura dos pontos de solo dos pontos de dossel.

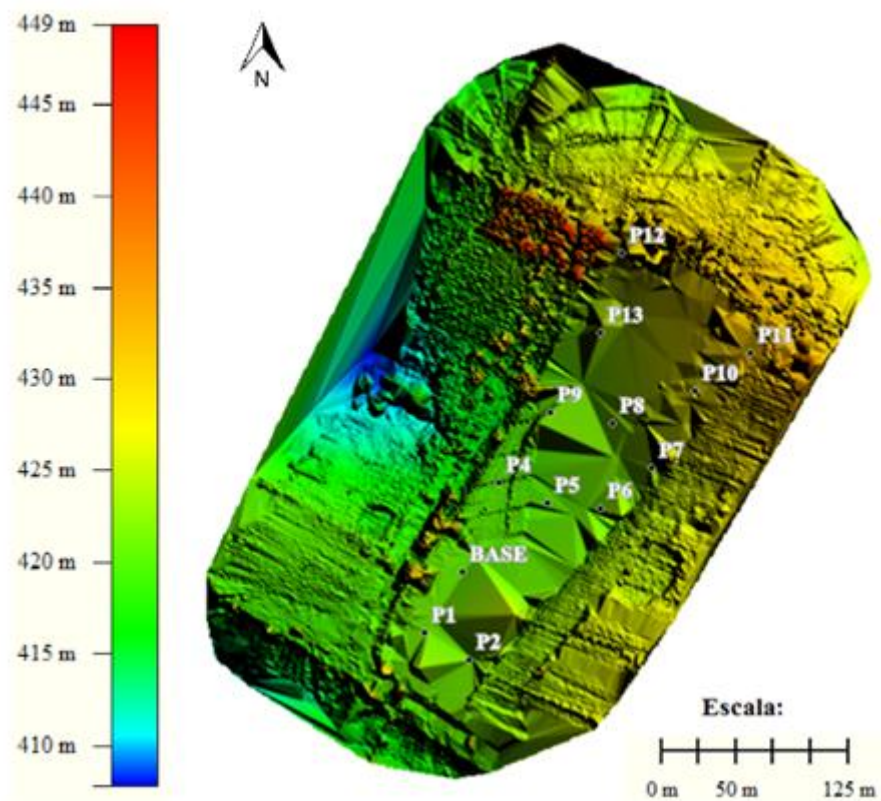
Figura 47: Perfil da nuvem de pontos obtida da área de eucaliptos.



Como a área não apresenta pontos bem identificáveis para a aplicação do controle de qualidade foram levantados 13 pontos de controle na área do estacionamento para verificação da acurácia altimétrica da nuvem de pontos gerada. A localização destes pontos é apresentada na Figura 48 sobre uma rede irregular de triângulos (TIN – *Triangular Irregular Network*) gerada pelo *software Global Mapper* a partir das nuvens de pontos obtidas da área.

Os pontos de verificação foram determinados por levantamento geodésico utilizando o método de posicionamento relativo estático (com tempo de rastreamento superior a 25 minutos), resultando em coordenadas com precisão de 3 mm em planimetria e 4 mm em altimetria, aproximadamente.

Figura 48: Localização dos pontos utilizados para o controle de qualidade altimétrico da nuvem gerada.



As discrepâncias altimétricas entre os pontos de verificação e o MDS obtido da nuvem de pontos foram obtidas utilizando a função *'lascontrol'* da biblioteca *LASTools* e são apresentadas na Tabela 3, com uma média e desvio padrão aproximados de 38 cm e 54 cm, respectivamente, para o conjunto de pontos levantados.

Tabela 3: Discrepâncias calculadas no controle de qualidade altimétrico da nuvem com as estatísticas estimadas para todo o conjunto de pontos levantados (primeira coluna de dZ) e excluindo-se os pontos com maior discrepância do conjunto (segunda coluna de dZ).

Ponto	Z_{ref} (m) (GNSS)	Z_{SVL} (m) (MDS)	dZ (m) ($Z_{SVL} - Z_{ref}$)	
BASE	420,978	420,806	-0,172	-0,172
P01	421,27	421,369	0,099	0,099
P02	421,243	421,439	0,196	0,196
P04	419,921	419,864	-0,057	-0,057
P05	420,574	420,498	-0,076	-0,076
P06	421,233	422,254	1,021	
P07	423,518	423,695	0,177	0,177
P08	422,174	422,615	0,441	0,441
P09	420,592	421,905	1,313	
P10	427,992	428,108	0,116	0,116
P11	431,549	431,753	0,204	0,204
P12	427,461	427,654	0,193	0,193
P13	423,213	424,688	1,475	
Média			0,379	0,112
Desvio padrão			0,538	0,176
RMSE*			0,641	0,201

*Root Mean Square Error (Raiz do Erro Quadrático Médio)

No entanto, analisando a localização dos pontos que apresentaram maior discrepância na Figura 48 (P6, P9 e P13), é possível perceber mudanças abruptas de relevo no MDS gerado que não acontece na posição dos demais pontos de verificação (regiões de pico).

Tais inconsistências no MDS podem ser causadas pela ausência de observações na região do estacionamento, área de concentração dos pontos de verificação coletados, e pela possível observação errônea de um ponto na varredura próximo a estes, onde a discrepância altimétrica observada foi superior a 1 m, resultando em um TIN com triângulos de lados com comprimento maior que as áreas com maior densidade de pontos, e em uma triangulação de baixa qualidade na região.

Retirando estes pontos da amostra, a discrepância média de alturas e desvio padrão das mesmas passa a ser 11 cm e 18 cm aproximados, respectivamente, resultando numa acurácia de 20 cm.

Outro fator a ser considerado na análise da acurácia do MDS utilizado para o controle de qualidade é a diferença de altura do terreno ao longo do comprimento da área do estacionamento, sendo de cerca de 4 m, e o fato da nuvem não ter sido corrigida do possível desalinhamento entre os sistemas da IMU e unidade LASER (*boresight*). Neste experimento

não foi possível a determinação dos ângulos de *boresight* devido à dificuldade de identificar pontos de controle na nuvem.

Para o controle de qualidade relativo foram utilizadas as posições do telhado da edificação, representada na Figura 45 (c). A edificação aparece em apenas duas faixas de voo (sobrevoadas à altura de voo aproximada de 100 m e 75 m, respectivamente) e a diferença altimétrica média entre os vértices identificados das duas figuras geométricas representativas do telhado foi de aproximadamente 15 cm, resultando em uma acurácia de 21 cm.

Em relação à planimetria, os erros são maiores devido à baixa densidade dos pontos, o que dificulta a identificação dos vértices da feição. A distribuição dos pontos de quina do telhado, utilizados para o cálculo das discrepâncias, é apresentado na Figura 49.

Figura 49: Pontos de quina de telhado identificados para cálculo das discrepâncias e o croqui de localização da edificação.

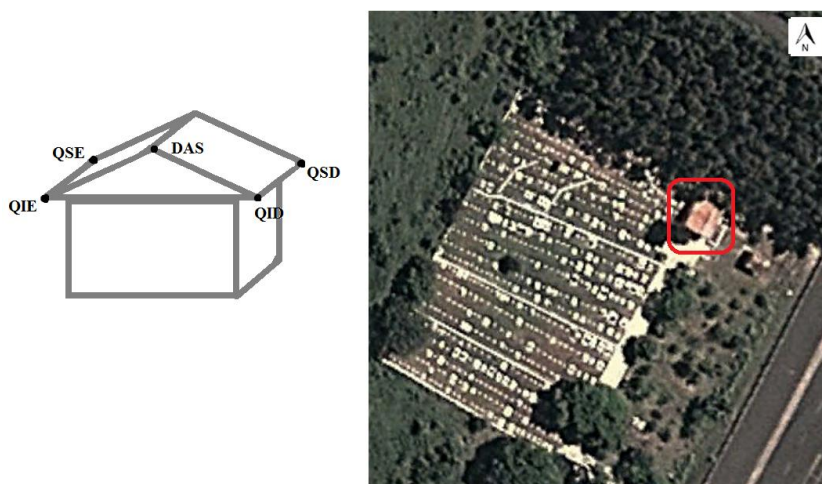


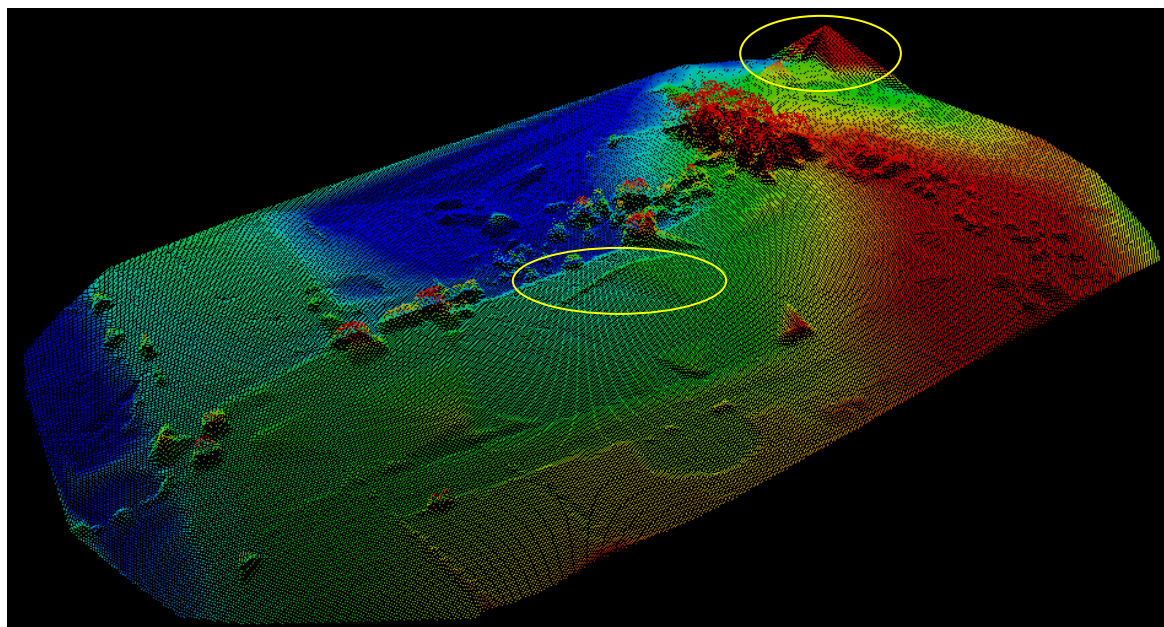
Tabela 4: Pontos identificados para o controle relativo de faixas.

