



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo**

**RAFAEL FRANCISCO FERNANDES**

**AVALIAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UM  
SISTEMA TERRESTRE DE MAPEAMENTO MÓVEL  
DE BAIXO CUSTO**

**CAMPINAS - SP**

**2021**



**RAFAEL FRANCISCO FERNANDES**

**AVALIAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA  
TERRESTRE DE MAPEAMENTO MÓVEL DE BAIXO  
CUSTO**

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Transportes.

**Orientador: Prof. Dr. Henrique Candido de Oliveira**

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO RAFAEL FRANCISCO FERNANDES E ORIENTADO PELO PROF. DR. HENRIQUE CANDIDO DE OLIVEIRA.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

---

**CAMPINAS – SP**

**2021**

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

F391a Fernandes, Rafael Francisco, 1988-  
Avaliação e desenvolvimento de um sistema terrestre de mapeamento móvel de baixo custo / Rafael Francisco Fernandes. – Campinas, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: Henrique Candido de Oliveira.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Transporte. 2. Sistema de posicionamento global. 3. Sistema inercial de navegação. 4. Cartografia digital. 5. Geoprocessamento. I. Oliveira, Henrique Candido de, 1988-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Evaluation and development of a low cost terrestrial mobile mapping system

**Palavras-chave em inglês:**

Transport  
Global positioning system  
Inertial navigation system  
Digital cartography  
Geoprocessing

**Área de concentração:** Transportes

**Titulação:** Mestre em Engenharia Civil

**Banca examinadora:**

Henrique Candido de Oliveira [Orientador]  
Jorge Luiz Alves Trabanco  
Rodrigo Bezerra de Araujo Gallis

**Data de defesa:** 26-04-2021

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Civil

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)  
- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-6919-7495>  
- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/7445296009956426>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E  
URBANISMO**

**AVALIAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA  
TERRESTRE DE MAPEAMENTO MÓVEL DE BAIXO CUSTO**

**Rafael Francisco Fernandes**

**Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**

Prof. Dr. Henrique Candido de Oliveira  
**Presidente e Orientador/ UNICAMP**

Prof. Dr. Jorge Luiz Alves Trabanco  
**FEC/UNICAMP**

Prof. Dr. Rodrigo Bezerra de Araujo Gallis  
**Universidade Federal de Uberlândia (UFU)**

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 26 de abril de 2021

## **Dedicatória**

À minha esposa Andressa e  
aos meus Familiares.

## **Agradecimentos**

Primeiramente agradeço a Deus pela oportunidade, saúde e motivação durante todo esse percurso. Agradeço e reconheço também o auxílio do meu orientador Dr. Henrique Candido de Oliveira, que muito mais que meu mentor se tornou meu amigo e sem a participação dele nada disso seria possível. Sempre prestativo, atencioso, responsável, e sempre ensinando pelo exemplo. Se um dia me tornar professor o terei como minha referência.

Aos professores da FEC por toda a experiência e aprendizado adquirido nessa jornada. Em especial ao Prof. Dr. Jorge Luiz Trabanco pelos ensinamentos durante dois semestres trabalhando como PED da disciplina de Topografia.

Aos técnicos de laboratório em especial Anderson e Wagner por todo auxílio, paciência, ensinamentos e amizade durante esses mais de dois anos. Aos meus amigos de “empreita” do LAB-LCD em especial Marcus Vinicius pela ajuda e a disponibilidade em ajudar sempre que necessário.

Gratificar também toda estrutura oferecida pela UNICAMP, agradecer a cada almoço no restaurante universitário, entre outras atividades magníficas que somente uma universidade como a UNICAMP pode proporcionar. Ao Laboratório de Cartografia Digital pela estrutura fornecida bem como a CAPES/FAPESP pelo suporte financeiro a mim e a essa pesquisa.

Ultimamente, à minha esposa Andressa Salgueiro, aos meus familiares, pai Emanuel Fernandes, mãe Maria Regina, que deram todo o suporte durante essa caminhada.

Por final, posso ter esquecido de citar alguém, porém fica meu profundo agradecimento a todos presentes nesta jornada.

*“Compare yourself to who you were yesterday  
not with who someone else is today”.*

(Jordan B. Peterson)

## Resumo

Os Sistemas Terrestres de Mapeamento Móvel (STMM) são utilizados em diversas aplicações na área de Engenharia tais como, mapeamento, auditoria de rodovias, planejamento urbano e rural, georreferenciamento de feições do sistema viário, entre outras. A principal função de um STMM é obter informações georreferenciadas por meio de sensores remotos a exemplo de câmaras digitais e sistemas de varredura à LASER. A qualidade de cada sensor acoplado ao STMM está de certa forma relacionada ao seu custo. Os STMM em sua maioria são compostos por receptor/antena GNSS, sistema inercial, câmaras digitais e sistemas de varredura à LASER. Neste trabalho foram realizadas análises sobre os dados obtidos pelos diferentes sensores envolvidos no STMM bem com a avaliação de qualidade posicional de feições mapeadas pelo sistema. As informações geradas pelo Sistema Terrestre de Mapeamento de Baixo Custo (STMM-BC) foram comparadas com medidas de referência, obtidas por levantamento fotogramétrico aéreo com precisão centimétrica de 0,027m (planimétrico) e 0,033m (altimétrico). Foram realizados três experimentos com diferentes métodos e configurações e os melhores resultados tiveram um erro posicional em médio de 2,56m e 0,52m, em planimetria altimetria, respectivamente. Dessa forma, um STMM-BC como o desenvolvido neste trabalho pode ser utilizado em aplicações de criação de banco georreferenciado de imperfeições asfálticas tais como, buracos, trincas transversais e longitudinais, desgaste, inventários, entre outros. Além destas, também pode ser utilizado em aplicações como mapas cadastrais a exemplo de: postes de energia elétricos, cadastramento ambiental de árvores e vegetações, cadastramento de rede de drenagens (bocas de lobo e poços de acesso), entre outras aplicações que demandam as precisões alcançadas com esse STMM-BC.

**Palavras-chave:** Sistema Terrestre de Mapeamento Móvel, GNSS, Sistema Inercial, Mapeamento, Transportes.

## ABSTRACT

The Terrestrial Mobile Mapping Systems (TMMS) has been used in several applications in the Engineering area such as, mapping, highway auditing, urban and rural planning, as well as georeferencing of features of the road system, among others. The main function of a TMSS is to obtain georeferenced information using remote sensors such as digital cameras and LASER scanning systems. The quality of each sensor coupled to the TMSS is somewhat related to its cost. The majority of TMSS are composed of GNSS receiver / antenna, inertial system, digital cameras and LASER scanning systems. In this work, analyzes had been carried out on the data obtained by the different sensors involved in the TMMS as well as the positional quality evaluation of the features mapped by the system. The information generated by the Low Cost Terrestrial Mobile Mapping Systems (LC-TMMS) were compared against reference measurements obtained by aerial photogrammetric survey with centimetric precision of 0.027m (planimetric) and 0.033m (altimetric). Three experiments had been carried out with different methods and configurations and the best results obtained had a positional mean error of 2,56m and 0,52m meters. Thus, LC-TMSS as developed in this work may be used in applications such as, creation of georeferenced asphalt imperfections, holes, transverse and longitudinal cracks, among others. As well as applications such as cadastral maps for examples: Electric power poles, environmental registration of trees and vegetation, registration of drainage networks (drain sewer, sewer line access), among other applications that require the achieved precision with the LC-TMSS.

**Key words:** Terrestrial Mobile Mapping System, GNSS, Inertial System, Mapping, Transport.

## LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CGS – *Canadian Geodetic Survey*

IMU – *Inertial Measurement Unit*

INS – *Inertial Navigation System*

LIDAR – *Light Detection And Ranging*

GNSS – *Global Navigation Satellite System*

GPS – *Global Positioning System*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

MMQ – Método dos Mínimos Quadrados

NMEA – *National Marine Electronics Association*

NRCan – *Natural Resources Canada*

PEC-PCD - Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais

POE – Parâmetros de Orientação Exterior

POI – Parâmetros de Orientação Interior

RMSE – *Root Mean Square Error*

SARP - Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas

STM – Sistema Terrestre de Mapeamento

STMM – Sistema Terrestre de Mapeamento Móvel

STMM-BC – Sistema Terrestre de Mapeamento Móvel de Baixo Custo

TSL – *Terrestrial Laser Scanning*

UAV/UAS – *Unmanned Aerial Vehicles/Systems*

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

VANT – Veículo Aéreo não Tripulado

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
1.1.	Estado da Arte.....	17
1.2	Objetivos.....	25
1.2.1	Objetivo Geral.....	25
1.2.2	Objetivos específicos.....	25
2	REVISÃO TEÓRICA .....	26
2.1	Sistemas Sensores .....	26
2.1.1	GNSS.....	26
2.1.2	INS .....	30
2.1.3	Integração GNSS/ INS .....	31
2.1.4	Câmaras Digitais .....	32
2.2	Ajustamento de Observações .....	35
2.2.1	Método dos Mínimos Quadrados.....	35
2.2.2	Método Paramétrico.....	37
2.3	Procedimentos Fotogramétricos .....	38
2.3.1	Resseção Espacial .....	40
2.3.2	Interseção Fotogramétrica.....	42
2.3.2.1	Interseção Fotogramétrica por MMQ.....	43
2.3.2.2	Interseção Fotogramétrica por Fator de Escala .....	44
2.3.3	Calibração de Câmaras .....	47
2.3.4	Fototriangulação .....	49
2.3.5	Calibração do Sistema .....	50
2.4	Sistemas Terrestre de Mapeamento Móvel .....	51
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
3.1	Materiais .....	55
3.1.1	<i>Hardware</i> .....	55
3.1.2	<i>Software</i> .....	57
3.2	Método .....	58
3.2.1	Calibração das Câmaras .....	59
3.2.2	Calibração do Sistema .....	60
3.2.3	Montagem do Sistema .....	62
3.2.4	Coleta de Dados .....	63
3.2.5	Processamento de Dados .....	64
3.2.6	Avaliação Posicional.....	66

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	68
4.1	Aplicações do STMM-BC .....	73
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	76
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	77
	APÊNDICE A – Coordenadas referência e as observações e análises estatísticas para o experimento 1 com receptor L1.....	86
	APÊNDICE B – Coordenadas referência e as observações e análises estatísticas para o experimento 1 com receptor L1/L2. ....	87
	APÊNDICE C – Coordenadas referência e as observações e análises estatísticas para o experimento 2 com receptor L1 integração ( <i>loosely-coupled</i> ). ....	88
	APÊNDICE D – Coordenadas de referência observações e desvios para avaliação altimétrica.	

## 1. INTRODUÇÃO

Os dados e informações são importantes em qualquer área do conhecimento para subsidiar tomadas de decisões. Para se obter esse material base são necessárias grandes quantidades de observações, experimentos, análise de dados e extração de dados, bem como a simulações de fenômenos (YANG *et al.*, 2010). As informações geradas, quando agregada a uma localização geográfica, ou espacial, torna-se uma geoinformação.

Atualmente a geoinformação é base primordial na construção e desenvolvimento de cidades inteligentes, como destacado por Daniel e Doran (2013) que apontam a importância da geoinformação no monitoramento de dados relacionados ao meio ambiente, transporte, infraestrutura, edificações e planejamento urbano. As informações georreferenciadas são informações-chave utilizadas para cidades inteligentes e são primordiais para o crescimento sustentável. A integração entre geoinformação e tecnologia ajuda a conectar pessoas, empresas e os gestores públicos proporcionando inovações tecnológicas e a melhoria da infraestrutura física, incluindo estradas, abastecimento de água, esgoto, entre outros (HARRISON e DONNELLY, 2011). A geoinformação também possui uma forte influência no planejamento urbano como descrito por Oreshchenko e Nesterchuk (2017) que realizaram a análise espacial da expansão de algumas cidades da Ucrânia, tais como (Kyiv, Kharkiv e Lutsk), bem como a modelagem de crescimento urbano para avaliar os impactos potenciais da urbanização no clima da cidade. Já na mobilidade urbana, como dito por Xu *et al.*, (2019), a geoinformação é essencial para descrever como a maioria dos fluxos de movimento dos seres humanos se comportam com uma certa regularidade, predizendo assim esses comportamentos migratórios, e fazendo com que seja possível a descoberta de padrões de mobilidade urbana que auxiliaram nas demandas da sociedade.

É de fundamental importância para os administradores públicos compreender os padrões de deslocamento e de mobilidade urbana. Por exemplo, a detecção de padrões pode ajudar os agentes públicos na realização de medidas oportunas para mitigar o potencial congestionamento de veículos e auxiliar nas dinâmicas de movimentação. De acordo com Cui, Luo e Wang (2018), nas últimas décadas, com o desenvolvimento da tecnologia da informação e consequentemente da geoinformação, graças ao desenvolvimento de dispositivos móveis equipados com receptores de GNSS (*Global Navigation Satellite System*), essas tecnologias são amplamente utilizadas, o que possibilita uma grande quantidade de registros de movimentos de pessoas (via dados GNSS) para o estudo da mobilidade urbana.

A obtenção da geoinformação, de acordo Yang *et al* (2010), se dá por meio de captura de componentes de observações da Terra, aos quais são usadas plataformas e sistemas computacionais, infraestrutura de informação, sistemas de coleta e distribuição de dados, e as aplicações desses componentes apoiam-se nos estudos de vários fenômenos geoespaciais, tais como o georreferenciamento, o mapeamento de feições, entre outros. No entanto, certos conceitos, funcionalidades e questões metodológicas fazem da geoinformação um elemento de apoio ao mundo.

As pesquisas atuais, visam a melhoria de sensores e métodos para que seja possível capturar diferentes dados da superfície física terrestre, com maior confiabilidade, tais como: coordenadas tridimensionais de feições e nuvem de pontos tridimensionais de alta densidade. Outro ponto pesquisado é a rapidez e facilidade do processamento desses dados obtidos e sua visualização e utilização computacional. Além disso, a requisição por análises rápidas aumentou drasticamente por meio de diversas demandas da sociedade devido aos avanços tecnológicos, tais como: a dinâmica populacional das cidades, o rápido desenvolvimento das estruturas físicas de um município e o deslocamento de pessoas (CUI, LUO E WANG, 2018; XU *et al.*, 2019). Diminuir o tempo e a aumentar facilidade de processamento nos diversos processos e procedimentos relacionados à geração de dados espaciais tem sido uma das ênfases das pesquisas relacionadas à geoinformação, dessa forma uma coleta ágil e confiável também se faz necessária (KOLBE, KONIG e NAGEL, 2011).

Para os recursos apresentados em mapas ou organizados em bancos de dados digitais vinculados à superfície da Terra por meio de coordenadas, endereços ou outras formas de indexação são chamados coletivamente de geoinformação. Uma edificação cuja informação geométrica é fornecida ou adquirida e pode ser representada em um sistema de coordenadas georreferenciado, é um exemplo de geoinformação. Os dados geoespaciais podem ser adquiridos pela digitalização de mapas ou por métodos tradicionais de levantamento, como a Topografia e a Geodésia. Dados geoespaciais também podem ser adquiridos usando técnicas de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, seja por plataformas terrestres, aéreas ou orbitais. Depois de adquiridos esses dados devem ser organizados/tabulados, processados, analisados e posteriormente utilizados (BOSSLER *et al.*, 2010).

Uma das formas de aquisição de geoinformação é o Sistema Terrestre de Mapeamento Móvel (STMM). A tecnologia de mapeamento móvel surgiu na década de 90 com o embarque e integração de sensores de posicionamento e navegação para a determinação da trajetória e posição de um veículo, associados a vídeo-câmaras digitais.

Para a Engenharia Civil, dados e informações georreferenciados são imprescindíveis para diversas aplicações tais como: projeto e execução de rodovias e planejamento urbano. Sendo assim, o STMM busca suprir uma lacuna que é a obtenção de informação de maneira dinâmica por meio do uso do georreferenciamento direto. A geoinformação oriunda de um STMM pode ser usada para tomada de decisões em diferentes setores por exemplo: planejamento rodoviário, mobilidade urbana, mapeamentos cadastrais, levantamentos de equipamentos públicos, etc. A ideia de um mapeamento cinemático é uma técnica já usada, porém de acordo com Schwarz e El-Sheimy (1998), a popularização desse tipo de coleta de dados se dá na década de 90, graças aos avanços na tecnologia de navegação por satélite e sistema inercial, portanto, tornou-se possível pensar em mapeamento móvel de uma maneira eficaz. Em vez de usar pontos de controle em solo como referência, a fim de orientar as imagens no espaço (georreferenciamento indireto), agora isso pode ser determinado diretamente utilizando sistemas de posicionamento por satélite e inerciais (georreferenciamento direto). Isso tornou o mapeamento independente, não necessitando de pontos no espaço objeto para referenciar a plataforma.

O Google *Street View*, plataforma da empresa Google, por exemplo, é uma ferramenta que permite o usuário visualizar imagens adquiridas por um sistema acoplado à veículos que possuem equipamentos específicos, tais como câmaras digitais e sensores para capturar as imagens e posição da plataforma. Essa ferramenta é funcional no quesito expositivo, no entanto para projetos que requerem precisão posicional, e extração de coordenadas, não é possível ser utilizada. Pois, não se possui o conhecimento dos erros envolvidos na obtenção dos dados por parte dos usuários finais. Ademais, caso necessário o uso comercial dessa plataforma, existe um custo financeiro para essa finalidade.

Os STMMs representam um mecanismo de aquisição de dados que comumente integra sensores de posicionamento, tais como sistema inercial, (receptor/antena GNSS), e imageamento (câmaras digitais), permitindo o mapeamento detalhado do mundo real. Com o crescimento das cidades inteligentes, o STMM surge como ferramenta ideal para aquisição de dados por meio do levantamento fotogramétrico terrestre, com a finalidade de auxiliar projetos rodoviários, de mapeamento de feições como postes, guias, etc. Para gestores públicos é de extrema importância o monitoramento e melhoramento contínuo de bases cartográficas, com o objetivo de planejamento de suas localidades (GALLIS *et al.*, 2002).

O potencial de informações que podem ser abstraídas da coleta e análise dos dados de campo possui função crucial para o monitoramento de regiões que estão sujeitas a constantes intervenções humanas, portanto a ideia de um sistema de coleta e dados com

georreferenciamento direto dessas informações torna-se um fator necessário. (GALLIS *et al.*, 2018). Recentemente, os estudos e experimentos realizados visam obter dados úteis como subsídio para a tomada de decisões por agentes públicos. A ideia é obter dados confiáveis, de maneira menos trabalhosa, e com baixo custo, otimizando os processos. Dessa maneira, o STMM se encaixa na demanda da sociedade.

Atualmente existem vários sistemas comerciais disponíveis, como exemplos: Viametris (vMS3D), Vexcel (UltraCAM Mustang), Trimble MX2, Imajbox 3 TX +, e RIEGL VMQ-1HA demonstrados na Figura 1. Além disso, existem STMM de baixo custo (STMM-BC) usados principalmente para pesquisas, como apresentado por Silva *et al.* (2003); Madeira (2012), Sairam, Nagarajan e Ornitz (2016) e Marinelli *et al.* (2017). Todos os sistemas possuem sensores, custo e precisão distintos. Portanto, a seleção do STMM mais adequado a ser utilizado dependerá da aplicação e do orçamento do projeto bem como o conhecimento técnico da equipe que dará suporte ao gestor público.

**Figura 1** – Exemplos de STMM Comerciais



(a) Trimble MX2

(b) Vexcel (UltraCAM Mustang)

(c) e RIEGL VMQ-1HA

Fonte: <<https://optron.com/trimble/products/mx2/>>; <<http://www.riegl.com/nc/products/mobile-scanning/gallery/>>; <<https://www.vexcel-imaging.com/introducing-ultracam>> Acesso em: mar. 2021

Os países em desenvolvimento como o caso do Brasil podem possuir alguma dificuldade em adquirir alguns sensores devido aos aspectos econômicos. Com a possibilidade de escolha, os gestores públicos podem decidir qual sensor é o melhor para a aplicação necessária, sendo assim possível economizar tempo e recursos financeiros. Às vezes, recursos são desperdiçados devido a escolhas equivocadas por parte dos gestores, por exemplo: A escolha de um STMM comercial que custa cerca de U\$ 100.000,00 (cem mil dólares) para tarefas de medições simples, como contagem de sinais de trânsito, árvores, falhas no pavimento das ruas e mapa cadastral das estradas, pode ser equivocada. Essas atividades poderiam ser feitas com um STMM-BC ao qual teria um custo muito menor em torno de U\$ 5.000,00 (cinco mil dólares) e traria informações suficientes para tais aplicações. Portanto, essa é a razão em se

desenvolver um STMM-BC, para que o sistema consiga fomentar esses tipos de aplicações com o mínimo custo possível.

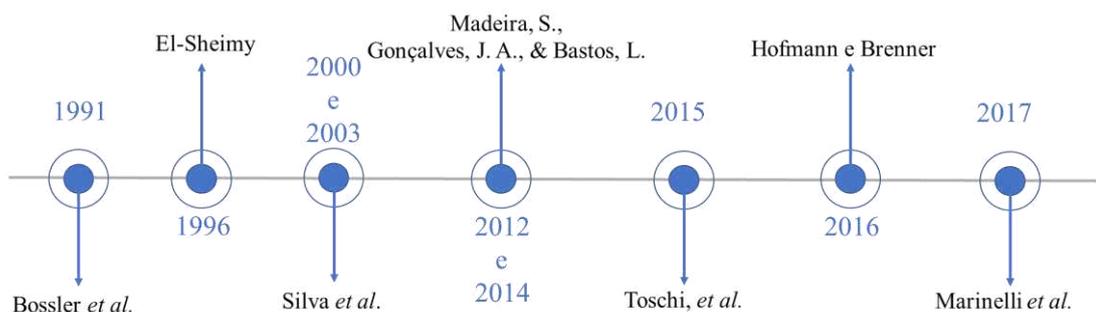
A vantagem de usar um STMM em vez de levantamentos convencional feito por estação total ou GNSS é o tempo e volume de dados relacionados à coleta em campo. Como o STMM é acoplado em um veículo e a velocidade média poderá ser em torno de 30km/h – 80km/h, sendo assim possível coletar um grande volume de dados por quilômetro em um curto espaço de tempo.

Para a aquisição das informações/dados são utilizadas técnicas já consolidadas na ciência como: a Fotogrametria e o Sensoriamento Remoto, onde o dado é adquirido de maneira indireta sem a necessidade de contato físico com o alvo. Geralmente um sistema de sensor remoto é composto por sensores e plataforma. O conjunto de sensores pode ser formado por: sistemas de varredura à LASER, câmaras digitais, receptores/antena GNSS, sistemas inerciais. Enquanto, as plataformas podem ser: carros, aviões, helicópteros, barcos, etc. O STMM-BC avaliado neste trabalho busca contribuir com a pesquisa nacional sobre essa temática e a lacuna na área comercial nacional, ou seja, um meio eficaz e de baixo custo de se obter geoinformação com precisão conhecida para diferentes aplicações, tais como cadastro de sinalização viária (horizontal e vertical), extração de coordenadas de diferentes feições desejadas, geomarketing, entre outros.

### 1.1. Estado da Arte

Abordagens diversas foram feitas para o desenvolvimento e análise do STMM. Há trabalhos que empregam a análise de sistemas já existentes e outros que desenvolvem sistemas com a finalidade de atender uma aplicação específica. Nesta sessão serão abordados trabalhos que possuem relevância, e que contribuíram de alguma maneira no tema proposto pela dissertação. A Figura 2 demonstra a cronologia dos principais trabalhos publicados.

**Figura 2** – Plataformas ao longo do tempo



A plataforma pioneira foi apresentada por Bossler *et al.* (1991) sendo um Sistema de Mapeamento Móvel (SMM) composto por um receptor/antena de GPS (*Global Positioning System*), dois giroscópios e dois hodômetros (contador de velocidade) e um par de vídeo-câmaras monocromáticas digitais VHS no teto de uma van como destacado na Figura 3 com o objetivo de mapear rodovias.

**Figura 3** – SMM-GPSVan



Bossler *et al.* (1991)

Em 1996, o sistema *Video Inertial Satellite* (VISAT) foi desenvolvido por El-Sheimy (1996). O sistema de imageamento contava com oito câmaras VHS, dois de receptores/antenas GPS (L1 / L2), sistema *Inertial Navigation System* (INS) e um mecanismo de contabilidade da quilometragem percorrida pela plataforma. Este sistema foi desenvolvido para possuir alta precisão nas medições e obteve resultados com *Root Mean Square* (RMS) de 0,16m planimétrico e 0,07m altimétrico em feições medidas com distância de até 30 metros da van. O VISAT demonstrado na Figura 4 foi criado para aplicações de inventário rodoviário e cadastro geral para Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Embora a VISAT tenha apresentado bons resultados na coleta de dados, o custo elevado do equipamento torna-o dificilmente replicável em países em desenvolvimento como o Brasil – na época.

**Figura 4** – VISAT



El-Sheimy (1996)

No trabalho de Silva *et al.*, (2000) um protótipo denominado Unidade Móvel de Mapeamento Digital (UMMD) foi apresentado. Composto por uma van, duas câmaras de vídeo (Sony DSR200A) acoplados na parte superior do veículo de maneira a se obter estereoscopia, dois receptores GPS (Ashtech Reliance e Garmin 12 XL), um notebook (Fujitsu Pentium 266MHz) e um sistema de sincronização de quadros com uso de som. Além da unidade móvel de Mapeamento Móvel (a plataforma), existem computadores usados para baixar e processar as imagens gravadas em mídias apropriadas. Um *software* foi desenvolvido para executar os procedimentos fotogramétricos tais como a fototriangulação e para gerar produtos cartográficos. Essa técnica possibilita dar aos pesquisadores diferentes resultados de aplicação desse procedimento sob uma abordagem moderna como alternativa de tratamento para realizar mapas de ruas e vias, feições de transporte, elementos ambientais etc.

De acordo com Silva *et al.* (2000), os resultados atraíram a atenção dos engenheiros de obras públicas que vislumbravam os benefícios dessa tecnologia para inspecionar pavimento rodoviário, para mapear os sinais de trânsito horizontais e verticais, postes de energia elétrica, cabines telefônicas e outras aplicações importantes para a segurança e bem-estar da população. A acurácia do produto final foi avaliada por meio da comparação das coordenadas UTM extraídas do mapa com as coordenadas GPS determinadas em 29 pontos de verificação na área teste. As discrepâncias médias foram  $-0,064\text{m}$  e  $-0,212\text{m}$  para as coordenadas E e N respectivamente. Os RMSE correspondentes foram  $0,938\text{m}$  na componente E e  $0,811\text{m}$  em N.

O trabalho de Silva, Camargo e Gallis (2003) apresenta um protótipo de um STMM de baixo custo composto por uma van como plataforma, duas câmaras de vídeo digitais, dois receptores/antenas GPS. Segundo os autores, o processo de criação de mapas por STMM é semelhante à produção convencional de mapas e, portanto, depende das operações fotogramétricas, como calibração de câmara, orientação por GPS, medição de coordenadas da imagem e interseção fotogramétrica. A calibração das câmaras foi executada por meio de um campo de calibração. O processo de mapeamento é baseado principalmente no procedimento de fotografias terrestres.

Para Silva, Camargo e Gallis (2003), a integração de sensores de imagem digital e de navegação torna a Fotogrametria terrestre efetiva para projetos extensivos de mapeamento de rodovias. Não apenas os mapas vetoriais podem ser produzidos, mas também uma grande base de dados, como imagens raster georreferenciadas e muitos outros itens tais como, coordenadas e mapeamento de feições podem ser integrados em bancos de dados espaciais. A

geração de mapas com tecnologias de mapeamento móvel não é uma ferramenta para competir com o método tradicional e sim uma opção complementar para mapeamentos.