Pontos identificados	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	Resultante (m)
QID	-0,656	-0,520	-0,009	0,837
QIE	0,801	0,650	-0,261	1,065
DAS	-0,391	-0,585	-0,047	0,705
QSD	0,471	-0,359	-0,059	0,595
QSE	0,605	0,883	-0,389	1,138
Média	0,166	0,014	-0,153	0,868
Desvio padrão	0,647	0,697	0,164	0,231
RMSE	0,602	0,623	0,212	0,892

O MDS, obtido do TIN, gerado com espaçamento de 1 m pelo *software Global Mapper*, é apresentado na Figura 50 em vista tridimensional. Na figura são destacadas duas

ocorrências não representativas da superfície: no topo do modelo de superfície há uma elevação acentuada provocada por uma má solução do INS na manobra de fim de faixa do bloco e; mais ao centro do modelo, há uma “lombada”, resultante da varredura de um carro que se locomovia na mesma direção que o VANT em sua faixa de pouso.

Figura 50: MDS da nuvem gerada, com espaçamento de 1m.



5.4 Voo – ASA

Uma segunda área de teste foi sobrevoada utilizando o sistema desenvolvido embarcado em VANT. A área corresponde aos arredores da ASA, na mesma área em que foi realizado o teste com o sistema embarcado em veículo terrestre.

A área foi sobrevoada com faixas em duas direções de voo: nordeste-sudoeste e noroeste-sudeste, sendo o conjunto de dados dividido em dois blocos, considerando as direções de voo, para melhor análise.

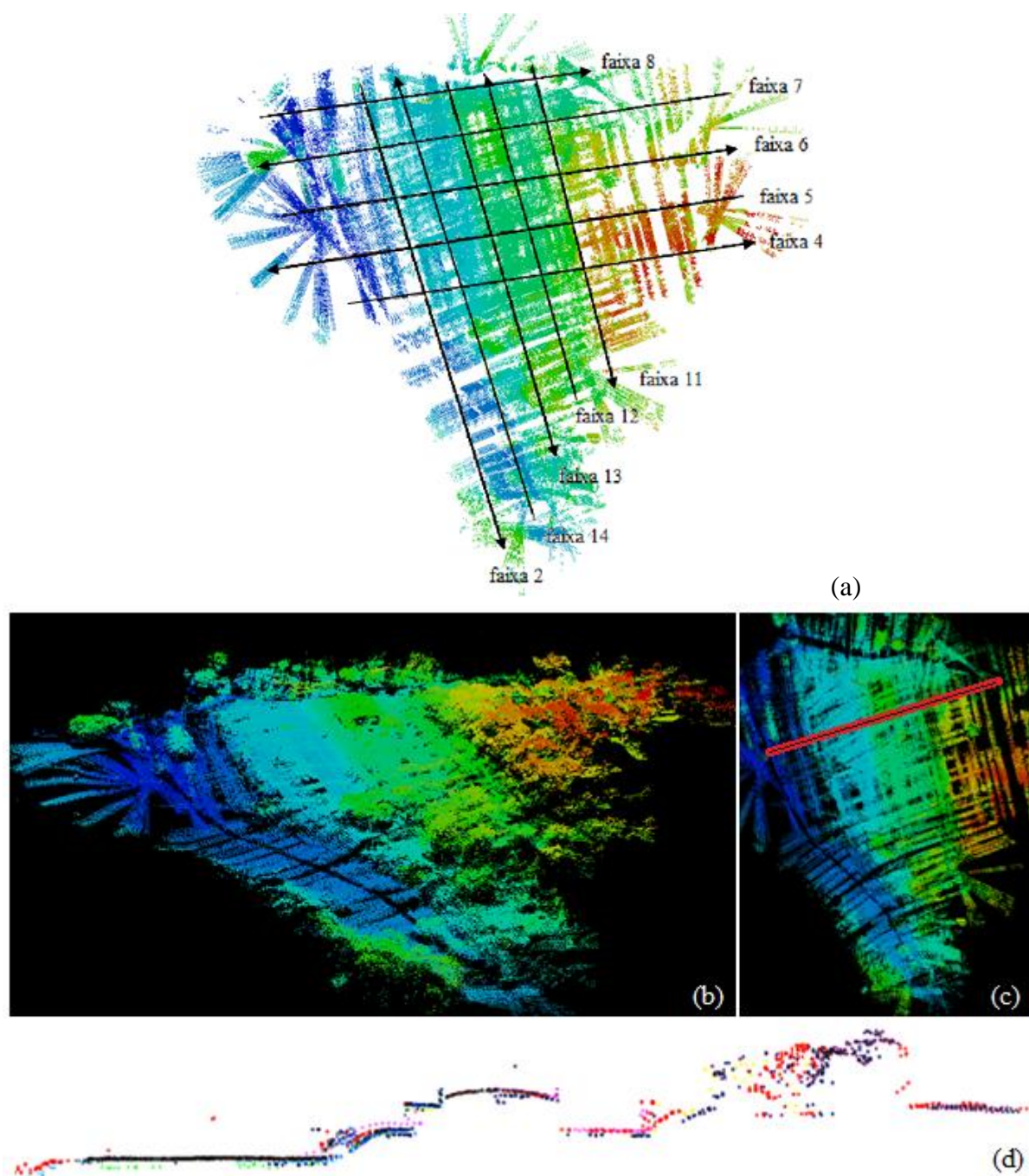
Foram adotadas duas alturas de voo (60 m e 75 m, aproximadamente) para analisar a influência da distância entre o sensor e o terreno na penetrabilidade dos pulsos LASER na região de mata presente na cena, e auxiliar no processo de calibração.

Antes da execução deste voo, a equipe deparou-se com um problema de interferência eletromagnética causada pela antena de rádio do VANT entorno do sistema, provocando falhas na comunicação dos sensores e conseqüente pausa na gravação dos dados. A solução

encontrada foi o isolamento de todo o sistema com uma estrutura de alumínio para bloquear o sinal emitido pela antena e evitar que o sistema deixasse de funcionar.

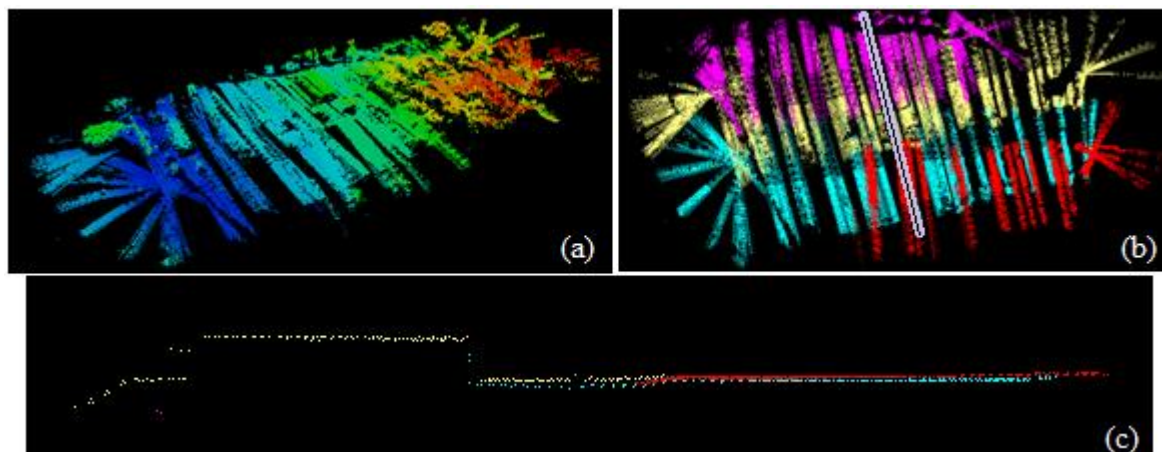
A nuvem de pontos obtida deste levantamento é apresentada na Figura 51: (a) apresenta a vista de cima com indicação da direção das faixas de voo, (b) apresenta uma vista 3D da nuvem e (c) apresenta uma vista de cima, na qual ambas apresentam os pontos coloridos de acordo com sua elevação; e (d) apresenta o perfil indicado em (c) com os pontos coloridos de acordo com a faixa pertencente.

Figura 51: Nuvem de pontos obtida do voo sobre a ASA: com indicação da direção das faixas de voo (a), vista tridimensional (b), vista de cima com linha de perfil indicada (c), e perfil correspondente (d).



A Figura 52 mostra o primeiro bloco de nuvens de pontos e um perfil abrangendo o comprimento da edificação do salão de festas da ASA. É possível verificar que, mesmo não havendo a exata correspondência entre as nuvens das diferentes faixas, as mesmas apresentam concordância em suas geometrias. A partir de medidas aproximadas sobre os perfis do bloco, percebe-se que há trechos com diferenças altimétricas de até 1 m, aproximadamente.