Três experimentos foram realizados neste trabalho. O primeiro experimento tratou de uma sequência de imagens de ruas. O segundo investigou o processo de mapeamento das vias usando uma longa sequência de imagens do eixo da rodovia para a produção de um mapa topográfico. O último experimento focou no desenvolvimento de banco de dados de imagens da rodovia levantada. A figura 5 representa o STMM mencionado.

Figura 5– UMMD



Silva, Camargo e Gallis (2003)

Foram realizadas análises estatísticas em duas situações diferentes, na área urbana e em rodovias as quais resultaram um RMSE de 0,938m e 0,811 nas componentes E e N respectivamente para situação de áreas urbanas. E um RMSE de 1,729m e 2,796m nas componentes E e N respectivamente para o levantamento realizado na rodovia.

De acordo com os autores esses três projetos mostraram o potencial de uma tecnologia de mapeamento móvel de baixo custo para o mapeamento de vias e rodovias urbanas. Sendo a fototriangulação por feixe de blocos uma opção para contornar a ausência de sistemas inerciais para orientar as imagens.

Em Madeira *et al.* (2012) desenvolveu-se uma integração de Sensores em um STMM-BC, no qual o autor apresenta uma técnica de associação de sensores, aplicando o método de referenciamento direto para obtenção das coordenadas. O sincronismo do STMM é dado pelo tempo GPS que de acordo com o autor é a melhor referência de tempo que pode ser acessada dentre os equipamentos utilizados, pois possui uma precisão da ordem do nano segundo, com a vantagem de ser um método simples e barato. Sendo esse o único método viável que fornece um sinal de tempo direto, preciso e seguro para o STMM. Existem duas formas

básicas de sincronizar o tempo do computador com um receptor GPS. O primeiro é baseado na recepção, a partir do receptor GPS, das mensagens NMEA (*National Marine Electronics Association*) que contêm o tempo GPS. Neste caso, a precisão típica de um relógio de computador após ser corrigido será entre 1 e 10 milissegundos; o segundo usa o PPS (*Pulse Per Second*) do receptor GPS que é um sinal TTL (transistor para transistor lógico), sincronizado com GPS com grande precisão (cerca de 40 nano segundos). Como o sinal PPS não possui informações de tempo absoluto, ele é usado em conjunto com mensagens de hora NMEA. Neste caso, a precisão de sincronização do relógio do computador, depois de corrigido, estará dentro de 1 microssegundo.

O método de georeferenciamento indireto é dado de um processo fotogramétrico chamado ressecção espacial, que necessita de pontos de controle externos com coordenadas conhecidas. A ressecção espacial permite a determinação das posições e atitudes das câmaras. As posições das câmaras são então comparadas com as posições e atitudes das coordenadas no espaço objeto no momento da tomada da imagem. (MADEIRA *et al.*, 2012).

O receptor GPS utilizado por Madeira *et al.* (2012) foi o GPS-CAMSYNC Unit - sendo esse um equipamento de baixo custo. O autor utiliza o rumo instantâneo do veículo que é derivado da trajetória do GPS. A precisão horizontal, como indicado pelo fabricante, é de cerca de dois metros, o que é suficiente para alguns tipos de inventário de infraestrutura rodoviária como contabilidade de equipamentos viários e levantamento do eixo da via.

No trabalho de Madeira *et al.* (2012) foram executadas três avaliações do sistema. Na primeira avaliação o sistema foi testado sem os sensores de posicionamento INS/GNSS, somente com as câmaras e foi comparado as coordenadas fotogramétricas com as coordenadas obtidas com estação total. No segundo teste, foram coletadas vinte placas de tráfego distribuídas em áreas urbanas que também foram rastreadas com receptor GNSS com a finalidade de comparação entre STMM e técnicas consolidadas como Topografia e Geodésia. Como último teste foi substituído o receptor de baixo custo por um receptor GNSS de dupla frequência, melhorando substancialmente os resultados obtidos. Os resultados em RMSE para a configuração com receptores de baixo custo foram 1,37m e 1,96m em X e Y respectivamente.

Em Madeira *et al.* (2014) foi desenvolvido um STMM-BC conforme mostrado na Figura 6, composto por um receptor GNSS Novatel DL-V3 dupla frequência, uma INS *Crossbow* AHR5440 IMU como sistema inercial e câmaras digitais. A integração dos dados GNSS / INS foi feita por Filtro de *Kalman*. O filtro de *Kalman* usa como procedimento estatístico o método dos mínimos quadrados que é um eficiente método de estimação dos parâmetros de posição e atitude da plataforma. Para aplicações de navegação, é mais eficiente

usar uma abordagem sequencial e neste caso o Filtro de *Kalman* desempenha um papel importante na integração das observações GNSS e IMU, que é baseada no conhecimento das medições e na dinâmica do vetor de estado. Nas equações mecânicas do Filtro de *Kalman*, a posição, a velocidade e a atitude são calculadas com base no quadro de navegação, combinadas com outras informações dos sensores GNSS/INS.

Tradicionalmente, em Fotogrametria, os ângulos de orientação da plataforma eram associados à fotografia aérea e usados para calcular coordenadas referenciadas na superfície terrestre a partir das coordenadas fotogramétricas. A orientação da plataforma é dada pelas rotações conhecidas  $\omega$ ,  $\kappa$ ,  $\Phi$  (ângulos de Euler) e posição  $(X_0, Y_0, Z_0)$  dos Centros Perspectivos (CP) da câmara fotográfica. Com o desenvolvimento da tecnologia de navegação aplicada às plataformas móveis de levantamento, foram adotados ângulos de orientação diferentes dos habituais em Fotogrametria, que levam os nomes de ângulos de *roll*, *pitch* e *yaw* (MADEIRA *et al.*, 2014).

Madeira *et al.* (2014) avaliou o sistema de posicionamento comparando os pontos na imagem, como quinas de faixa de pedestre com posições previamente obtidas com receptor GNSS (L1/L2). Os parâmetros de posição e orientação das câmaras no espaço objeto foram obtidos por ressecção espacial dos pontos de controle. Após a calibração do sistema foi feito o transporte de coordenadas para cada câmara do sistema, desta maneira foram obtidas de forma independente a posição de cada foto no instante da tomada da imagem. Sendo assim, o autor observou que os parâmetros relativos de orientação calculados e os parâmetros absolutos deveriam ser coincidentes (MADEIRA *et al.* 2014).

Para isso houve uma junção GNSS/INS com auxílio do Filtro de *Kalman*. A estimativa da precisão da IMU, seja em coordenadas ou orientações, não pode depender das diferenças entre as observações da IMU e das câmaras, pois ambas dependem das direções e sentido do veículo dado pelo receptor GNSS. A estratégia seguida foi calcular os deslocamentos lineares e angulares da câmara em relação a IMU, para cada observação. Para isso o receptor GNSS é colocado sobre a plataforma e sua orientação coincide com a orientação da plataforma, sendo assim deslocamentos lineares são conhecidos rigorosamente por meio de medições precisas feitas pelo receptor GNSS. Assim, foi possível avaliar o erro médio e o erro quadrático médio das 3 componentes (X, Y, Z) do deslocamento linear. Neste trabalho, a precisão da solução de navegação fornecida por um georreferenciamento direto implementado com uma determinada integração GNSS / IMU foi avaliada para uma plataforma terrestre movendo-se em um ambiente urbano.

**Figura 6– UMMD**

Madeira (2014)

Toschi *et al.* (2015) descreve uma abordagem projetada para analisar a precisão alcançadas por STMM comercial sistema por diferentes métodos estatísticos tais como, distribuição Gaussiana/Normal e gráficos dos desvios padrões. A avaliação e estudos realizados foram baseados na suposição de que os erros sistemáticos seguem uma distribuição normal em todos os sensores testados nesse trabalho. O fluxo de trabalho adotado neste estudo foi uma avaliação gaussiana, seguida por uma filtragem de *outliers*. Finalmente, modelos estatísticos não paramétricos foram aplicados, a fim de obter uma estimativa robusta da dispersão do erro. O trabalho de Toschi *et al.* (2015) realiza uma análise de comparação baseada em nuvem de pontos.

Já no trabalho de Molina *et al.* (2015) é descrito que ultimamente muitos profissionais vem utilizando Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) como fonte de aquisição de dados, em contrastes com os STMM que desencadearam o potencial de observar cinematicamente qualquer ambiente, bem como a conexão entre VANT e STMM para finalidade de mapeamento de: ambientes urbanos, estradas, ferrovias, aos quais podem fornecer dados importantes para o planejamento. Esse trabalho relata o resultado da junção de dados aéreos realizados por VANT com dados terrestres obtidos pelo sistema Lynx M1.

No trabalho de Hofmann e Brenner (2016) os autores utilizaram como base de referência um levantamento feito com receptor GNSS (L1/L2) e uma estação total criando assim um campo de teste em uma área residencial selecionada para aquisição dos dados. Com base nessa rede geodésica, um campo de teste 3D com fachadas e perfis de ruas foi medido com

uma estação total, cada ponto com uma posição tridimensional. Além disso, as coordenadas dos postes, sinais de trânsito e árvores foram adquiridas com uso de uma estação total. Foram comparados esses dados de referência com pontos tridimensionais adquiridos pelo STMM de várias campanhas de medição. Também foram analisadas as vantagens e desvantagens do uso da plataforma como fonte de aquisição de dados, sendo averiguado resultados como: custos, precisão e aplicabilidade. Dados de mapeamento móvel foram adquiridos usando o sistema RIEGL VMX-250 (Riegl, 2012) equipado com scanners à LASER calibrados, quatro câmaras e o sistema GNSS IMU POS-LV 510 (Applanix, 2016) para posicionamento e orientação, sendo assim um trabalho no qual utilizou-se sensores diferentes do proposto pela dissertação.

Em Marinelli *et al.* (2017) foi desenvolvido um STMM para de identificação de elementos da rodovia, tais como sinalização horizontal e vertical. Os autores utilizaram três receptores/antenas GNSS, uma plataforma GPS-IMU e uma webcam. Os dados da trajetória do veículo foram coletados com um conjunto de receptores, uma GPS-IMU que armazenam a trajetória da plataforma e os receptores GNSS que coletam a posição tridimensional. A plataforma foi conduzida em ambas as direções da rodovia. Após a coleta, foram processados os dados para estimar-se o eixo central da rodovia. Os dados coletados pelo GPS-IMU integrado foram estimados diretamente adotando uma solução do receptor acoplado. As imagens foram coletadas em 10 quadros por segundo (fps) para fins fotogramétricos. Portanto, para este experimento, os dados da câmara foram usados para captar as reflectâncias das linhas brancas, bordas e outras informações radiométricas. Um resultado importante foi que os dados obtidos por sensores GPS-IMU integrados de baixo custo que foram muito próximos aos de receptores GNSS comerciais no caso de soluções baseadas na trajetória.

O método de análise escolhido por Silva *et al.* (2000) foi o de checagem em pontos previamente levantados com receptor GPS (L1/L2), logo após sendo comparadas as coordenadas com pontos escolhidos na imagem, essa técnica foi replicada para esse trabalho.

Em Madeira *et al.* (2012) expõe-se uma técnica que poderá ser utilizada nesse trabalho para o sincronismo de dados entre o sistema fotogramétrico, sistema inercial e sistema de posicionamento. O processo de obtenção dos Parâmetros de Orientação Interior (POI) foi executado com a calibração através de padrões retangulares (“tabuleiro de xadrez”), sendo que essa técnica foi executada nesta dissertação.

Referente a Madeira *et al.* (2012) os experimentos 2 e 3 realizados pelo autor para a validação do STMM foram replicados a fim de se determinar a qualidade posicional do STMM desta dissertação. Esse estudo serviu de base em diversos aspectos para esse trabalho, pois trata-se de um trabalho que segue a mesma linha de pesquisa, porém existem diferenças

entre os trabalhos tanto na avaliação quanto nos sensores do sistema. O STMM-BC desenvolvido na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) tema de estudo desse projeto conta com três câmaras para o processo estereoscópico, dois sistemas de posicionamento GNSS (L1) para uma maior redundância, enquanto o trabalho de Madeira *et al.* (2012) conta com outra configuração de sensores, testes e procedimentos.

Importantes trabalhos relacionados ao tópico da dissertação foram demonstrados nesta seção, o que ajudou a validar a importância do mapeamento e inventário de sistemas viários. Os autores discutidos fizeram diferentes arranjos de sensores para diferentes aplicações. Embora os artigos discutidos nesta seção possam ter objetivos e equipamentos distintos dos propostos por esse trabalho, todos eles possuem semelhanças que auxiliam no desenvolvimento dessa dissertação. Esses foram os principais estudos tomados como referências encontrados para o tema proposto nesse trabalho que auxiliaram na metodologia e fundamentação teórica e tecnológica dessa dissertação.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo principal a avaliação da qualidade posicional de um STMM-BC desenvolvido UNICAMP para diversas aplicações em transportes bem como o desenvolvimento de *software* de processamento fotogramétrico para o funcionamento do sistema.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Como objetivos específicos, pretende-se:

- Avaliar a precisão de cada sensor componente do sistema;
- Desenvolver *software* para calibração das câmaras, retificação das imagens, resseção e interseção espacial;
- Avaliar a qualidade posicional das feições extraídas dos dados obtidos com o STMM;

## 2 REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica em que o projeto foi fundamentado, a fim de esclarecer os conceitos necessários para o entendimento dos processos e das técnicas utilizadas durante a concepção do mesmo.

### 2.1 Sistemas Sensores

Para Moraes (2009), os sistemas sensores são dispositivos capazes de detectar a energia proveniente ou refletida de um objeto, transformá-la em um sinal elétrico e registrá-las, para que esta possa ser armazenada, transmitida em tempo real para posteriormente ser convertida em informações que descrevem objetos. Sendo assim, nesta seção serão abordados conceitos sobre sistemas sensores que são normalmente utilizados em um STMM.

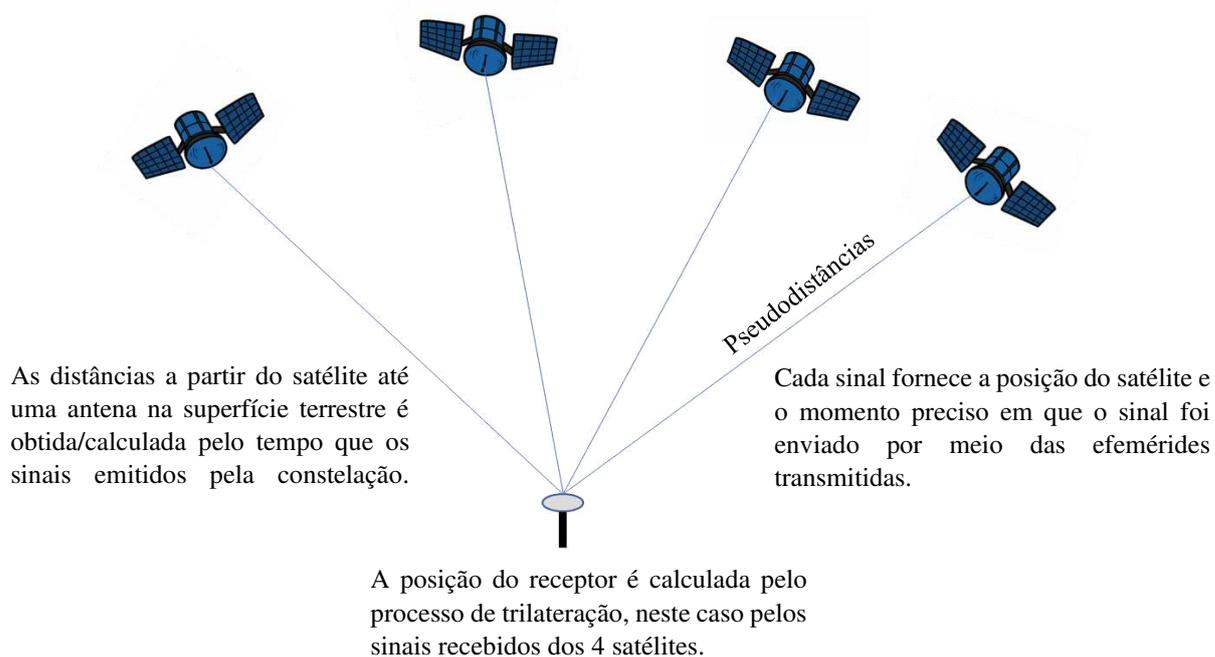
#### 2.1.1 GNSS

Durante a última década, o desenvolvimento e aplicação do GNSS tem progredido constantemente. Além da modernização do GPS (sistema Estadunidense), o sistema russo que se iniciou em 1982, chamado GLONASS (*Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya System*) se encontra totalmente operacional, desde 2011 para usuários para usuários do mundo todo (LEICK *et al.*, 2015). De acordo com Teunissen e Montenbruck (2017) pesquisas relacionadas à levantamentos geodésicos estáticos e cinemáticos com o sistema chinês Beidou vem sendo publicadas desde seu início nos anos 2000, porém esse sistema ainda não é totalmente operacional. Já os sinais do sistema europeu Galileo estão sendo avaliados e estudados, porém essa constelação funciona somente em âmbito regional atualmente. De acordo com Silva *et al.* (2020), desde 2014, os satélites Galileo vêm sendo continuamente lançados visando alcançar a integralidade do funcionamento. Em 2020, vinte e dois satélites estão em órbita, porém o sistema ainda não é oficialmente declarado operacional para os usuários. O termo GNSS é usado para o coletivo da soma de constelações tais como GPS, GNSS, Beidou, Galileo, entre outros, que fornecem ao usuário uma solução de posicionamento tridimensionais. O GNSS é formado por constelações de satélites projetadas para fornecer posicionamento para usuários na Terra ou no espaço (GLEASON, GEBRE-EGZIABHER e EGZIABHER, 2009).

Atualmente, os sistemas GNSS operacionais mais utilizados são o GPS e o GLONASS, por possuírem uma abrangência e confiabilidade global. O sistema GPS foi projetado e realizado pelo departamento de defesa dos EUA e desde então expandiu-se de maneira acelerada. Além de aplicações militares, há um grande conjunto de usuários do setor público a exemplo dos departamentos de estrada e rodagem, redes nacionais de monitoramento,

entre outros. Há também utilização comercial por parte de empresas de infraestrutura e aplicativos de dispositivos móveis como *Google Maps*, *Ifood*, *Waze*, entre outros. Os sinais GNSS são ondas eletromagnéticas que se propagam na velocidade da luz, com frequências de sinal de rádio chamadas código CA, L1, L2 e L5. Ademais possuem um comprimento de onda de cerca de 19–25 cm (MONICO, 2007). O objetivo desse sistema é a determinação instantânea da posição, velocidade e tempo do usuário em qualquer lugar do globo terrestre com base em medidas de distâncias. Essas distâncias são denominadas pseudodistâncias, em razão do não sincronismo do relógio do receptor e dos satélites, além de outros erros inseridos na modelagem. Vale salientar que, de acordo com Groves (2013) para se calcular uma posição no globo terrestre existe a necessidade de disponibilidade de no mínimo quatro satélites para a realização de medidas simultâneas pelos receptores. Abaixo, na Figura 7 segue como exemplo uma esquematização à respeito do funcionamento do sistema de posicionamento por satélites.

**Figura 7** – Princípio de Funcionamento GNSS



**Fonte:** Adaptado de Monico (2007)

Existem diferentes técnicas de posicionamento GNSS. Uma delas é o posicionamento absoluto que, segundo Monico (2007), é realizado com uso de apenas um receptor GNSS e é mais simples e menos preciso que os outros métodos que serão descritos nessa seção. Para MONICO (2007), esse método de posicionamento é feito de forma imediata utilizando a pseudodistância derivada do código C/A presente na onda portadora L1.

Outra técnica é o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) cujas equações de observações utilizadas são as mesmas do posicionamento absoluto já citado anteriormente, porém utiliza-se das efemérides precisas e não as transmitidas como no posicionamento absoluto. As coordenadas da estação são diretamente influenciadas pelos erros das coordenadas e pelas correções dos relógios de cada satélite observado, além dos erros atmosféricos. Porém, com a utilização da técnica PPP é possível reduzir significativamente os efeitos da ionosfera a partir da utilização de uma combinação linear livre dos efeitos da ionosfera (MONICO, 2007). Para o PPP *online* de acordo com Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), é utilizado o *software* GPSPACE, desenvolvido pelo *Canadian Geodetic Survey* (CGS) do *Natural Resources Canada* (NRCan) para os cálculos geodésicos. Este *software* permite que usuários de GNSS obtenham, a partir de seus levantamentos, coordenadas precisas no sistema de referência oficial do Brasil, o SIRGAS2000, tanto para a época do levantamento quanto para a época 2000,4, que representa a época de referência das coordenadas (IBGE, 2009). O PPP utiliza-se das observáveis pseudodistâncias e fase da onda portadora, ou ambas, coletadas por receptores de dupla ou simples frequência e por um ou mais receptores (MONICO, 2007).

Outro método de posicionamento, descrito por Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008), é conhecido como relativo e tem como função determinar as coordenadas de um ponto desconhecido observando também ao menos um ponto com coordenada conhecida. Sendo assim, o posicionamento relativo tem como objetivo estabelecer um vetor entre esses dois pontos, que é conhecido como linha de base. Para isso é indispensável o uso de dois receptores GNSS coletando simultaneamente observações de um mesmo conjunto de satélites fazendo com que combinações lineares sejam criadas e conduzam a diferença de fase. Um dos receptores nesse procedimento pode ser um receptor da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do IBGE.

Segundo Monico (2007), no posicionamento relativo estático a observável normalmente adotada é a dupla diferença da fase de batimento da onda portadora, podendo também ser utilizado a dupla diferença da pseudodistância ou ambas. Os melhores resultados em termos de acurácia ocorrem quando se possui duas observáveis: fase de batimento da onda portadora e pseudodistâncias. Neste tipo de posicionamento, dois ou mais receptores rastreiam, simultaneamente, os satélites visíveis por um período que pode variar de dezenas de minutos até algumas horas a depender da finalidade do seu posicionamento. Este método de posicionamento é preciso e adequado para levantamentos geodésicos que necessitam de uma alta precisão (milimétrica).

Já no posicionamento relativo estático rápido, tanto o receptor dos pontos de interesse (*rover*) quanto as observações dos pontos de referência (base) devem permanecer estacionados durante um tempo menor que 20 minutos durante o levantamento. No posicionamento relativo cinemático, enquanto um ou mais receptores estão estacionados no(s) vértice(s) de referência, o(s) receptor(es) que coleta(m) dados dos vértices ou feições de interesse, permanece(m) em movimento. O posicionamento relativo cinemático consiste em se determinar um conjunto de coordenadas para cada época de observação, onde um receptor ocupa a estação de referência enquanto o outro permanece se deslocando sobre as feições de interesse. Portanto, no posicionamento cinemático, embora a antena esteja em movimento, a trajetória é descrita por uma série de pontos, de acordo com a taxa de coleta do receptor.

Segundo Monico (2007), no posicionamento relativo cinemático em tempo real, RTK (*Real-Time Kinematic*), para que os dados possam ser processados em tempo real, é necessário que a base (receptor fixo em um ponto com coordenada conhecida) e o *rover* (receptor móvel) estejam transmitindo (base) e recebendo (*rover*) um sinal de correção no mesmo momento da observação, necessitando de um link de rádio ou sinal GSM (Sistema Global para Comunicações Móveis) para essa operação. Dessa forma, este sistema consiste em dois receptores GNSS de dupla ou simples frequências com as respectivas antenas de conexão de rádio, celular via GSM, ou atualmente transmitido via *bluetooth* a exemplo do receptor Spectra SP60 que transmitem as correções e/ou observações da estação de referência base para o receptor móvel. Uma das limitações desta técnica diz respeito à utilização de *link* de rádio na transmissão dos dados para as correções devido a perdas de sinais e a limitação de distância, bem como no sistema GSM ausência de sinal de celular. Para a tecnologia com o *link* via *bluetooth* existe também uma limitação de distância devido ao baixo alcance da tecnologia (BERNARDI e LANDIM, 2002).

Na última década os serviços de correções comerciais privados vêm crescendo devido a evolução tecnológica e disponibilidade dos sinais. Esses serviços são geralmente oferecidos pelos fabricantes GNSS ou por empresas privadas prestadoras de serviço de posicionamento, tais como, Trimble, GeoSurvey, NovAtel, entre outros. Esse serviço dispensa a utilização da base, sendo possível executar um levantamento com apenas um receptor GNSS (*rover*). No caso da correção por GSM a limitação é o sinal de celular. No entanto existem serviços de correção por satélite que é o caso da fabricante Trimble que fornece o serviço RTX (*Real Time eXtended*). De acordo com Elliott e Hegarty (2017), os serviços geralmente consistem em receptores geodésicos multifrequência e multiconstelação e antenas que incluem comunicação com satélites baseadas na correção PPP. Geralmente os usuários pagam para

utilização desse serviço e algumas empresas mantem suas próprias redes geodésicas para gerar as correções de órbitas e relógio dos satélites, bem como as correções ionosféricas e troposféricas em tempo real. Essa é uma alternativa que vem sendo utilizada nos levantamentos feitos com STMM devido a rapidez de ajustamento e processamento das observações GNSS.

### 2.1.2 INS

Segundo Grewal *et al.* (2007), um INS fornece os dados de aceleração de três eixos e a taxa de rotação angular dos mesmos, sendo composto por acelerômetro, giroscópio e magnetômetro. De acordo com Britting (1971), o conceito de navegação inercial é a determinação da posição, atitude e velocidade de uma plataforma. O caso mais geral e comum que descreve um INS é a navegação terrestre que envolve a determinação da posição, atitude e velocidade de uma plataforma em relação à Terra.

Gregory (2017) descreve que os acelerômetros são sensores para medir aceleração inercial. Os giroscópios são sensores usados para medir a taxa de rotação. A navegação inercial depende de giroscópios para manter o conhecimento de como os acelerômetros são orientados em coordenadas inerciais e de navegação. Já o magnetômetro é instrumento utilizado em medidas de intensidade e direção de um campo magnético.

Para Groves (2013), as saídas de giroscópio e acelerômetro fornecerão velocidade e informações de posição da plataforma. Na prática, quando se trabalha com INS, a não linearidade e o ruído presente nos sensores fazem com que a trajetória seja fidedigna por curtos períodos. De acordo com Nebot e Durrant-Whyte (1999), para que exista a formação de uma trajetória que descreva a realidade é necessário a calibração do sistema. A Calibração significa a determinação dos vieses nos acelerômetros e giroscópios. O processo de alinhamento consiste em determinar a orientação inicial da plataforma. Para trabalhar com um sistema INS por longos períodos é necessário reiniciar a unidade quando a plataforma estiver parada ou utilizar-se de informações auxiliares como a integração com um receptor GNSS.

Segundo Groves (2013) existem variações significativas no custo, tamanho, massa e desempenho de diferentes INS. Quanto melhor o desempenho maior o custo.

### 2.1.3 Integração GNSS/ INS

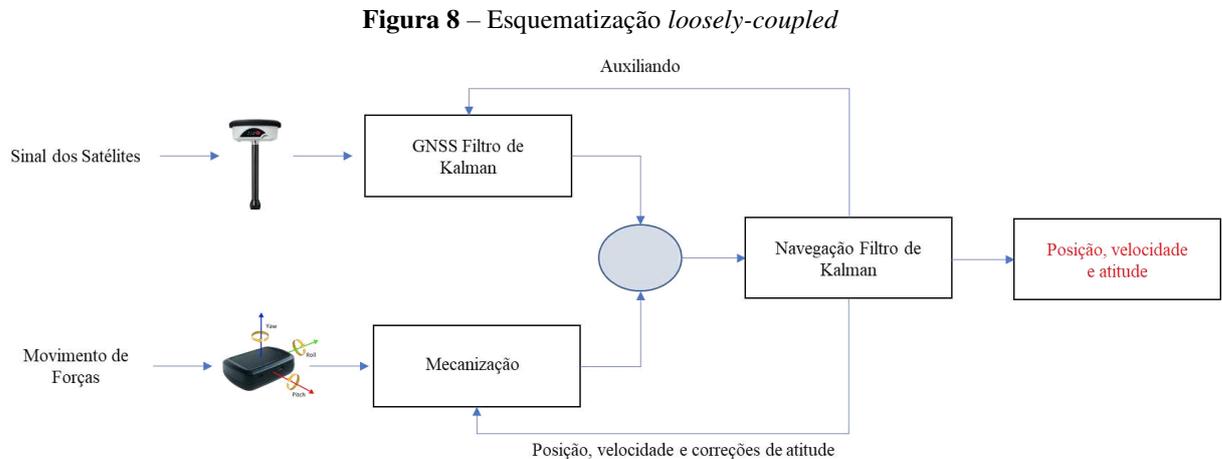
A integração GNSS/INS é uma forma de junção de dados de ambos de forma simultânea. Tal procedimento envolve a combinação de diferentes saídas dos sensores para se obter uma melhor estimativa de movimento e posição de uma plataforma.