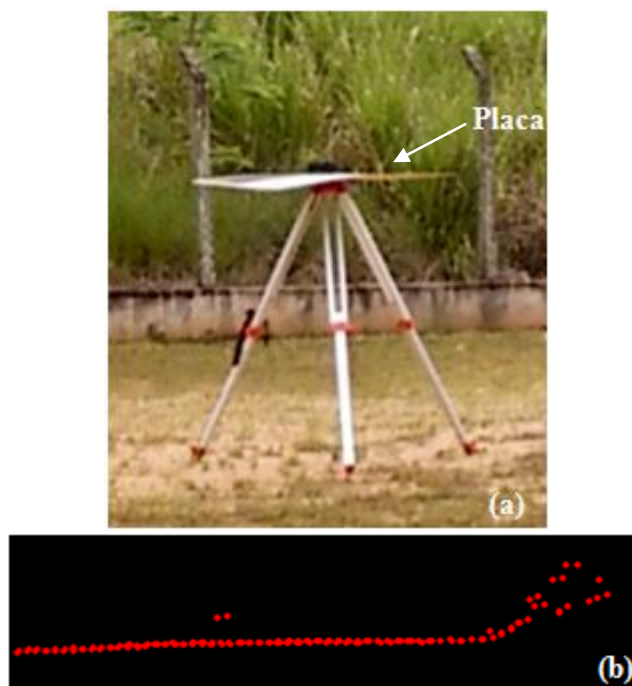
Figura 52: Nuvem de pontos do Bloco 1: vista tridimensional (a), vista aérea com linha de perfil indicada (b) e perfil correspondente (c).



Para o controle de qualidade absoluto e calibração do sistema, foram utilizadas 4 placas quadradas de 90 cm x 90 cm instaladas sobre tripés geodésicos em posições de coordenadas conhecidas da área sobrevoada. Além destes alvos, três carros que estavam presentes na área durante o voo também foram utilizados como elementos de apoio, sendo levantadas, posteriormente, as posições centrais dos mesmos, utilizando receptor GNSS de dupla frequência.

A Figura 53 mostra o alvo instalado em campo e um exemplo do retorno obtido de sua posição em uma das nuvens em perfil.

Figura 53: Alvo utilizado para controle absoluto e calibração (a); e identificação do mesmo na nuvem de pontos (b).



Nem todos os pontos puderam ser identificados nas nuvens, tendo sido observados apenas dois carros e dois alvos de placas. A distribuição espacial dos alvos observados é apresentada na Figura 54 (a). A Figura 54 (b) apresenta as nuvens de pontos em que os alvos são identificados.

As discrepâncias entre as medidas realizadas nas nuvens em que aparecem e as coordenadas verdadeiras dos pontos são apresentadas na Tabela 5.

Figura 54: Localização dos alvos observados (a) e representação das nuvens de pontos em que os mesmos são identificados (b).

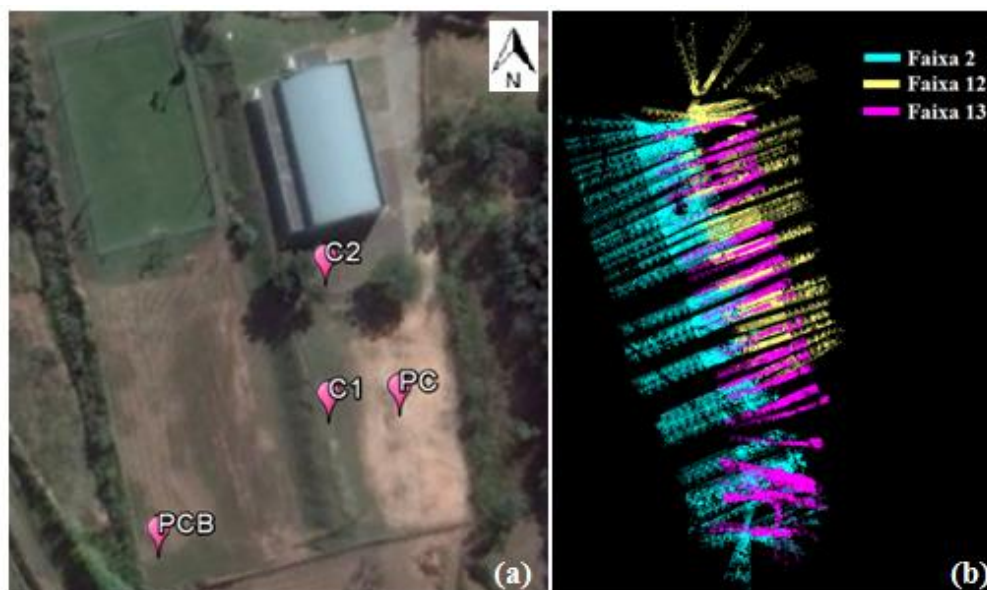


Tabela 5: Discrepância entre as coordenadas de pontos de apoio no terreno e nas nuvens.

		dX (m)	dY (m)	dZ (m)	Resultante (m)
Faixa 2	PCB	0,097	-0,450	-0,382	0,598
Faixa 12	C1	-0,289	1,687	-0,890	1,929
	C2	-0,058	1,277	-0,685	1,450
	PC	-0,775	1,247	-0,819	1,681
Faixa 13	C1	0,600	0,715	0,025	0,934
	C2	-0,389	0,086	0,169	0,433
	PC	0,487	-0,140	0,341	0,610
Média		-0,047	0,632	-0,320	1,091
Desvio padrão		0,488	0,814	0,501	0,593
RMSE		0,454	0,983	0,564	1,221

C1: Carro 1

C2: Carro 2

PC: Ponto Campo

PCB: Ponto Campo Barranco

As discrepâncias da componente Y dos pontos da Faixa 12 apresentam valores superiores a 1,20 m o que indica que a nuvem pode estar deslocada nesta direção. Já na componente Z os valores são todos negativos, variando cerca de 20 cm entre a maior e menor discrepância da amostra, ou seja, as discrepâncias não variam muito nesta direção, fato que também é verificado analisando os perfis das nuvens, em que a Faixa 12 aparece deslocada cerca de 70 a 80 cm para baixo em relação às demais do Bloco 2.

É importante destacar que as discrepâncias determinadas sobre os pontos extraídos dos veículos estacionados (C1 e C2) não possuem o mesmo nível de confiabilidade que aquelas

determinadas sobre as placas de controle, devido à qualidade da medida da altura dos veículos e à variação de sua superfície externa.

Estes mesmos pontos foram utilizados para a calibração do sistema utilizando o *script* desenvolvido em *Scilab*, de acordo com o modelo apresentado na Seção 4.4. A Tabela 6 mostra os valores obtidos para $d\omega$, $d\varphi$ e $d\kappa$.

Tabela 6: Ângulos de *boresight* determinados a partir do Bloco 2 e seus respectivos desvios padrão estimados.

Bloco 2		
	Ângulo	Desvio padrão estimado
$d\omega$	0,222°	0,386°
$d\varphi$	0,085°	0,322°
$d\kappa$	- 1,406°	1,383°

Os dados foram reprocessados, aplicando-se os ângulos de *boresight* determinados e as coordenadas dos pontos de apoio foram recoletados na nova nuvem. A Tabela 7 apresenta as discrepâncias obtidas nestes pontos.

Tabela 7: Discrepância entre as coordenadas de pontos de apoio no terreno e nas nuvens após a aplicação do *boresight*.

		dX (m)	dY (m)	dZ (m)	Resultante (m)
Faixa 2	PCB	0,024	0,588	-0,266	0,646
Faixa 12	C1	0,108	0,755	-0,920	1,195
	C2	0,280	0,566	-0,690	0,936
	PC	-0,432	0,693	-0,816	1,154
Faixa 13	C1	0,005	0,062	0,104	0,121
	C2	-0,964	0,071	0,121	0,975
	PC	-0,204	0,048	0,339	0,399
Média		-0,169	0,398	-0,304	0,775
Desvio padrão		0,418	0,322	0,509	0,402
RMSE		0,422	0,497	0,560	0,860

Com base nos dois conjuntos de dados apresentados nas Tabelas 5 e 7 é possível verificar que a componente altimétrica não apresentou diferença significativa, porém, em relação à faixa 12, a magnitude da diferença da componente Y diminuiu consideravelmente. Analisando o RMSE resultante, após a aplicação do *boresight*, houve uma melhora na acurácia de cerca de 36 cm.

A calibração foi calculada apenas com os dados do Bloco 2 por este apresentar mais pontos de apoio identificáveis nas nuvens; no Bloco 1 foram identificados apenas 3 pontos nas nuvens.

Para o controle de qualidade absoluto, foi utilizada a nuvem de referência fornecida pela SensorMap, resultante de um levantamento aéreo utilizando o sistema de varredura a LASER RIEGL. Um recorte desta nuvem em forma de TIN é apresentado na Figura 55. O TIN com espaçamento de 1 m obtido do Bloco 2, antes da calibração, é apresentado na Figura 56 (a) e uma imagem de discrepâncias entre o Bloco 2 e a nuvem de referência é apresentada na Figura 56 (b).

Figura 55: Recorte da nuvem de referência para a área.

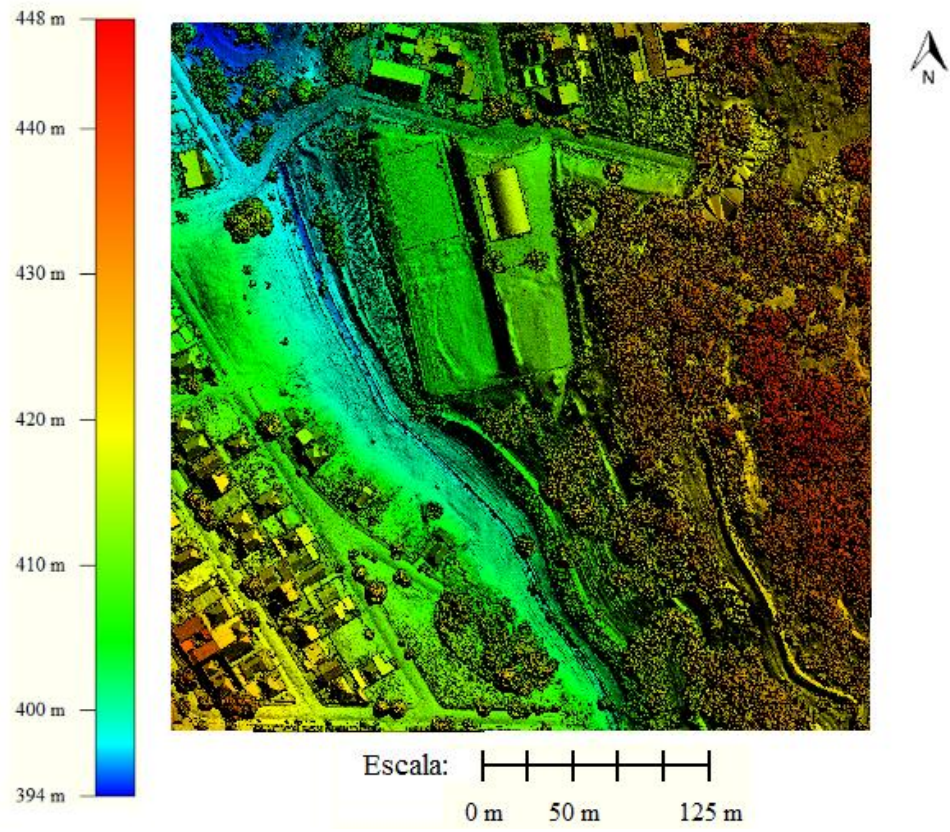
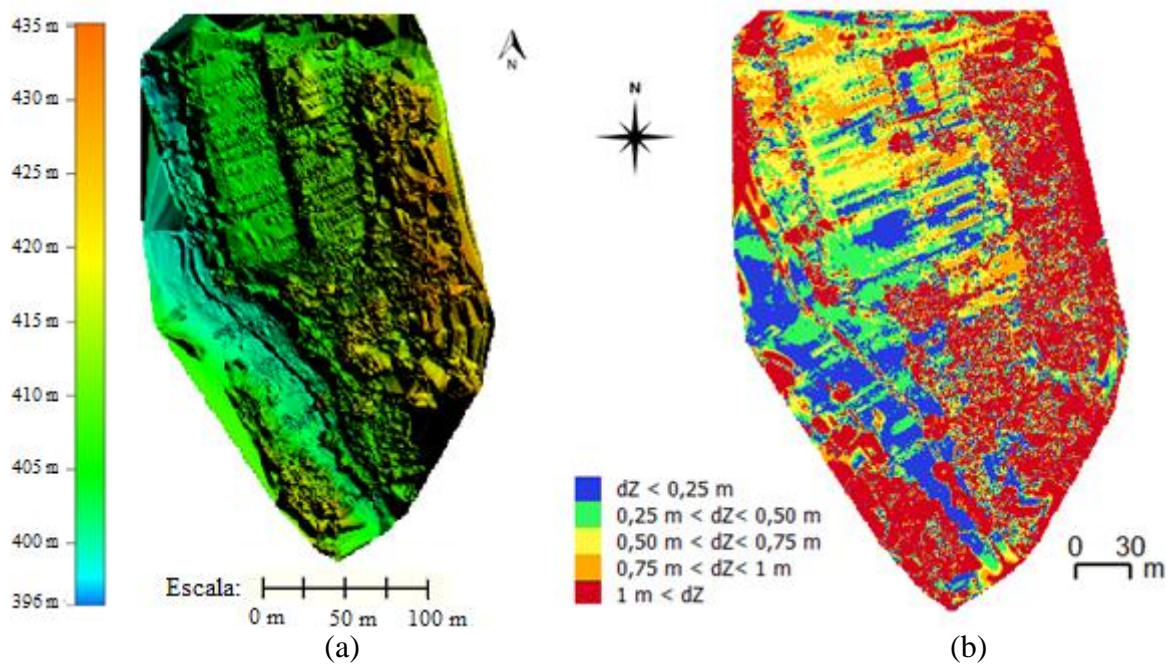


Figura 56: TIN do Bloco 2 com espaçamento de 1 metro (a); e discrepâncias entre a nuvem do Bloco 2 e a nuvem de referência (b).



As diferenças apresentaram média de 20 cm e desvio padrão de 2,51 m, sendo:

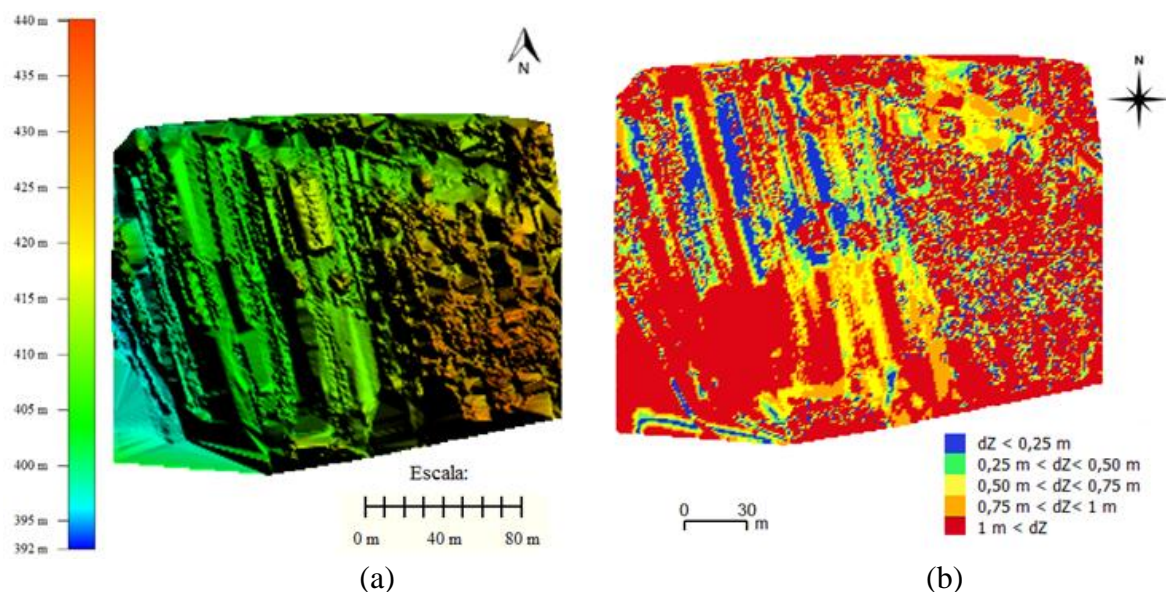
- 19,4% das discrepâncias com magnitude de até 25 cm;
- 17,8% com magnitude de 25 cm a 50 cm;
- 15,6% com magnitude de 50 cm a 75 cm;
- 11,3% com magnitude de 75 cm a 1 m;
- e 35,9% maior que 1 m.

Para a análise das diferenças, o bloco foi filtrado excluindo-se a parte mais ao norte da nuvem, pois esta área apresenta linhas de varredura inconsistentes com o terreno, resultantes de manobras bruscas de fim de faixa que provocam baixa qualidade na solução de atitude dada pelo INS.

As maiores discrepâncias ocorrem em áreas de vegetação e nas bordas do salão de festas da ASA. As discrepâncias maiores nas bordas da edificação podem ser justificadas pela não correção dos ângulos de *boresight* para a geração da nuvem e por erros planimétricos que contribuem para o erro vertical estimado, pois erros horizontais em dados de elevação contribuem na estimativa do erro detectado em testes de acurácia vertical, causa que também pode justificar as maiores discrepâncias na área de vegetação.

O Bloco 1 (Figura 57 (a)) também foi comparado com a nuvem de referência e o resultado é apresentado na Figura 57 (b). Para a análise do Bloco 1 a nuvem de pontos também foi filtrada excluindo-se as áreas mais à leste e oeste do bloco, pelo mesmo motivo do bloco anterior.

Figura 57: TIN do Bloco 1 com espaçamento de 1 metro (a); e discrepâncias entre o Bloco 1 e a nuvem de pontos de referência (b).



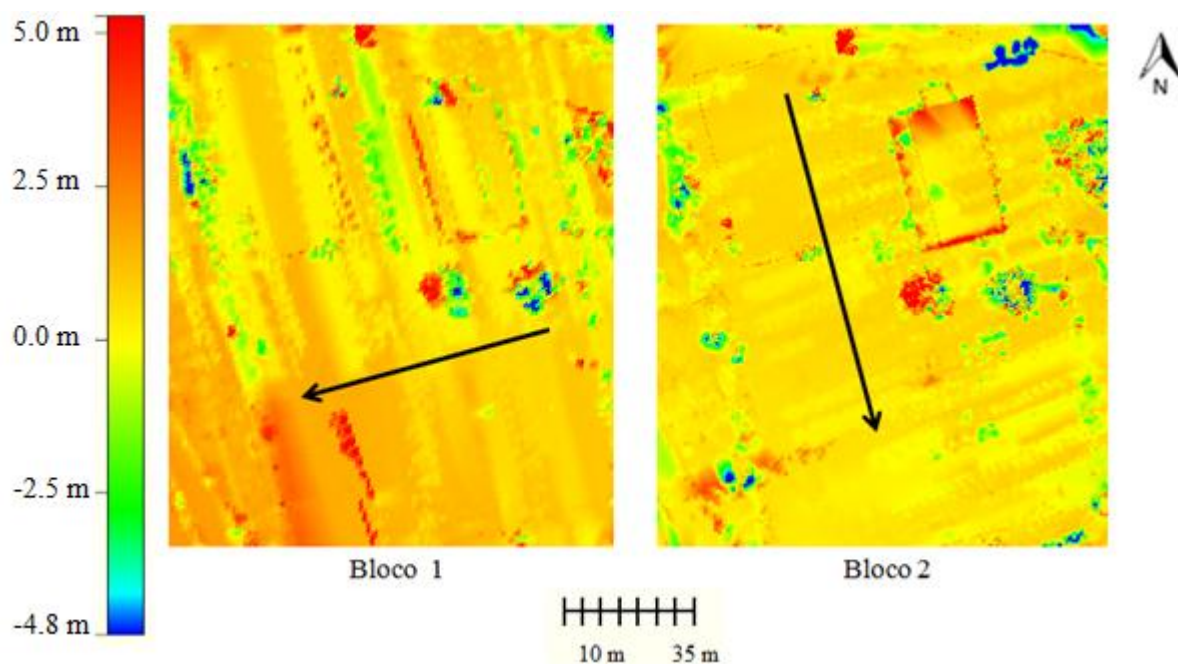
Analisando os dados do Bloco 1, tem-se que:

- 10,6% dos pontos apresentaram discrepâncias altimétricas com magnitude de até 25 cm;
- 10% apresentam magnitude de 25 cm a 50 cm;
- 12,7% apresentam magnitude de 50 cm a 75 cm;
- 13,4% apresentam magnitude de 75 cm a 1 m;
- e 53,2% maior que 1m.