Segundo Grewal e Andrews (2007), a sinergia entre GNSS e INS é possível, em parte, porque o INS e o GNSS possuem características de erros complementares. Os erros de posição de curto prazo do INS são relativamente pequenos, mas eles se degradam com o tempo. Erros de posição GNSS, por outro lado, não são tão bons a curto prazo, mas não se degradam com o tempo sendo mais estável. A integração é capaz de aproveitar essas características para fornecer uma implementação de navegação comum e integrada com desempenho superior ao de qualquer um dos subsistemas (GNSS ou INS isoladamente). Possuindo conhecimento sobre os erros em ambos os sistemas, é possível combinar ambos por meio de modelagem matemática.

Existem diversas pesquisas que estudam a integração GNSS/INS por meio de diferentes algoritmos e métodos. O método de integração mais popular é o chamado *loosely-coupled*, onde as posições e velocidades derivadas do processamento do sinal GNSS são combinados com a atualizações das informações posicionais GNSS e das estimativas INS, por meio de um filtro de Kalman como explicado por Welch e Bishop (1995). Outra maneira de combinação dos dados é chamada de *tightly-coupling* que se utiliza das observações brutas GNSS como entradas no filtro de Kalman. Em outras palavras, as integrações *loosely-coupled* têm a posição estimada do INS, velocidade e atitude, enquanto nas integrações *tightly-coupling* o INS estima o valor bruto das observações GNSS, além da posição, velocidade e atitude. Portanto a diferença entre os procedimentos é como o receptor GNSS atualiza e alimenta o INS (AGGARWAL, SYED e EL-SHEIMY (2010); ANGRISANO, PETOVELLO e PUGLIANO (2010); FALCO, PINI e MARUCCO (2017); EL-SHEIMY (2012)).

A integração utilizada nesse trabalho para integrar dados do receptor GNSS com o INS das câmaras envolvidas no sistema é conhecida como *loosely-coupled*. De acordo com El-Sheimy (2012) essa é uma técnica que utiliza as estimativas de posição do GPS em um filtro de Kalman que modela a dinâmica de erros INS ao mesmo momento. De acordo com Infante (2016), a integração consiste em separar o filtro de Kalman com receptor GNSS do INS. Isso significa que a posição, velocidade são primeiramente calculadas pelo Filtro de Kalman do receptor GNSS. Os resultados desses filtros são os dados de entrada e atualização no filtro do INS na forma de posição e velocidades atualizadas. O modelo matemático dessa integração

pode ser encontrado em Petovello (2003). A Figura 8 abaixo mostra genericamente como a integração funciona.



Fonte: Adaptado de El-Sheimy (2012)

A integração *loosely-coupled* realizada nesse trabalho considera o posicionamento do receptor GPS, bem como as medições diretas dos inerciais e *gyros* das câmaras.

#### 2.1.4 Câmaras Digitais

O desenvolvimento da Fotogrametria está diretamente relacionado com o progresso das câmaras fotográficas. Durante anos, fotografias eram registradas em material analógico (película fotossensível). Hoje, as câmaras possuem um menor formato e armazenam suas informações em sistemas digitais. A princípio, as câmaras são divididas em 2 categorias: câmaras métricas e não-métricas.

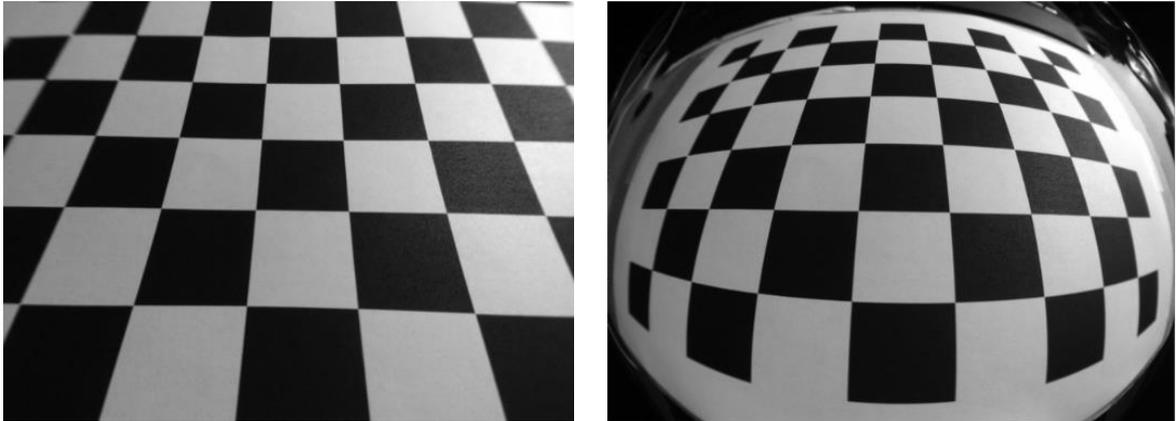
As diferenças resultam das exigências de qualidade do produto final, bem como sua estabilidade geométrica. As câmaras métricas, possuem geometria ópticas e mecânicas de alta precisão, sendo assim, não existe a necessidade de calibração sistemática. Além disso, o sistema de lentes das câmaras métricas é construído como uma unidade com o corpo da câmara. Empresas como Leica e Vexcel produzem câmaras métricas, cuja finalidade é obter produtos com diferentes finalidades e maiores acurácias (LINDER, 2016), principalmente com grandes alturas de voo.

Por outro lado, as câmaras consideradas não métricas, ou digitais para consumidores comuns, estão no mercado para diversas aplicações. Como já mencionado, os princípios de construção entre câmaras métricas e as não métricas diferenciam-se em geral em qualidade e estabilidade geométrica da câmara e do sistema de lentes. Além disso, as câmaras não métricas geralmente possuem uma lente com maiores distorções e baixa estabilidade

geométrica, por exemplo, com a distância focal variável de acordo com condições climáticas (temperatura e pressão), por isso é necessário corrigi-las com processo sistemático de calibração (GALO e TOMMASELLI, 2011). Caso seja necessário o uso de câmaras não métricas para Fotogrametria, é preciso levar em consideração diversos fatores, tais como distorções da lente e dos sensores. Em geral, algumas configurações podem ser pré-definidas, como os parâmetros distância focal, foco, momento da tomada da imagem e resolução (número de pixels utilizados).

A construção de uma câmara se dá por uma unidade de lentes fotográficas e um fotosensor podendo ser um CCD (*Charge-Coupled Device*) ou CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Esses componentes são responsáveis por converter a luz das cenas em elétrons que podem ser medidos resultando em um valor de intensidade radiométrica que compõe uma imagem digital.

Segundo Schenk (2005), o conjunto de lentes também é comumente denominado cone da lente, e inclui as lentes da câmara (objetiva), o diafragma, o obturador e o filtro. O diafragma e o obturador controlam a exposição. A qualidade de um produto fotogramétrico está relacionada à lente, tanto no aspecto radiométrico quanto no geométrico. Uma relevante observação é que o conjunto de lentes podem ser planos ou esféricos. As câmaras formadas por lentes planas resultam em imagens com menores distorções e campo de visão menor, enquanto as lentes esféricas (as mais comuns são denominadas de *fisheye*) possuem um campo de visão maior e maiores distorções. De acordo com Schwalbe (2005), as lentes *fisheye* permitem observações de grande campo de visão, sendo assim possível fotografar e enquadrar um maior número de feições por fotografia. Portanto, elas são úteis para diversas aplicações, tais como imagens áreas, terrestres e aplicações que demandam um maior campo de visão. Além da visualização de paisagens ou interiores (atividades recreativas), as imagens *fisheye* também podem ser usadas para tarefas fotogramétricas tomando os devidos cuidados com a modelagem matemática dos parâmetros de distorções relacionados às lentes. Na figura abaixo pode se observar a diferença de uma imagem tomada por uma câmara com lentes planas convencionais (Figura 9 (a)) e uma imagem obtida com lentes no modelo *fisheye* (Figura 9 (b)).

**Figura 9** – Distorções Causadas por Diferentes Lentes

(a) Plana

(b) Fisheye

Fonte: Autor

É possível identificar as diferenças em distorções e em campo de visão entre as imagens da Figura 9. É importante ressaltar que para fins fotogramétricos ambas as câmaras necessitam de calibração para o conhecimento da geometria interna e os parâmetros intrínsecos.

Um elemento importante relacionado à geometria interna da câmara é a distância focal ( $f$ ), que tem um valor numérico geralmente em milímetros (ou pixels) que descreve a distância entre o plano de imagem e um ponto onde todos os raios de luz se cruzam dentro do sistema de lentes (Centro Perspectivo - CP) (MCGLONE, 2004; TOKIWA, TANAKA e SENBA, 2009).

Deve se ater a configuração da distância focal antes da tomada da imagem, assim é necessário desativar o autofocus das câmaras digitais. Os formatos das imagens digitais são armazenados habitualmente como JPEG ou TIFF. Assim como as câmaras métricas, as câmaras convencionais melhoram de acordo com os sensores e suas estabilidades geométricas. É crucial para trabalhar com dados de imagem de uma câmara digital saber algumas informações como a distância focal, o tamanho dos pixels do sensor, quantidade de linhas/colunas, deslocamento do ponto principal e as distorções radial simétricas e descentradas dadas pela calibração de câmaras (SILVA, 2012 e LINDER, 2016).

## 2.2 Ajustamento de Observações

De acordo com Dalmolin (2010), o ajustamento de observações é um ramo da matemática aplicada e sua finalidade é a solução única para problemas que envolvem observações redundantes que é o caso do STMM-BC. Na maioria dos casos a solução única é dada pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).

### 2.2.1 Método dos Mínimos Quadrados

O MMQ é um dos métodos mais utilizados para o ajustamento de dados onde o número de observações é redundante e o sistema de equações, devido à presença de erros durante o processo de aquisição de dados, é inconsistente (KLEIN, 2011). Então em um modelo ou sistema de equações redundantes e inconsistentes, as soluções que se obtêm para o conjunto de variáveis são distintas. Diferentes de sistemas consistentes, nos inconsistentes nenhum resultado único é possível a menos que um critério seja introduzido. Essa condição permite a aplicação do MMQ e a solução única destes sistemas inconsistentes é o objetivo do ajustamento.

O MMQ consiste em estimar variáveis estocásticas e seus parâmetros de distribuição por meio de amostras observadas. Algebricamente, pode-se representar o MMQ para sistemas de equações lineares por meio das seguintes equações abaixo listadas (DALMOLIN, 2010).

$$AX = L \quad (1)$$

Onde:

$A$ : é uma matriz de dimensão  $n \times u$  dos coeficientes do sistema de equações,  $n$  é o número de observações e  $u$  o número de incógnitas, conhecida como matriz *design* ou matriz dos coeficientes;

$X$ : é o vetor de correção dos parâmetros de dimensões  $u \times 1$ ;

$L$ : o vetor dos termos independentes de dimensões  $n \times 1$ .

No caso da matriz ser quadrada e de característica integral, ou seja, de dimensões  $(u \times u)$  com equações lineares, o sistema será consistente e determinado, porém no caso do STMM-BC a solução é dada por um sistema inconsistente, portanto é introduzido o vetor de resíduos  $V$  de modo que o modelo matemático se torna:

$$AX = Lb + V \quad (2)$$

Onde,

$Lb$ : é o vetor das observações (n x 1);

$V$ : o vetor dos resíduos (n x 1).

Para o caso do STMM-BC, o número de observações (n) é superior ao de incógnitas (u). Sendo assim, possível a aplicação do MMQ para obter uma solução única ao sistema. A forma quadrática fundamental para o MMQ é dada por:

$$\phi = V^T P V = \min \quad (3)$$

Onde,  $P$  é a matriz simétrica dos pesos dada por:

$$P = \sigma_0^2 \Sigma_L^{-1} = \min \quad (4)$$

Onde,  $\Sigma_L$  é a Matriz Variância de Covariância (MVC) das observações e  $\sigma_0^2$  a variância da unidade peso. Sendo assim, possui-se:

$$\phi = (AX - Lb)^T P (AX - Lb) = \min \quad (5)$$

Derivando a forma quadrática em relação a  $X$  e igualando a zero, obtém-se:

$$\frac{d\phi}{dX} = 2A^T P A X - A^T P L b - A^T P L b = 0 \quad (6)$$

Remanejamento a Equação (6), obtém-se:

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P L b \quad (7)$$

A Equação (7) matricial é a final para resolução do MMQ para sistemas inconsistentes na qual se enquadra as equações dos procedimentos fotogramétricos do STMM-BC.

### 2.2.2 Método Paramétrico

Para Dalmolin (2010), o método paramétrico também é conhecido como ajustamento de observações indiretas, método das equações de observações ou modelo explícito. Neste tipo de ajustamento cada observação possibilita uma equação. O modelo matemático para o método é dado por:

$$La = F(Xa) \quad (8)$$

Onde:

$La$ : vetor das observações ajustadas ( $n \times 1$ );

$Xa$ : vetor dos parâmetros ajustados ( $u \times 1$ );

$F$ : função que relaciona  $La$  e  $Xa$ .

Pelo fato de as equações fundamentais da Fotogrametria serem as equações de colinearidade (16) e (17), e essas não serem lineares, é necessário proceder com a linearização do modelo (9). No processo de linearização é empregado um valor aproximado para os parâmetros incógnitos ( $X_0$ ), assim como para função em série de Taylor, com objetivo de linearizar a função, como mostrado na Equação (9) abaixo:

$$La = F(X_0) + \frac{\partial F}{\partial Xa} |_{X_0} X \quad (9)$$

Sendo:

$$La = Lb + V \quad (10)$$

E que,  $Lb$  é o vetor das observações ( $n \times 1$ ) e o vetor  $V$  dos resíduos ( $n \times 1$ ), portanto pode se escrever:

$$Lb + V = F(X_0) + \frac{\partial F}{\partial Xa} |_{X_0} X \quad (11)$$

Onde,  $L_0$  será representado por:

$$L_0 = F(X_0) \quad (12)$$

Sendo assim, pode-se obter:

$$V = AX + L_0 - Lb \quad (13)$$

Como a diferença  $L_0$  e  $Lb$  é representada por  $L$ , o modelo matemático linearizado do método paramétrico é:

$$V = AX + L \quad (14)$$

O vetor  $X$  estimado constitui a correção ao vetor  $X_0$  dos parâmetros aproximados para a aquisição dos parâmetros  $Xa$  que são melhores aproximações dos parâmetros desde que exista convergência.

$$Xa = X_0 + X \quad (15)$$

Sendo assim, o vetor  $Xa$  é utilizado como novo valor aproximado dos parâmetros.

### 2.3 Procedimentos Fotogramétricos

De acordo com Wolf, Dewitt e Wilkinson (2014), a Fotogrametria analítica é uma denominação que descreve os cálculos matemáticos de coordenadas no espaço objeto baseada em parâmetros da câmara, medidas de fotocoordenadas e pontos de controle. Geralmente, a Fotogrametria analítica envolve a solução de sistemas complexos de equações redundantes por meio do MMQ. Entre os procedimentos fotogramétricos existem cinco processos que serão utilizados neste trabalho, sendo estes: Calibração de câmara, Resseção Espacial, Interseção Fotogramétrica, Calibração do Sistema e Fototriangulação.

Antes dos procedimentos analíticos fotogramétricos é importante referenciar-se teoricamente ao conceito da Fotogrametria, que é definida pela Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto como a arte, ciência e tecnologia de se obter informações confiáveis por meio de imagens adquiridas por sensores de uma série de dados de objetos físicos, meio ambiente através do processo de gravação, medidas e interpretação dos objetos pela captação da energia eletromagnética ou outros fenômenos (MIKHAIL, BETHEL e MCGLONE 2001; LINDER, 2009)

Caso deseje-se medir o tamanho de uma feição, digamos o comprimento, largura ou altura de uma casa, normalmente isso é feito executando medidas diretamente e fisicamente no objeto - *in loco*. Pense na situação em que não se pode ter acesso físico a essa casa, ou então

um determinado objeto não mais existe e o que resta são somente registros fotográficos. Ao conhecer os procedimentos fotogramétricos, é possível utilizar esses registros fotográficos para obter informações das feições por meio da Fotogrametria. Os tipos de informações podem ser diferentes: por exemplo, pode-se trabalhar com dados qualitativos por interpretação fotográfica, ou dados quantitativos, como coordenadas, medidas, áreas, entre outras informações geométricas do objeto desejado.

Para isso, de acordo com Linder (2016), a Fotogrametria proporciona métodos para fornecer informações de dados quantitativos para diversas finalidades, tais como projetos de Engenharia ou manutenção de equipamentos históricos. Como o termo já indica, a Fotogrametria pode ser definida como a “ciência relacionada à medição e obtenção de informação tridimensional em fotografias”.

A partir de uma única foto, só é possível obter coordenadas bidimensionais. Portanto, caso seja necessário a obtenção de coordenadas tridimensionais, é indispensável o processo estereoscópico, que se refere à visão de um mesmo objeto/alvo em duas ou mais imagens (MIKHAIL, BETHEL e MCGLONE, 2001). Devido a estereoscopia e a paralaxe, é possível analisar objetos de maneira espacial, e com isso, estimar a distância entre um objeto e o observador – nível de profundidade (LINDER, 2016).

Em virtude do desenvolvimento tecnológico e conseqüentemente dos computadores e o surgimento da imagem digital, adquirida por câmara digital ou digitalização de uma imagem analógica, a Fotogrametria vem sendo usada de maneira extensiva. O processamento das imagens digitais se dá de maneira semelhante à Fotogrametria analítica, sendo possível, hoje em dia, a elaboração de produtos digitais (além das cartas digitais) que necessitam de processamento computacional extremamente elaborado, como as ortoimagens (imagens em perspectiva ortogonal e com escala única). Então, com o surgimento das imagens digitais, emergiu à expressão Fotogrametria digital, que tem como objetivo principal a reconstrução automática do espaço tridimensional (espaço-objeto), a partir de imagens digitais bidimensionais (espaço imagem) em ambiente totalmente computacional (COELHO e BRITO, 2007).

Para a resolução de problemas matemáticos relacionados a Fotogrametria aplica-se as equações fundamentais da Fotogrametria conhecidas como equações de colinearidade (Equações (16) e (17)). Segundo Kraus (1993), esse é o principal modelo matemático para a Fotogrametria tradicional. Ele é baseado no modelo de câmara *pinhole*, onde uma coordenada de ponto de imagem não distorcida ( $x, y$ ) pode ser projetada no espaço-objeto (terreno) como

um ponto 3D (e vice-versa). Para isso, é necessário conhecer os Parâmetros de Orientação Exterior (POE) e Interior (POI) da câmara.

$$x - x_p = \Delta x - f \frac{r_{11}(Xp - Xo) + r_{21}(Yp - Yo) + r_{31}(Zp - Zo)}{r_{13}(Xp - Xo) + r_{23}(Yp - Yo) + r_{33}(Zp - Zo)} \quad (16)$$

$$y - y_p = \Delta y - f \frac{r_{12}(Xp - Xo) + r_{22}(Yp - Yo) + r_{32}(Zp - Zo)}{r_{13}(Xp - Xo) + r_{23}(Yp - Yo) + r_{33}(Zp - Zo)} \quad (17)$$

Onde:

$\Delta x$  e  $\Delta y$ : são as correções dos erros sistemáticos da câmara;

$f$ : é a distância focal calibrada;

$r_{ij}$ : valores oriundos da matriz de rotação obtidos com base nos ângulos de Euler (POE);

$(Xo, Yo, Zo)$ : coordenadas do CP no instante de tomada da fotografia (POE);

$(Xp, Yp, Zp)$ : coordenadas de um ponto 'p' no espaço objeto;

$(x_p, y_p)$ : deslocamento do ponto principal;

$(x, y)$ : coordenadas de um ponto 'p' no espaço imagem.

Os valores de  $r$  são dados em função da matriz de rotação  $R$  descrita abaixo.

$$R = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos k & \cos \omega \sin k + \sin \omega \sin \varphi \cos k & \sin \omega \sin k + \cos \omega \sin \varphi \cos k \\ -\cos \varphi \sin k & \cos \omega \cos k + \sin \omega \sin \varphi \sin k & \sin \omega \cos k + \cos \omega \sin \varphi \sin k \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cos \varphi & \cos \omega \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (18)$$

Onde  $\varphi$ ,  $\omega$  e  $k$  representam os ângulos de atitude da plataforma.

### 2.3.1 Resseção Espacial

Como descrito por Wolf, Dewitt e Wilkinson (2014), a resseção espacial é o método de determinação dos seis parâmetros de orientação exterior - posição  $(Xo, Yo, Zo)$  e atitude  $(\omega, \varphi, \kappa)$  - de uma fotografia no instante de sua aquisição. O modelo matemático utilizado pela Resseção são as equações de colinearidade (Equações (16) e (17)). E conforme a (Seção 2.2.1), são necessários no mínimo sete observações para aplicar o MMQ para que haja redundância, pois nesse processo possui-se seis incógnitas, sendo assim possível o ajuste. Cada ponto de controle (necessariamente fotoidentificável) gera duas observações na imagem  $(x, y)$ . Portanto, essa metodologia demanda um mínimo de quatro pontos de controle com as respectivas

coordenadas tridimensionais do espaço-objeto. Com essas condições atingidas é possível aplicar a Resseção Espacial.

Para o caso de Aerolevantamentos os pontos de controle podem ser obtidos por meio de posicionamento GNSS ou por Topografia convencional. No caso do STMM-BC, tal procedimento pode ser utilizado para determinar parâmetros de calibração do sistema, a exemplo das orientações relativas entre câmaras (tanto em deslocamento quanto em rotação). Para isso, foi implementado um campo de calibração no laboratório de Cartografia Digital (LCD) do Departamento de Infraestrutura e Ambiente da FEC/UNICAMP, com coordenadas obtidas por meio de Estação Total. Também foi desenvolvido de um *software* para obtenção dos parâmetros na qual modelo matemático empregado será descrito a seguir.

Tanto os pontos no espaço objeto quanto as coordenadas no espaço imagem são conhecidos, via levantamento topográfico e medições no *software*, respectivamente. Portanto, nessa situação, os parâmetros a serem estimados serão os POE da câmara.

Considerando as formulações do método paramétrico apresentadas na (Seção (2.2.2)) têm-se o vetor de observações  $Lb$  (Equação 19) com as coordenadas fotogramétricas de todos os pontos de controle observados na imagem.

$$Lb = \begin{bmatrix} xp_1 \text{ coordenada } x \text{ fotogramétrica do ponto de controle } 1 \\ yp_1 \text{ coordenada } y \text{ fotogramétrica do ponto de controle } 1 \\ \vdots \\ xp_n \text{ coordenada } x \text{ fotogramétrica do ponto de controle } n \\ yp_n \text{ coordenada } y \text{ fotogramétrica do ponto de controle } n \end{bmatrix} \quad (19)$$

O vetor de parâmetros iniciais  $Xo$  (Equação 20) contém uma aproximação para as incógnitas, ou seja, uma posição aproximada para a câmara, considerando o sistema de coordenada local adotado e sua atitude (orientação) em relação a esse sistema.

$$Xo^T = [Xo \ Yo \ Zo \ \omega o \ \varphi o \ \kappa o] \quad (20)$$

A matriz *design*  $A$  possui as derivadas parciais do modelo matemático, que neste procedimento são as equações de colinearidade, em função de cada uma das incógnitas.

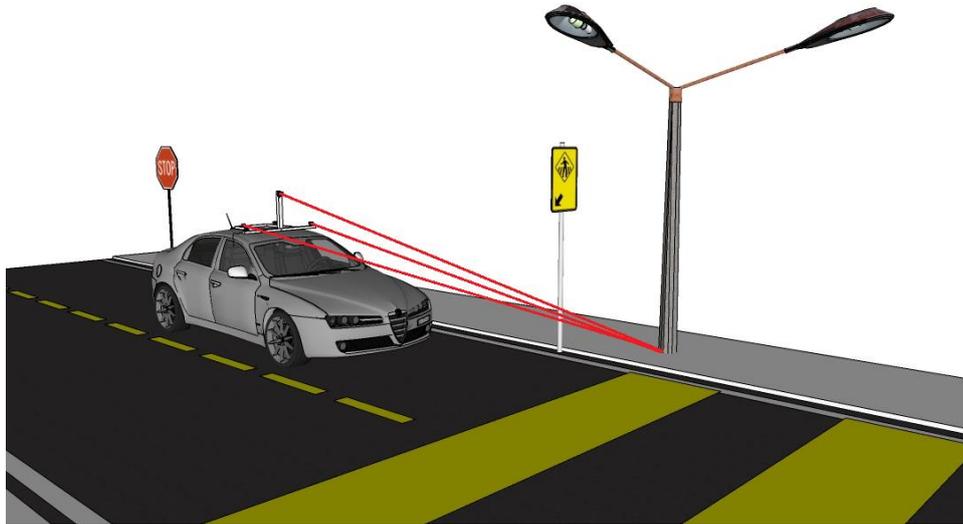
$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial xp_1}{\partial Xo} & \frac{\partial xp_1}{\partial Yo} & \frac{\partial xp_1}{\partial Zo} & \frac{\partial xp_1}{\partial \omega} & \frac{\partial xp_1}{\partial \varphi} & \frac{\partial xp_1}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial yp_1}{\partial Xo} & \frac{\partial yp_1}{\partial Yo} & \frac{\partial yp_1}{\partial Zo} & \frac{\partial yp_1}{\partial \omega} & \frac{\partial yp_1}{\partial \varphi} & \frac{\partial yp_1}{\partial \kappa} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial xp_n}{\partial Xo} & \frac{\partial xp_n}{\partial Yo} & \frac{\partial xp_n}{\partial Zo} & \frac{\partial xp_n}{\partial \omega} & \frac{\partial xp_n}{\partial \varphi} & \frac{\partial xp_n}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial yp_n}{\partial Xo} & \frac{\partial yp_n}{\partial Yo} & \frac{\partial yp_n}{\partial Zo} & \frac{\partial yp_n}{\partial \omega} & \frac{\partial yp_n}{\partial \varphi} & \frac{\partial yp_n}{\partial \kappa} \\ \frac{\partial xp_n}{\partial Xo} & \frac{\partial xp_n}{\partial Yo} & \frac{\partial xp_n}{\partial Zo} & \frac{\partial xp_n}{\partial \omega} & \frac{\partial xp_n}{\partial \varphi} & \frac{\partial xp_n}{\partial \kappa} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Concluindo o procedimento, é possível obter o vetor de parâmetros ajustados (Equação (15)) por meio do vetor de correção dos parâmetros (Equação 8).

A matriz Peso pode ser obtida como apresentado na seção MMQ (Equação (4)). Aplicando o procedimento descrito acima nas Equações de (19) à (21), é possível determinar os POE ( $Xo, Yo, Zo, \omega, \varphi, \kappa$ ) para dar continuidade nos procedimentos fotogramétricos.