A média das discrepâncias altimétricas foi de 0,7 m, com desvio padrão de 2,3 m, o que indica a presença de uma tendência, possivelmente causada por um erro sistemático nos dados do sistema inercial para este bloco de dados.

Assim como mencionado na análise da nuvem obtida do levantamento terrestre descrito no item 5.2, é possível notar o efeito do alongamento do *footprint* na direção do voo (também devido à orientação da unidade LASER na plataforma). A Figura 58 mostra os recortes dos MDS da região próxima da edificação, com espaçamento de 1 m, obtidos da diferença das nuvens dos blocos com a de referência. Considerando os dois blocos separadamente, as discrepâncias nas bordas da edificação apresentam relação com a direção do voo, destacada na figura por setas indicativas.

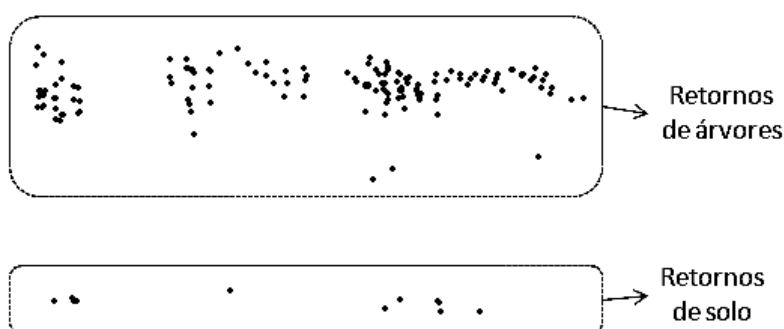
Figura 58: Recortes dos MDS obtidos das discrepâncias das nuvens dos blocos com a de referência, com seta indicativa da direção de voo.



Os blocos corrigidos do *boresight* estimado também foram comparados com a nuvem de referência, porém, a porcentagem das estimativas de magnitude das discrepâncias se manteve a mesma, não melhorando o bloco de modo global.

Com relação à penetração dos pulsos no solo, em áreas de vegetação mais densa, também foram extraídas 3 amostras de 5 m x 5 m da área, em que a densidade média de pontos é de 129 pontos por amostra (5 pontos/m²), dos quais cerca de 11 são pontos de solo. A Figura 59 apresenta um perfil da área de mata presente na parte nordeste do bloco, em que é possível distinguir pontos de solo de pontos de vegetação.

Figura 59: Perfil da nuvem de pontos obtida da área de mata.



6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A nuvem de pontos gerada com este sistema apresenta acurácia da ordem de 50 cm, o que é aceitável para algumas aplicações, como a estimativa da altura média de árvores de regiões de mata pouco densas. Esta precisão poderá ser melhorada com a introdução de melhorias no sistema e no processamento dos dados. A partir de análises em áreas de mata, foi verificada a possibilidade de se estimar a altura média das árvores pelo cálculo da diferença de altura entre os pontos de solo e os pontos pertencentes às copas das árvores, graças à penetrabilidade dos pulsos nessas áreas.

Quanto à cobertura obtida pela nuvem de pontos, sabe-se que a altura de voo é um parâmetro importante a ser considerado, assim como a velocidade da plataforma. De acordo com as características da área a ser levantada, é importante avaliar a configuração destes parâmetros a ser adotada no levantamento. Com os experimentos realizados pôde-se verificar que, para áreas de asfalto, por exemplo, a altura de voo deve ser abaixo de 70 m e que a cobertura do levantamento é comprometida caso a velocidade seja superior a 5 m/s. Problemas relacionados à comunicação dos sistemas e gravação dos dados foram solucionados através dos códigos implementados e integrados no *Raspberry PC* e no processamento da nuvem. Para as falhas decorrentes de problemas físicos de contato, principalmente no *Raspberry PC*, e conexões físicas entre os componentes, será desenvolvida uma caixa fechada para o microcomputador onde apenas o visor, portas e botões de interesse poderão ser acessados.

Com relação aos voos, a interferência eletromagnética que a antena de rádio do VANT causa no entorno do sistema, provocando falhas na comunicação dos sensores e consequente pausa na gravação dos dados, será mitigada desenvolvendo-se uma caixa de material específico para isolamento de todo o sistema e bloqueio do sinal emitido pela antena.

Comparando os resultados obtidos com os apresentados em trabalhos que também empregaram uma unidade Ibeo LUX em plataformas VANT, semelhantes à desenvolvida neste trabalho, mesmo apresentando menor densidade de pontos, a acurácia dos resultados

aparenta ser compatível com a apresentada por Wallace et al. (2012) ao utilizar apenas a nuvem de pontos LASER para a estimativa.

Com relação aos resultados apresentados por Jaakkola et al. (2010), a diferença altimétrica resultante da avaliação do modelo digital de elevação, gerado a partir de nuvem de pontos obtida pelo sistema *Sensei*, apresentou melhores resultados, sendo de cerca de 7 cm em comparação com os resultados apresentados neste trabalho.

Ambos os autores apresentaram os resultados sem a estimativa dos ângulos de *boresight* obtidos por calibração, dada a justificativa que os erros resultantes da resolução e acurácia fornecidas pelo sistema de varredura a LASER empregado são maiores que os erros decorrentes da não calibração do sistema, considerando, então, os ângulos de *boresight* como nulos no processamento.

O método utilizado para a calibração do sistema, um dos objetivos específicos desta pesquisa, não obteve resultados significativos para a estimativa dos ângulos de *boresight* da nuvem, principalmente pela dificuldade de identificar pontos de controle e feições comuns.

Como recomendação para trabalhos futuros utilizando o sistema desenvolvido propõe-se o estudo de novas abordagens de calibração do sistema e a integração da unidade *Flexpack* da NovAtel junto ao sistema inercial a fim de melhorar a estimativa do *heading* (Azimute), permitindo obter nuvens com melhor acurácia.

Para as frequentes falhas nas linhas de varredura, que comprometem a cobertura do levantamento, deixando áreas de interesse sem observação, recomenda-se uma avaliação mais detalhada do processo de transferência e gravação de dados da unidade LASER, para verificar se há a possibilidade de implementar uma restrição lógica que minimize a ocorrência de dados inconsistentes na gravação.

Apesar dos desafios encontrados nas etapas de integração e operação do sistema, o sistema desenvolvido constitui uma tecnologia de mapeamento relativamente barata, quando comparada a aeronaves convencionais e a sistemas de varredura a LASER comerciais para levantamentos aéreos, e de baixo peso a ser utilizada em várias atividades que demandem modelos 3D, como monitoramento ambiental e de florestas, levantamento de rodovias, entre outras.

REFERÊNCIAS

- 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.
- ANDERSON, K; GASTON, K. J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 11, n. 3, p. 138-146, 2013.
- ARMESTO-GONZÁLEZ, J.; RIVEIRO-RODRÍGUEZ, B.; GONZÁLEZ-AGUILERA, D.; RIVAS-BREA, M. T. Terrestrial laser scanning intensity data applied to damage detection for historical buildings. **Journal of Archaeological Science**, v. 37, n. 12, p. 3037-3047, 2010.
- BAIG, Q.; PERROLLAZ, M.; LAUGIER, C. Advances in the Bayesian Occupancy Filter framework using robust motion detection technique for dynamic environment monitoring. **IEEE Robotics and Automation Magazine**. Março, 2014.
- BALTSAVIAS, E. P. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2, p. 199-214, 1999a .
- BALTSAVIAS, E. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n.2-3, p. 164-198, 1999b.
- BANG, K. I.; HABIB, A. F.; MÜLLER, M. Lidar system calibration using overlapping strips. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 5, p. 725-742, 2009.
- BIRD, A.; ANDERSON, S. A.; WOJCIK, M. D.; BUDGE, S. E. Small SWAP 3D imaging flash lidar for small tactical unmanned air systems. In: **SPIE Defense+ Security**. International Society for Optics and Photonics, p. 946008-946008-8, 2015.
- BRADBURY, R. B.; HILL, R. A.; MASON, D. C.; HINSLEY, S. A.; WILSON, J. D.; BALZTER, H.; ANDERSON, G. Q. A.; WHITTINGHAM, M. J.; DAVENPORT I. J.; Bellamy, P. E. Modelling relationships between birds and vegetation structure using airborne LiDAR data: a review with case studies from agricultural and woodland environments. **Ibis**, v. 147, n. 3, p. 443-452, 2005.
- BURMAN, H. Calibration and orientation of airborne image and laser scanner data using GPS and INS. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**. v. XXXIII, Part B3. Amsterdam, 2000.
- CANAVOSIO-ZUZELSKI, R.; HOGARTY, J.; RODARMEL, C.; LEE, M.; BRAUN, A. Assessing Lidar Accuracy with Hexagonal Retro-Reflective Targets. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 79, n. 7, p. 663-670, 2013.
- CHISHOLM, R. A.; et al. UAV LiDAR for below-canopy forest surveys. **Journal of Unmanned Vehicle Systems**, v. 1, n. 01, p. 61-68, 2013.
- COLOMINA, I. Modern sensor orientation technologies and procedures. In: **Test Report and Workshop Proceedings**, Official Publication, p. 59-70, 2002.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 92, p. 79-97, 2014.

CORONA, P.; CARTISANO, R.; SALVATI, R.; CHIRICI, G.; FLORIS, A.; DI MARTINO, P.; MARCHETTI, M.; SCRINZI, G.; CLEMENTEL, F.; TRAVAGLINI, D.; TORRESAN, C. Airborne Laser Scanning to support forest resource management under alpine, temperate and Mediterranean environments in Italy. **European Journal of Remote Sensing**, v. 45, p. 27-37, 2012.