### 2.3.2 Interseção Fotogramétrica

De acordo com Mikhail, Bethel e Mcglone (2001), o termo “interseção fotogramétrica” refere-se ao método pelo qual as coordenadas de um ponto no espaço-objeto são determinadas a partir das fotocoordenadas desses mesmos pontos extraídas em duas ou mais fotografias. Conhecendo os elementos de orientação das fotografias utilizadas (POE), realizando as medidas nas imagens e conhecendo os POI, é possível calcular as coordenadas 3D de uma feição presente nas imagens. Para Wolf, Dewitt e Wilkinson (2014), em posse dos parâmetros da orientação exterior para no mínimo um par de fotografias com sobreposição ( $Xo_1, Yo_1, Zo_1, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1, Xo_2, Yo_2, Zo_2, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2, \dots, Xo_n, Yo_n, Zo_n, \omega_n, \varphi_n, \kappa_n$ ) é possível calcular um ponto tridimensional por meio do procedimento denominado Interseção Fotogramétrica a exemplo da figura abaixo.

**Figura 10** – Interseção Fotogramétrica

Fonte: Autor

Para o STMM-BC são realizadas interseções fotogramétricas a partir de três fotografias. O modelo matemático da interseção fotogramétrica são as equações de colinearidade descritas anteriormente (Equações (16) e (17)). Para o problema apresentado, considera-se  $n = 6$  observações,  $(xp_e, yp_e)$  fotografia esquerda,  $(xp_c, yp_c)$  fotografia do centro e  $(xp_d, yp_d)$  para a fotografia da direita, e  $u = 3$  sendo as incógnitas  $(X, Y, Z)$  do espaço objeto. Para gerar as coordenadas tridimensionais de um ponto, referidas ao sistema do espaço-objeto (terreno) pode se usar duas metodologias que serão detalhadas matematicamente a seguir.

### 2.3.2.1 Interseção Fotogramétrica por MMQ

Considerando as formulações do método paramétrico apresentadas na Seção 2.2.2, têm-se o vetor de observações  $Lb$  (Equação 22) com as coordenadas fotogramétricas do ponto desejado para interseção nas três imagens (esquerda(e), centro(c), direita(d)).

$$Lb = \begin{bmatrix} xp_e \text{ coordenada } x \text{ fotogramétricas na imagem } e \\ yp_e \text{ coordenada } y \text{ fotogramétricas na imagem } e \\ xp_c \text{ coordenada } x \text{ fotogramétricas na imagem } c \\ yp_c \text{ coordenada } y \text{ fotogramétricas na imagem } c \\ xp_d \text{ coordenada } x \text{ fotogramétricas na imagem } d \\ yp_d \text{ coordenada } y \text{ fotogramétricas na imagem } d \end{bmatrix} \quad (22)$$

O vetor de parâmetros iniciais  $Xo$  (Equação 23) contém uma aproximação para as incógnitas, ou seja, uma posição aproximada para o ponto desejado.

$$X_o^T = [X_o \ Y_o \ Z_o] \quad (23)$$

A matriz *design* A abaixo representada, possui as derivadas parciais do modelo matemático, que neste procedimento são as equações de colinearidade direta, em função de cada uma das incógnitas (neste caso as coordenadas no espaço-objeto da feição medida). As derivadas parciais desse modelo podem ser encontradas em Wolf, Dewitt e Wilkinson (2014).

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial xp_e}{\partial X_o} & \frac{\partial xp_e}{\partial Y_o} & \frac{\partial xp_e}{\partial Z_o} \\ \frac{\partial yp_e}{\partial X_o} & \frac{\partial yp_e}{\partial Y_o} & \frac{\partial yp_e}{\partial Z_o} \\ \frac{\partial xp_c}{\partial X_o} & \frac{\partial xp_c}{\partial Y_o} & \frac{\partial xp_c}{\partial Z_o} \\ \frac{\partial yp_c}{\partial X_o} & \frac{\partial yp_c}{\partial Y_o} & \frac{\partial yp_c}{\partial Z_o} \\ \frac{\partial xp_d}{\partial X_o} & \frac{\partial xp_d}{\partial Y_o} & \frac{\partial xp_d}{\partial Z_o} \\ \frac{\partial yp_d}{\partial X_o} & \frac{\partial yp_d}{\partial Y_o} & \frac{\partial yp_d}{\partial Z_o} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Concluindo o procedimento, é possível obter o vetor de parâmetros ajustados coordenadas tridimensionais no espaço objeto (Equação (15)) por meio do vetor de correção dos parâmetros (Equação (8)).

### 2.3.2.2 Interseção Fotogramétrica por Fator de Escala

Outro método de se obter coordenadas no espaço objeto é pela interseção fotogramétrica a partir da relação da escala, como será demonstrado.

Para isso são determinados pontos de interesse nas imagens (par-a-par) e por meio dos fatores de escala calcula-se as coordenadas desses pontos no espaço objeto. A obtenção das coordenadas tridimensionais no espaço-objeto é realizada por meio formulações abaixo descritas. O modelo matemático utilizado neste caso, são as equações de colinearidade indireta (Equações (25) e (26)).

$$X = X_o + (Z - Z_o) \begin{bmatrix} r_{11} * x + r_{21} * y - r_{31} * f \\ r_{13} * x + r_{23} * y - r_{33} * f \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \left[ \frac{r_{12} * x + r_{22} * y - r_{32} * f}{r_{13} * x + r_{23} * y - r_{33} * f} \right] \quad (26)$$

Essas equações possuem origem na estruturação apresentada a seguir na Equação 27 e a partir desta é possível separar cada uma das componentes ( $X$ ,  $Y$  e  $Z$ ) e quantificar o fator de escala de cada ponto no terreno ( $\lambda$ ).

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \lambda * \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \quad (27)$$

Primeiramente, determina-se os fatores de escala para um determinado ponto ‘P’ em cada uma das imagens e por meio desses fatores de escala, calcula-se as coordenadas desse ponto ‘P’ no espaço objeto.

Para imagem da esquerda tem-se:

$$X_p^e = X_{CP}^e + \lambda_{Pe} * [r_{11}^e * x_p^e + r_{21}^e * y_p^e + r_{31}^e * -f_1] = X_{CP}^e + \lambda_{Pe} * u_e \quad (28)$$

$$Y_p^e = Y_{CP}^e + \lambda_{Pe} * [r_{12}^e * x_p^e + r_{22}^e * y_p^e + r_{32}^e * -f_1] = Y_{CP}^e + \lambda_{Pe} * v_e \quad (29)$$

$$Z_p^e = Z_{CP}^e + \lambda_{Pe} * [r_{13}^e * x_p^e + r_{23}^e * y_p^e + r_{33}^e * -f_1] = Z_{CP}^e + \lambda_{Pe} * w_e \quad (30)$$

Para imagem do centro tem-se:

$$X_p^c = X_{CP}^c + \lambda_{Pc} * [r_{11}^c * x_p^c + r_{21}^c * y_p^c + r_{31}^c * -f_2] = X_{CP}^c + \lambda_{Pc} * u_c \quad (31)$$

$$Y_p^c = Y_{CP}^c + \lambda_{Pc} * [r_{12}^c * x_p^c + r_{22}^c * y_p^c + r_{32}^c * -f_2] = Y_{CP}^c + \lambda_{Pc} * v_c \quad (32)$$

$$Z_p^c = Z_{CP}^c + \lambda_{Pc} * [r_{13}^c * x_p^c + r_{23}^c * y_p^c + r_{33}^c * -f_2] = Z_{CP}^c + \lambda_{Pc} * w_c \quad (33)$$

Para imagem da direita possui-se:

$$X_p^d = X_{CP}^d + \lambda_{Pd} * [r_{11}^d * x_p^d + r_{21}^d * y_p^d + r_{31}^d * -f_3] = X_{CP}^d + \lambda_{Pd} * u_d \quad (34)$$

$$Y_p^d = Y_{CP}^d + \lambda_{Pd} * [r_{12}^d * x_p^d + r_{22}^d * y_p^d + r_{32}^d * -f_3] = Y_{CP}^d + \lambda_{Pd} * v_d \quad (35)$$

$$Z_P^d = Z_{CP}^d + \lambda_{Pd} * [r_{13}^d * x_p^d + r_{23}^d * y_p^d + r_{33}^d * -f_3] = Z_{CP}^d + \lambda_{Pd} * w_d \quad (36)$$

Onde:

$\lambda_{Pe}$ ,  $\lambda_{Pc}$ ,  $\lambda_{Pd}$  : são os fatores de escalas correspondentes ao ponto  $p$  em cada uma das imagens: esquerda, centro e direita, respectivamente;

$X_{CP}^e, Y_{CP}^e, Z_{CP}^e, X_{CP}^c, Y_{CP}^c, Z_{CP}^c, X_{CP}^d, Y_{CP}^d, Z_{CP}^d$  : são as posições (X, Y, Z) das câmaras da esquerda, centro e direita, respectivamente;

$r^e, r^c, r^d$  : são os valores referentes as matrizes de rotação (18);

$x_p^e, y_p^e, x_p^c, y_p^c, x_p^d, y_p^d$  : são as fotocoordenadas do ponto  $p$  nas fotografias da esquerda, centro e direita, respectivamente;

$f_1, f_2, f_3$ : distância focal calibrada para cada câmara (em caso de uma mesma câmara capturar as 3 imagens  $f_1=f_2=f_3=f$ )

Igualando as equações descritas abaixo, têm-se:

$$X_P^e = X_P^d \Rightarrow X_{CP}^e + \lambda_{Pe} * u_e = X_{CP}^d + \lambda_{Pd} * u_d \quad (37)$$

$$Y_P^e = Y_P^d \Rightarrow Y_{CP}^e + \lambda_{Pe} * v_e = Y_{CP}^d + \lambda_{Pd} * v_d \quad (38)$$

$$X_P^e = X_P^c \Rightarrow X_{CP}^e + \lambda_{Pe} * u_e = X_{CP}^c + \lambda_{Pc} * u_c \quad (39)$$

$$Y_P^e = Y_P^c \Rightarrow Y_{CP}^e + \lambda_{Pe} * v_e = Y_{CP}^c + \lambda_{Pc} * v_c \quad (40)$$

$$X_P^c = X_P^d \Rightarrow X_{CP}^c + \lambda_{Pc} * u_c = X_{CP}^d + \lambda_{Pd} * u_d \quad (41)$$

$$Y_P^c = Y_P^d \Rightarrow Y_{CP}^c + \lambda_{Pc} * v_c = Y_{CP}^d + \lambda_{Pd} * v_d \quad (42)$$

Podemos isolar os valores das Equações de (37) a (42), como demonstrado abaixo:

$$\lambda_{Pd} = \frac{Y_{CP}^e + \lambda_{Pe} * v_e - Y_{CP}^d}{v_d} \quad (43)$$

$$\lambda_{Pc} = \frac{Y_{CP}^e + \lambda_{Pe} * v_e - Y_{CP}^c}{v_c} \quad (44)$$

$$\lambda_{Pe} = \frac{Y_{CP}^c + \lambda_{Pc} * v_c - Y_{CP}^e}{v_e} \quad (45)$$

Substituindo as Equações 43, 44 e 45 nas Equações de (37) a (42), obtêm-se:

$$\lambda_{P_e} = \frac{(Y_{CP}^e - Y_{CP}^d) * u_d + (X_{CP}^d - X_{CP}^e) * v_d}{u_e * v_d - v_e * u_d} \quad (46)$$

$$\lambda_{P_c} = \frac{(Y_{CP}^c - Y_{CP}^e) * u_e + (X_{CP}^e - X_{CP}^c) * v_e}{u_c * v_e - v_c * u_e} \quad (47)$$

$$\lambda_{P_d} = \frac{(Y_{CP}^d - Y_{CP}^c) * u_c + (X_{CP}^c - X_{CP}^d) * v_c}{u_d * v_c - v_d * u_c} \quad (48)$$

Substituindo as Equações 46, 47 e 48 nas respectivas Equações de (28) a (36) de  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , para cada imagem (esquerda, centro e direita), e aplicando a média dos valões obtidos, obtêm-se as coordenadas do ponto desejado no espaço objeto.

### 2.3.3 Calibração de Câmaras

Em Fotogrametria para se obter melhores resultados é necessário o conhecimento da geometria interna da câmara, principalmente para câmaras não métricas como as utilizadas neste trabalho, para posteriormente modelar esses parâmetros matematicamente e obter-se um resultado mais confiável.

A calibração de câmaras é um importante procedimento na Fotogrametria Digital, pois grande parte dos levantamentos e observações fotogramétricas são adquiridas com câmaras não métricas de baixo custo como: GoPro, câmaras digitais Sony, Canon, entre outras. Sendo assim, esse procedimento tem como principal objetivo estimar a geometria interna do sensor, ou seja, obter os POI.

As câmaras não métricas possuem parâmetros instáveis e de baixa estabilidade geométrica, portanto, os erros devem ser modelados e mitigados. Esses erros estão relacionados à distorção e montagem das lentes e podem causar variação de escala das fotografias (MCGLONE, 2004).

Dessa forma, os parâmetros determinados em uma calibração de câmaras são: distância focal calibrada ( $f$ ), deslocamento do ponto principal ( $x_0, y_0$ ), coeficientes de distorção radial simétrica ( $k_0, k_1, k_2, k_3$ ), coeficientes de distorção descentrada ( $P_1, P_2$ ) e parâmetros de afinidade ( $A, B$ ). O certificado de calibração é o documento que contém todos os parâmetros para correção da imagem. Embora no manual da câmara existam valores como distância focal, tamanho do sensor, entre outros, vale ressaltar que para câmaras não métricas, a calibração de câmaras é um passo imprescindível para obtenção de um melhor produto, uma vez que esses equipamentos não possuem alta estabilidade geométrica, tendo assim alterados os POI por

agentes externos como temperatura, pressão, vibração, entre outros. Logo, faz-se necessária uma calibração sistemática da câmara.

As distorções ópticas, causadas pelas lentes de câmara, geram um deslocamento de ponto no espaço da imagem, essas limitações são causadas pelo processo de manufatura e materiais utilizados (GALO e TOMMASELLI, 2011), sendo assim, essas distorções possuem impactos na qualidade da imagem (MCGLONE *et al.*, 2005). A distorções da lente podem ser diferentes para cada ponto na imagem. Em geral, as câmaras digitais apresentam duas distorções principais da lente, a radial e a tangencial (BROWN, 1971).