CSANYI, N.; TOTH, C. Improvement of LiDAR Data Accuracy Using LiDAR-Specific Ground Targets. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 73, n. 4, p. 385-396, 2007.

DE LIMA, S. R. S. **Integração GPS/INS Utilizando Sensores Inerciais Baseados Em Sistemas Microeletromecânicos (MEMS)**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná (UFPR), 2005.

EVERAERTS, J. New Platforms - Unconventional Platforms (Unmanned Aircraft Systems) for Remote Sensing. **EuroSDR**, Frankfurt, 102 págs, 2009.

GALO, M. Notas de aula – Fotogrametria III. Departamento de Cartografia. FCT – UNESP, Presidente Prudente – SP, 2013.

GALVANIN, E. S.; DAL POZ, A. P. Sistema LiDAR e métodos de interpolação de dados. **Revista de Geografia** (Recife), v. 30, n. 1, p. 91-102, 2012.

GEIGER, A.; LENZ, P.; URTASUN, R. Are we ready for autonomous driving? the kitti vision benchmark suite. In: **Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on**. IEEE, p. 3354-3361, 2012.

GIONGO, M.; KOEHLER, H. S.; MACHADO, S. A.; KIRCHNER, F. F.; MARCHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 231-244, 2010.

GLENNIE, C.; BROOKS, B.; ERICKSEN, T.; HAUSER, D.; HUDNUT, K.; FOSTER, J.; AVERY, J. Compact multipurpose mobile laser scanning system—Initial tests and results. **Remote Sensing**, v. 5, n. 2, p. 521-538, 2013.

GOMES, R. A. V. **Sistema embebido de georreferenciamento e controle**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2012.

HAALA, N.; BRENNER, C. Extraction of buildings and trees in urban environments. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, n. 2, p. 130-137, 1999.

HAALA, N.; ALSHAWABKEH, Y. Combining Laser Scanning and Photogrammetry-A Hybrid Approach for Heritage Documentation. In: **VAST**, p. 163-170, 2006.

HAALA, N.; PETER, M.; CEFALU, A.; KREMER, J. Mobile lidar mapping for urban data capture. In: **Proceedings of the 14th International Conference on Virtual Systems and Multimedia**, Limassol, Cyprus, p. 95100, 2008.

HABIB, A. F. Accuracy, Quality Assurance, and Quality Control of LiDAR Data, Chap 9. **Topographic Laser Ranging and Scanning – Principles and Processing**. CRC Press, Taylor & Francis, p.269-294, 2008.

HABIB, A. F.; KERSTING, A. P.; RUIFANGA, Z.; AL-DURGHAM, M.; KIM, C.; LEE, D. C. Lidar strip adjustment using conjugate linear features in overlapping strips. In: **Proceedings of the XXI ISPRS Congress**, Commission I, Beijing - China, v.37, part B1, 2008.

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.; RENS, J. V. Quality Assurance and Quality Control of LiDAR Systems and Derived Data. In: **Advanced Lidar Workshop**, University of Northern Iowa, 2007. Disponível em: <http://www.asprs.org/a/society/committees/lidar/AKAM_LiDAR_Calibration.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2014.

HANDLEY, M.; PERKINS, C.; JACOBSON, V. **SDP: Session Description Protocol**. 2006. Disponível em: <<http://tools.ietf.org/pdf/rfc4566.pdf>>. Acessado em: 29 de fevereiro de 2016.

HONKAVAARA, E.; KAIVOSOJA, J.; MÄKYNEN, J.; PELLIKKA, I.; PESONEN, L.; SAARI, H.; SALO, H.; HAKALA, T.; MARKLELIN, L.; ROSNELL T. Hyperspectral reflectance signatures and point clouds for precision agriculture by light weight UAV imaging system. **ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. I-7, p. 353-358, 2012.

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

IBEO AUTOMOTIVE. **Synchronization Methods of ibeo LUX (model 2010)**. Ibeo Automobile Sensor GmbH, 2013.

IBEO LUX. Citação de texto eletrônico. Mensagem pessoal enviada para o autor em 8 de abril de 2015.

JAAKKOLA, A.; HYYPPÄ, J.; KUKKO, A.; YU, X.; KAARTINEN, H.; LEHTOMÄKI, 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, p. 514-522, 2010.

JIANMIN, D.; GUANGZU, Y.; LIXIAO, S.; JUNJING, Z.; KUNLUN, L. Data acquisition and processing of multi-layer laser radar in intelligent vehicle. In: **Control Conference (CCC), 2013 32nd Chinese**. IEEE, p. 3986-3991, 2013.

JONES IV, G. P.; PEARLSTINE, L. G.; PERCIVAL, H. F. An assessment of small unmanned aerial vehicles for wildlife research. **Wildlife Society Bulletin**, v. 34, n. 3, p. 750-758, 2006.

KAGER, H. Discrepancies Between Overlapping Laser Scanning Strips - Simultaneous Fitting of Aerial Laser Scanner Strips. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 35, n. B1, p. 555-560, 2004.

KERSTEN, T. P.; BÜYÜKSALIH, G.; BAZ, İ.; JACOBSEN, K. Documentation of Istanbul historic peninsula by kinematic terrestrial laser scanning. **The Photogrammetric Record**, v. 24, n. 126, p. 122-138, 2009.

KOLSKI, S.; FERGUSON, D.; BELLINO, M.; SIEGWART, R. Autonomous driving in structured and unstructured environments. In: **Intelligent Vehicles Symposium, 2006 IEEE**. IEEE, p. 558-563, 2006.

KRAUS, K. **Photogrammetry Volume 1: Fundamentals and Standard Processes**. English Edition. Köln: Dümmler, 2000.

LEHTOMÄKI, M.; JAAKKOLA, A.; HYYPPÄ, J.; KUKKO, A.; KAARTINEN, H. Detection of vertical pole-like objects in a road environment using vehicle-based laser scanning data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 3, p. 641-664, 2010.

LEFSKY, M. A.; COHEN, W. B.; PARKER, G. G.; HARDING, D. J. Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies Lidar, an emerging remote sensing technology that directly measures the three-dimensional distribution of plant canopies, can accurately estimate vegetation structural attributes and should be of particular interest to forest, landscape, and global ecologists. **BioScience**, v. 52, n. 1, p. 19-30, 2002.

LIM, K.; TREITZ, P.; WULDER, M.; ST-ONGE, B.; FLOOD, M. LiDAR remote sensing of forest structure. **Progress in physical geography**, v. 27, n. 1, p. 88-106, 2003.

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

LIN, Y.; HYYPPÄ, J.; KAARTINEN, H.; KUKKO, A. Performance analysis of mobile laser scanning systems in target representation. **Remote Sensing**, v. 5, n. 7, p. 3140-3155, 2013.

LUGNANI, J. B. **Introdução à fototriangulação**. Curitiba: Imprensa Universitária, 134 p, 1987.

MASON, D. C.; HORRITT, M. S.; HUNTER, N. M.; BATES, P. D. Use of fused airborne scanning laser altimetry and digital map data for urban flood modelling. **Hydrological Processes**, v. 21, n. 11, p. 1436-1447, 2007.

MAURICI, A. B. **Suporte a redes CAN para aplicações embarcadas**. Monografia (Graduação) - Bacharelado em Ciências da Computação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

METCALFE, R. M.; BOGGS, D. R. Ethernet: distributed packet switching for local computer networks. **Communications of the ACM**, v. 19, n. 7, p. 395-404, 1976.

MIKHAIL, E. M.; ACKERMANN, F. **Observations and Least Squares**. New York: IEP-A Dun-Donnelley Publisher, 1976.

MILLS, D. L. Internet time synchronization: the network time protocol. **Communications, IEEE Transactions on**, v. 39, n. 10, p. 1482-1493, 1991.

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

MORAES, M. V. A. **Monitoramento e avaliação de processos erosivos marginais em reservatórios de usinas hidrelétricas por meio de varredura a LASER**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista (UNESP). Presidente Prudente, 2016.

MORIN, K. W. Calibration of airborne laser scanners. **UCGE Reports**, n. 20179, 2002.

MOSTAFA, M. M. R. History of inertial navigation systems in survey applications. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 67, n. 11, p 1225 – 1227, 2001.

NADAL, C. A.; HATSCHBACH, F. **Introdução aos sistemas de medição do tempo**. Curitiba, 2000. Disponível em: <<http://www.cartografica.ufpr.br/docs/Nadal/apostiladeTEMPO1.pdf>>. Acesso em: 29 de fevereiro de 2016.

NOVATEL Inc. **Inertial Explorer 8.30 - User Guide**. Rev 7, 2010.

NOVATEL Inc. **SPAN-IGM User Manual**. Rev 2, 2013.

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>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2016.

NOVATEL Inc. **Solutions**. Disponível em: <<http://www.novatel.com/solutions/attitude/>>. Acesso em: 31 de janeiro de 2016.

PETROVSKAYA, A.; THRUN, S. Model based vehicle detection and tracking for autonomous urban driving. **Autonomous Robots**, v. 26, n. 2-3, p. 123-139, 2009.

PROJECT TEAM E-MOTION. **Geometry and Probability for Motion and Action**. Disponível em: <<http://raweb.inria.fr/rapportsactivite/RA2014/e-motion/uid0.html>>. Acesso em: 15 de julho de 2015.

REIS, T. T. **Estudo e implementação de técnicas de sincronismo de dispositivos para o georreferenciamento de imagens digitais**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista (UNESP). Presidente Prudente, 2009.

REMONDINO, F. Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. **Remote Sensing**, v. 3, n. 6, p. 1104-1138, 2011.

SCHENK, T. Modeling and Analyzing Systematic Errors in Airborne Laser Scanners. **Technical Report in Photogrammetry**, n. 19, Ohio Sate University, 2001.

SCHENK, T.; SEO, S.; CSATHÓ, B. Accuracy Study Of Airborne Laser Scanning Data With Photogrammetry. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 34, n. part 3, p. W4, 2001.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Redes de comunicação industrial**. Documento técnico nº2. 2007. Disponível em: <http://www.schneiderelectric.pt/documents/product-services/training/doctecnico_redes.pdf>. Acesso em: 12 de janeiro de 2016.

SHAN, J.; TOTH, C. K. (Ed.). **Topographic laser ranging and scanning: principles and processing**. CRC Press, 2008.

SILVA, E. R. T. **Data Logger para GPS**. Monografia (Curso de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Produtos Eletrônicos) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

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

SKALOUD, J.; LICHTI, D. Rigorous Approach to Boresight Self-calibration in Airborne Laser Scanning. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 61, n. 6, p. 47-59, 2006.

SKOG, I.; HÄNDEL, P. Calibration of a MEMS inertial measurement unit. In: **XVII IMEKO World Congress**, p. 1-6, 2006.

SOUZA, F. **Arduino: RS-232/RS-485 – Hardware**. Embarcados. Fevereiro de 2015. Disponível em: <<http://www.embarcados.com.br/arduino-rs-232-rs-485-hardware/>>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2016.

STEINER, H.; QUACKENBUSH, P.; HLASNY, B. Quality Control Of LiDAR Data Using Spatially Oriented LiDAR Targets. Presentation & paper, **GeoTech Conference Vancouver**, British Columbia, Canada, 2009.

TOTH, C. K. **Calibrating airborne lidar systems**. Proc. ISPRS Commission II Symposium, pp. 475-480, 2002.

TULLDAHL, H. M.; LARSSON, H. Lidar on small UAV for 3D mapping. In: **SPIE Security+ Defence**. International Society for Optics and Photonics, 2014.

VIERLING, K. T.; VIERLING, L. A.; GOULD, W. A.; MARTINUZZI, S.; CLAWGES, R. M. Lidar: shedding new light on habitat characterization and modeling. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 6, n. 2, p. 90-98, 2008.

VOSSelman, G.; KESSELS, P.; GORTE, B. The utilisation of airborne laser scanning for mapping. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 6, n. 3, p. 177-186, 2005.

WALLACE, L. Assessing the stability of canopy maps produced from UAV-LiDAR data. In: **Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International**. IEEE, p. 3879-3882, 2013.

WALLACE, L.; LUCIEER, A.; TURNER, D.; WATSON, C. Error assessment and mitigation for hyper-temporal UAV-borne LiDAR surveys of forest inventory. **Proceedings of Silvilaser**, 2011.

WALLACE, L.; LUCIEER, A.; WATSON, C. S. Assessing the feasibility of UAV-based LiDAR for high resolution forest change detection. **Int. Archives Photogramm., Remote Sens. Spatial Inf. Sci**, v. 39, p. B7, 2012.

WALLACE, L.; LUCIEER, A.; WATSON, C. S. Evaluating tree detection and segmentation routines on very high resolution UAV LiDAR data. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 52, n. 12, p. 7619-7628, 2014a.

WALLACE, L.; WATSON, C.; LUCIEER, A. Detecting pruning of individual stems using airborne laser scanning data captured from an unmanned aerial vehicle. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 30, p. 76-85, 2014b.

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.

WOTRUBA, L.; MORSDORF, F.; MEIER, E.; NUESCH, D. Assessment of Sensor Characteristics of an Airborne Laser Scanner using Geometric Reference Targets. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXVI**, v. 3, p. W19, 2005.

YU, X.; HYYPPÄ, J.; RÖNNHOLM, P.; KAARTINEN, H.; MALTAMO, M.; HYYPPÄ, H. Detection of harvested trees and estimation of forest growth using laser scanning. In: **Proceedings of the Scandlaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests**, Umeå, Sweden, Swedish University of Agricultural Sciences, p. 115-124, set. 2003.

YU, X.; HYYPPÄ, J.; KAARTINEN, H.; MALTAMO, M. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. **Remote Sensing of Environment**, v. 90, p. 451-462, 2004.

ZALAMA, E.; GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO, J.; LLAMAS, J.; MEDINA, R. An effective texture mapping approach for 3D models obtained from laser scanner data to building documentation. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 26, n. 5, p. 381-392, 2011.

ANEXO A – Exemplo de arquivo gerado do processamento GNS/IMU

Project: 2015_12_11_Voo_ASA
 Program: Inertial Explorer Version 8.50.4923
 Profile: saida
 Source: GNSS/INS Epochs(Smoothed Combined)

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 ARP [Generic(NONE)]
 IMU to GNSS Antenna Lever Arms:
 x=-0.100, y=-0.081, z=0.160 m (x-right, y-fwd, z-up)
 Body to Sensor Rotations:
 xRot=0.000, yRot=0.000, zRot=0.000 degrees (Rotate IMU into Vehicle Frame)
 IMU->Secondary Sensor Lever Arms:
 x=-0.023, y=-0.019, z=-0.065 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: x-right, y-forward, z-up

Boresight: Off

Station	GPSTime	Date	Easting	Northing	H-Ell	SDHoriz	SDHeight	Omega
Phi	Kappa	OmPhSD	KappaSD					
(Deg)	(HMS)	(MDY)	(m)	(m)	(m)	(m)	(Deg)	(Deg)
113-K	19:03:29.00	12/11/2015	457450.273	7553537.120	410.262	0.048	0.061	0.5386025952
	-0.9013184900	3.8699161870	0.0162879921	0.2189760059				
113-K	19:03:29.02	12/11/2015	457450.273	7553537.120	410.262	0.048	0.061	0.5355194503
	-0.9068959753	3.8614822248	0.0162843036	0.2189703584				
113-K	19:03:29.04	12/11/2015	457450.274	7553537.120	410.262	0.048	0.061	0.5326328621
	-0.9109286097	3.8556246939	0.0162806158	0.2189647257				
113-K	19:03:29.06	12/11/2015						

ANEXO B – Exemplo de arquivo *.csv gerado

```
#####
# IBEO LUX scan data CSV format
# FILE NAME SYNTAX: lux-data--YEAR-MONTH-DAY_HR-MIN-SEC.csv
# COMMENT SYMBOL: '#'
# FILE FORMAT: all values are double quoted
# timestamp, LUX IP address, LUX port
# "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
#####
2015-07-18_12-51-44,"192.168.0.242","12002"
PACKET_START
2469,"479","11520","960",-960,"18:07:2015-12:19:02:554.2575","18:07:2015-
12:19:02:567.5905"
1,"2","0","960","0.00698132","0.52359878","0.18","168"
2,"3","0","960","0.02094395","0.52359878","0.2","168"
3,"0","0","952",-0.02094395,"0.51923545","0.1","168"
4,"1","0","952",-0.00698132,"0.51923545","0.11","176"
5,"2","0","944","0.00698132","0.51487213","0.15","132"
6,"3","0","944","0.02094395","0.51487213","0.16","140"
7,"0","0","936",-0.02094395,"0.51050881","0.04","160"
8,"1","0","936",-0.00698132,"0.51050881","0.1","156"
9,"2","0","928","0.00698132","0.50614548","0.19","164"
10,"3","0","928","0.02094395","0.50614548","0.2","168"
11,"0","0","920",-0.02094395,"0.50178216","0.1","168"
12,"1","0","920",-0.00698132,"0.50178216","0.08","172"
13,"2","0","912","0.00698132","0.49741884","0.14","160"
14,"3","0","912","0.02094395","0.49741884","0.13","148"
15,"0","0","904",-0.02094395,"0.49305551","0.12","152"
16,"1","0","904",-0.00698132,"0.49305551","0.09","148"
17,"2","0","896","0.00698132","0.48869219","0.18","172"
18,"3","0","896","0.02094395","0.48869219","0.2","172"
19,"0","0","888",-0.02094395,"0.48432887","0.1","168"
20,"1","0","888",-0.00698132,"0.48432887","0.11","176"
21,"2","0","880","0.00698132","0.47996554","0.13","164"
22,"3","0","880","0.02094395","0.47996554","0.18","160"
23,"0","0","872",-0.02094395,"0.47560222","0.03","160"
```

ANEXO C – Relação dos *scripts* executados no *Raspberry PC*

Para o projeto de coleta dos dados do IBEO LUX e os dados da SPAN-IGM-S1, foram desenvolvidos os seguintes *scripts*/executáveis:

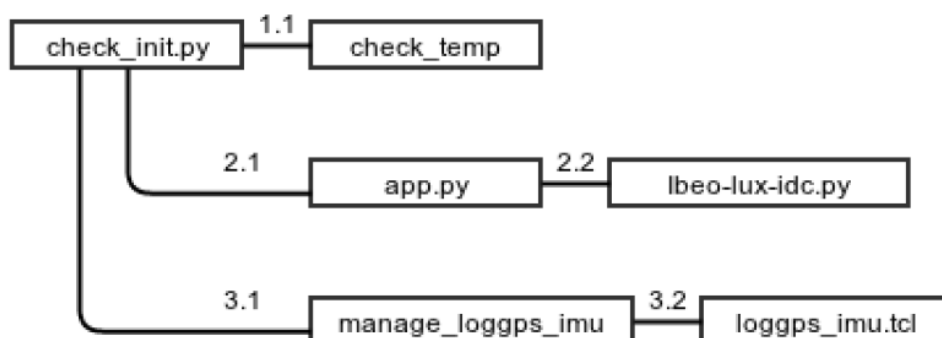
- `check_temp` – *script* desenvolvido em *Shell Script* para obtenção e escrita em um arquivo de log, a temperatura atual do raspberry-pi. Foi desenvolvido com o intuito de monitorar a temperatura do equipamento a fim de se correlacionar alguns travamentos do mesmo com um possível aumento de temperatura.
- `app.py` – *script* desenvolvido em *Python* pela empresa *Harbrick* para configuração dos parâmetros de comunicação com o IBEO LUX Laser (endereço IP e interface de rede) e parâmetros para escrita dos arquivos de saída (formato `.idc`) em um *pendrive* (montagem da porta USB). Uma vez iniciada a coleta, o *script* “`ibeo-lux-converter.py`” é executado.
- `ibeo-lux-converter.py` (original) – também desenvolvido em *Python* pela *Harbrick*, originalmente responsável por realizar a comunicação com o LASER (abertura de *socket* e estabelecimento da conexão), por obter e decodificar os dados do LASER, que são enviados em um formato próprio descritos no seguinte documento: `9500016_ibeo_LUX_Ethernet_Interface_Documentation_v1.39.pdf` e escrever esses dados decodificados em um arquivo “`.csv`”. A partir desse *script*, foram desenvolvidos duas versões modificadas do mesmo: “`ibeo-lux-idc.py`” e outra, mantendo-se o mesmo nome “`ibeo-luxconverter.py`”. Segue a ideia do funcionamento de cada um.
- `ibeo-lux-idc.py` – responsável por realizar a comunicação com o LASER, por obter os dados e diferentemente da versão original, escrever os dados em sua forma bruta mesmo, salvando os arquivos no formato “`idc`”. O tipo de mensagem que é coletada e gravada pelo *script*, é a 8706 (em decimal) ou a 2202 (em hexadecimal). Optou-se pela modificação no código para a gravação dos dados obtidos do laser apenas em sua forma bruta, no formato “`idc`”; devido à economia de espaço que se obtém, pelo fato de que, dessa forma, os arquivos estão sendo guardados em sua forma binária ao invés de texto.
- `ibeo-lux-converter.py` (versão para conversão dos dados) – versão modificada apenas para conversão dos arquivos no formato “`idc`” para um formato de arquivo texto, no caso, o “`csv`”. Além disso, outras modificações foram realizadas nesse *script* com os seguintes propósitos:

– Inserção do campo *width*, que não estava sendo escrito originalmente, porém os dados estavam contidos no formato.

– Exibição das datas e horários no formato: dia, mês, ano, hora, minuto e segundo. Pelo fato do tempo ser enviado no padrão NTP *Timestamp* através do LASER, desenvolveu-se o “ntptimestamp.c”.

- ntptimestamp.c – desenvolvido na linguagem C. Esse programa funciona com o recebimento do NTP *Timestamp* via parâmetro e realiza a conversão para a forma dia, mês, ano, hora, minuto e segundo; escrevendo a sua saída.
- loggps_imu.tcl – desenvolvido na linguagem de *script TCL*, pela empresa Sensormap. O script é responsável por realizar a comunicação com a SPAN-IGM, armazenar os dados brutos coletados em um arquivo “.gps”, armazenar um arquivo de log de eventos e realizar a mudança de data e hora do *Raspberry-pi*, obtido através da mensagem “TIMEA” recebido através da SPAN.
- manage_loggps_imu – *script* em *Shell* para tratar problemas em relação a travamentos de portas. Durante alguns testes observou-se que o travamento das portas da SPAN-IGM ocorrem com certa frequência, ocasionando problemas na escrita e reexecução do *script* “loggps_imu.tcl”. Para solucionar esses problemas, foi desenvolvido esse *script* que realiza a reinicialização do *script* “loggps_imu.tcl” de forma correta, reinicializa e reconfigura as portas virtuais da SPAN-IGM.
- check_init.py – desenvolvido em *Python* com o objetivo de integrar todos os scripts descritos acima e controlar a execução em uma ordem definida. Além disso, este *script* permite exibir no painel LCD do *Raspberry-pi* as informações do que será executado na sequência, bem como exibir informações de controle e monitoramento.

Todos os códigos foram integrados em apenas um *Raspberry-pi*, de modo que a execução dos *scripts* ocorrem da seguinte ordem e hierarquia:



**ANEXO D – Trecho de arquivo ‘falhas_LS.txt’ gerado pelo programa criado para
auxiliar na ordenação**

ang_horiz_range	3830	0	2293256	5716760	5701632	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000								
ang_horiz_limiar	3831	245	2	0	-16	0.006981	-0.008727	0.170000
168.000000								
ang_horiz_limiar	3831	246	3	0	-16	0.020944	-0.008727	0.180000
164.000000								
ang_horiz_limiar	4598	476	1	0	-952	-0.006981	-0.519235	17.090000
164.000000								
dist_width	4598	479	15	10	-15680	0.000000	0.000000	0.000000
188.000000								
dist_width	4598	480	0	0	0	-0.020944	0.000000	123.200000
5594.000000								
dist_width	5366	273	8	7	0	0.000000	0.000000	0.000000
368.000000								
layer_eco	5366	274	12	7	0	0.000000	0.000000	1.000000
368.000000								
layer_eco	5366	275	0	8	0	-0.020944	0.000000	0.020000
352.000000								
...								

*Os campos são referentes às seguintes variáveis: número do pacote de varredura, identificação do ponto, número da camada, número de retorno, identificador de ângulo horizontal, ângulo vertical (radianos), ângulo horizontal (radianos), distância (m), largura do pulso (cm).

ANEXO E – Trecho de arquivo LS.txt gerado pelo programa criado para auxiliar na ordenação dos pacotes

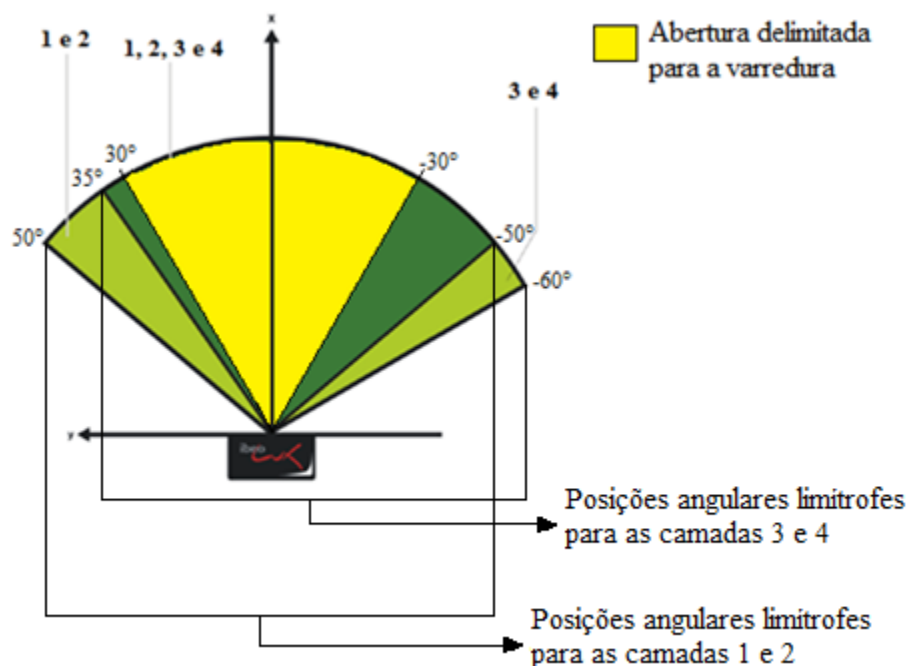
3831	1	2	0	0.006981	0.523599	0.230000	160.000000	68811.442916
3831	2	3	0	0.020944	0.523599	0.240000	168.000000	68811.442916
3831	3	0	0	-0.020944	0.519235	0.150000	152.000000	68811.435753
3831	4	1	0	-0.006981	0.519235	0.120000	172.000000	68811.435753
3831	5	2	0	0.006981	0.514872	0.270000	140.000000	68811.442950
3831	6	3	0	0.020944	0.514872	0.230000	148.000000	68811.442950
3831	7	0	0	-0.020944	0.510509	0.100000	128.000000	68811.435788
3831	8	1	0	-0.006981	0.510509	0.140000	148.000000	68811.435788
3831	9	2	0	0.006981	0.506145	0.230000	164.000000	68811.442984
3831	10	3	0	0.020944	0.506145	0.240000	168.000000	68811.442984
3831	11	0	0	-0.020944	0.501782	0.150000	152.000000	68811.435822
3831	12	1	0	-0.006981	0.501782	0.150000	176.000000	68811.435822
3831	13	2	0	0.006981	0.497419	0.260000	140.000000	68811.443018
3831	14	3	0	0.020944	0.497419	0.240000	152.000000	68811.443018
3831	15	0	0	-0.020944	0.493056	0.150000	136.000000	68811.435856
3831	16	1	0	-0.006981	0.493056	0.130000	148.000000	68811.435856

...

*Os campos são referentes às seguintes variáveis: 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 1 – Relação entre a abertura angular e tempo associado

Figura 60: Relação entre a abertura angular configurada e o tempo associado.



A relação entre os identificadores de valores de ângulo horizontal e ângulo horizontal de varredura é proporcional a 32. Assim, Para o intervalo de varredura especificado de $\pm 30^\circ$, o identificador correspondente é ± 960 .

Exemplo de pacote de dados delimitado para abertura de varredura de $\pm 30^\circ$:

```
"PACKET_START"
"3831","482","11520","960","-960","11:12:2015-17:06:51:434.3689","11:12:2015-17:06:51:447.7019"
"1","2","0","960","0.00698132","0.52359878","0.23","160"
"2","3","0","960","0.02094395","0.52359878","0.24","168"
"3","0","0","952","-0.02094395","0.51923545","0.15","152"
"4","1","0","952","-0.00698132","0.51923545","0.12","172"
"5","2","0","944","0.00698132","0.51487213","0.27","140"
"6","3","0","944","0.02094395","0.51487213","0.23","148"
...
"479","0","0","-952","-0.02094395","-0.51923545","0.15","136"
"480","1","0","-952","-0.00698132","-0.51923545","0.18","152"
"481","2","0","-960","0.00698132","-0.52359878","0.26","168"
"PACKET_START"
"3833","481","11520","960","-960","11:12:2015-17:06:51:594.3467","11:12:2015-17:06:51:607.6797"
...
```


APÊNDICE 2 – Sequência de processamento aplicada