Segundo Brown (1971), a correção da coordenada da imagem pode ser modelada aplicando-se as seguintes equações abaixo:

$$\Delta x = x + \bar{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) + [p_1(r^2 + 2\bar{x}^2) + 2p_2 \bar{x} \bar{y}] \quad (49)$$

$$\Delta y = y + \bar{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) + [2p_1 \bar{x} \bar{y} + p_2(r^2 + 2\bar{y}^2)] \quad (50)$$

Onde,

$k_i$ : coeficiente de correção da distorção radial simétrica;

$\bar{x}, \bar{y}$ : coordenadas do ponto considerando a origem no ponto principal;

$p_1, p_2$ : coeficientes de distorção descentrada;

$r$ : distância entre o ponto medido e o ponto principal dado pelas equações  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ .

$$\bar{x} = x - xp \quad (51)$$

$$\bar{y} = y - yp \quad (52)$$

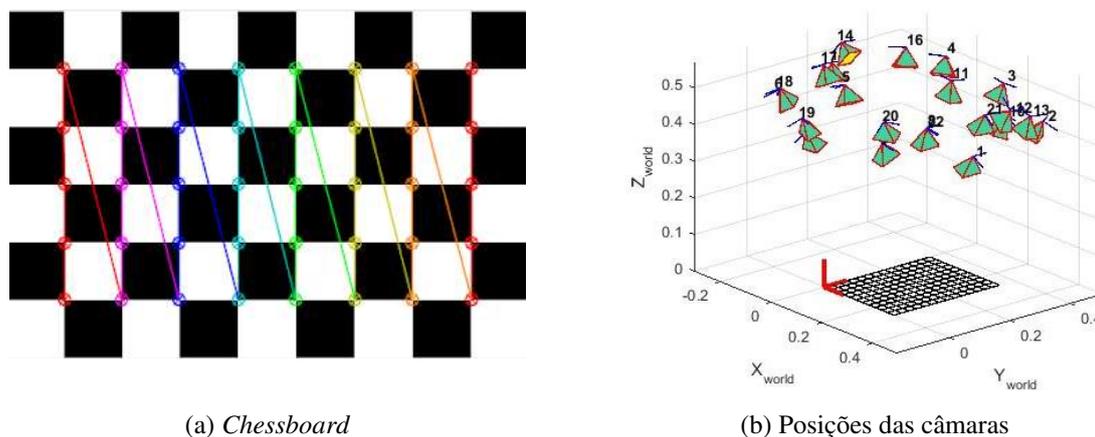
$$r = [(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2]^{1/2} \quad (53)$$

Atualmente, existem métodos eficazes para calibração de câmaras, as metodologias mais conhecidas são as que utilizam pontos de controle do solo. Este procedimento é chamado de Fototriangulação com parâmetros adicionais (RUY *et al.*, 2008). Para esse método é necessário que os pontos de controle para a calibração sejam distribuídos por toda imagem.

Outra abordagem de calibração de câmaras utiliza-se da visão computacional, na qual geralmente são utilizados padrões retangulares repetitivos com dimensões conhecidas, comumente chamados de “*chessboard*” (Figura 11(a)). Essa metodologia é descrita por Zheng

(2000) e Remondino e Fraser (2006). Ambos os procedimentos utilizam um arranjo de câmaras convergente (Figura 11(b)). De acordo com Luhmann, Fraser e Maas (2016), neste arranjo de câmaras, as redes de imagem convergentes incorporam uma diversidade de ângulos da câmara e orientações em formato retrato e paisagem mistos com zoom fixo, foco e configurações sem mudança de lente ou ajuste da câmara durante a aquisição da imagem.

**Figura 11** – Exemplificação da calibração de câmaras utilizando “chessboard”



Fonte: Autor

Os *software* de código aberto para procedimentos como calibração de câmara baseada em visão computacional tem se popularizado ultimamente devido à facilidade de manuseio e bons resultados (LUHMANN, FRASER e MAAS, 2016; GARCIA *et al.*, 2020).

Uma alternativa para calibrar câmaras usando essa metodologia é a biblioteca OpenCV (*Open Source Computer Vision Library*) que é uma biblioteca programável de código aberto para visão computacional que foi utilizada neste trabalho. Essa foi a abordagem utilizada nesse trabalho para modelagem dos erros sistemáticos da câmara GoPro utilizada no STMM-BC que possui uma lente do modelo *fisheye*. Os modelos matemáticos desse procedimento podem ser encontrados em Kühling (2017) e Lukic (2019).

### 2.3.4 Fototriangulação

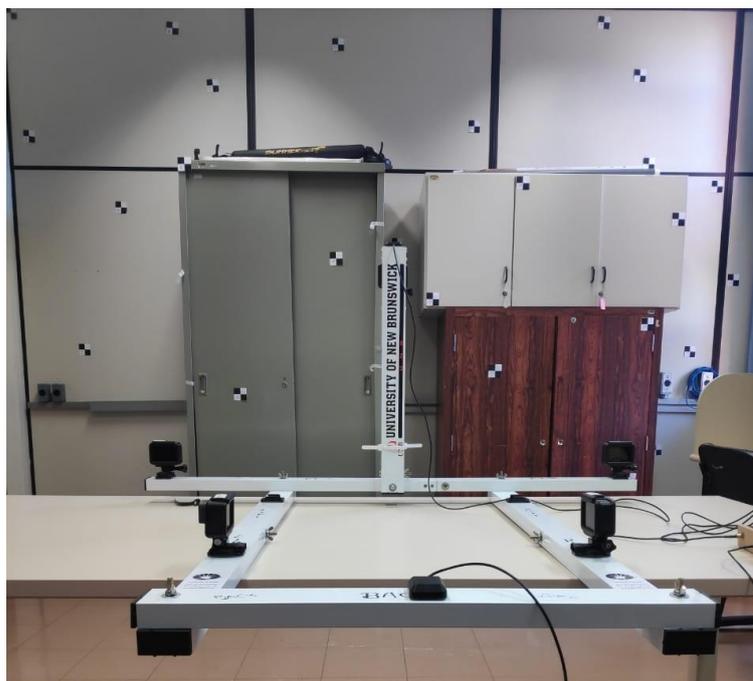
O procedimento chamado Fototriangulação, de acordo com Mikhail, Bethel e Mcglone (2001), é uma técnica de cálculo e ajustamento das observações feitas nas imagens, das posições e atitudes do sensor no momento da aquisição de cada uma das imagens fotográficas que compõem um bloco fotogramétrico, que possibilita a obtenção de coordenadas tridimensionais no espaço objeto (terreno) a partir do espaço imagem (fotografia), podendo ou não utilizar georreferenciamento direto. A técnica de Fototriangulação pode ser realizada de

diferentes maneiras, duas delas são: método dos modelos independentes, que utiliza um modelo que trata das áreas com superposição longitudinal entre duas fotografias consecutivas (par-a-par). Já outro modelo é o método de ajustamento por feixes perspectivos, conhecido também como *bundle block adjustment*. Esse tipo de ajustamento é caracterizado pelo ajuste de todas as imagens fotográficas do bloco fotogramétrico que compõem o espaço imagem e têm suas coordenadas dos respectivos CPs, os ângulos de atitude bem como as coordenadas de pontos no espaço objeto ajustados de forma simultânea.

A Fototriangulação tem como modelo matemático as equações de colinearidade (Equações 16 e 17). Neste trabalho não foi implementado o modelo matemático da Fototriangulação para se obter os POEs, porém essa técnica pode ser utilizada na calibração do sistema para obtenção dos mesmos, ao invés de se determinar câmara a câmara de forma independente com a resseção espacial. De forma geral, a matriz *Design* terá um número maior de colunas que trará todas as incógnitas - POE de todas as imagens e coordenadas 3D de todos os pontos que se pretende conhecer. Isso faz com que seja necessário um maior número de observações (medidas de pontos nas imagens) para que haja redundância no procedimento. Tal redundância pode ser facilmente obtida devido à sobreposição entre imagens (longitudinal e lateral) e por processos de correspondências de imagens – comum atualmente em procedimentos computacionais. Detalhes matemáticos dessa técnica podem ser encontrado em Wolf, Dewitt e Wilkinson (2014), Coelho e Brito (2007) e Förstner e Wrobel (2016).

### **2.3.5 Calibração do Sistema**

A calibração do sistema é um procedimento necessário para se obter as variações angulares e a distância relativa entre as câmaras. A calibração do STMM-BC pode ser realizada de duas maneiras. A primeira é com um *software* desenvolvido na UNICAMP que executa uma resseção espacial pelo MMQ conforme descrito na Seção (2.3.1). Outra possibilidade é a Fototriangulação (Seção (2.3.4)), para execução desse procedimento é necessário um *software* de Fotogrametria tais como, Inpho, *Leica Photogrammetry Suite (LPS)*, *Pix4d*, *Photoscan*, *E-foto*, entre outros. Com a finalidade de execução dessa tarefa, foi desenvolvido um campo de calibração no LCD conforme apresentado na Figura 12. Para a montagem do campo de calibração foram impressos alvos na qual foram dispostos de forma a ter variações de profundidade. Após a implantação dos alvos foi realizada a aquisição das coordenadas tridimensionais com auxílio de uma Estação Total.

**Figura 12** – Campo de Calibração

Fonte: Autor

Como resultado deste procedimento é possível obter-se os deslocamentos lineares  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  e os  $\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa$  angulares entre cada uma das câmaras. Esse procedimento é fundamental para que as interseções possuam um bom resultado.

## 2.4 Sistemas Terrestre de Mapeamento Móvel

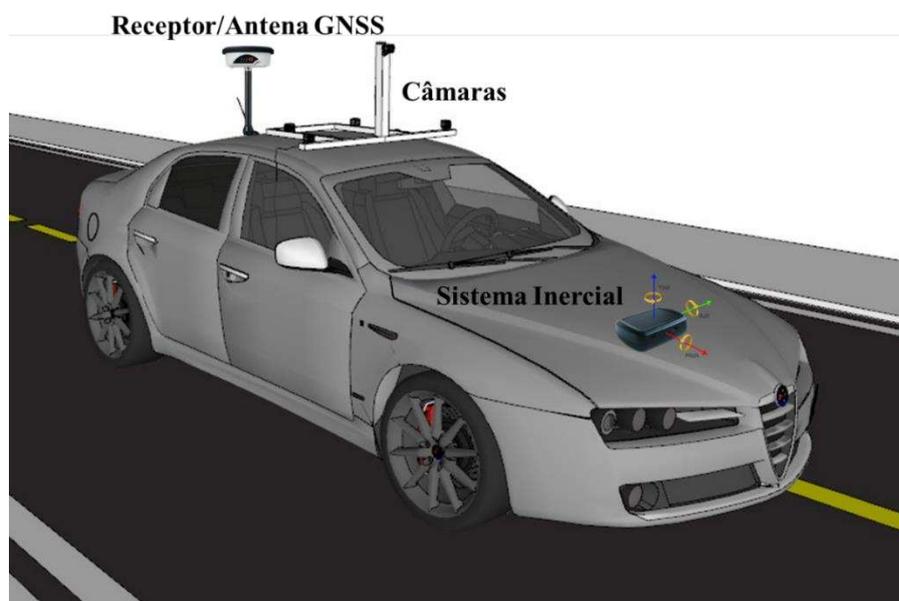
Segundo Silva *et al.* (2012), Taglioretti e Manzino (2014), um STMM pode ser construído em diversas configurações de sensores. A concepção de um STMM é caracterizada por uma plataforma móvel, receptor(es) e antena(s) GNSS, sistema de navegação inercial, câmaras digitais e/ou sistemas de varredura à LASER. Poderá haver também sensores auxiliares como: hodômetro, barômetro, entre outros. Os sensores utilizados para a composição do STMM dependem da aplicação, advertindo que a performance do sensor está completamente relacionada com sua estabilidade geométrica e seus respectivos custos. Atualmente com a combinação de sensores, o georreferenciamento direto de uma sequência de imagens digitais é realizada pela navegação inercial (INS) e posicionamento (GNSS).

Diferentes sensores de posicionamento, receptor/antena GNSS e INS podem ser combinados para o processamento de dados, visando melhorar a precisão e robustez do georreferenciamento direto, na maioria dos casos é realizado a integração INS/GNSS como apresentado na Seção (2.1.3).

O controle de solo necessário para o mapeamento tradicional é eliminado nos STMM. Os sistemas podem alcançar coordenadas tridimensionais com precisão centimétrica e, outra vantagem dos STMM é a possibilidade de conexão direta de dados para um banco de dados geoespacial. As informações geométricas e de atributos coletadas podem ser usadas diretamente para construir e atualizar estes bancos de dados. Com o avanço das telecomunicações, computação gráfica, compactação de imagem e a possível conexão de dados em tempo real por tecnologias como, *bluetooth e wifi* e redes de computadores, portanto com um STMM é possível a criação de um banco de dados georreferenciado praticamente em tempo real (TAO, 2000; ELLUM e EL-SHEIMY, 2002).

Os STMM tiveram início com o embarque e integração de sensores de posicionamento e orientação, associados a vídeo-câmaras digitais. Hoje, os STMM em sua grande maioria são constituídos por sistema de posicionamento GNSS, INS, câmaras digitais e também podem contar com um sistema de varredura à LASER. Um exemplo genérico de um STMM é mostrado na figura abaixo.

**Figura 13** – Ilustração genérica de um STMM.



Fonte: Autor

Atualmente, existem STMM comerciais considerados de alto custo, como os sistemas como os da empresa SITECO fabricante do FARO ou o IP-S3 da companhia TOPCON (Figura 14).

**Figura 14** – Ilustração de IP-S3 TOPCON.



Fonte: < <https://www.topconpositioning.com/br/mass-data-and-volume-collection/mobile-mapping/ip-s3>>

Acesso em: 21/03/2021

O STMM IP-S3 é capaz de gerar nuvens de pontos de alta densidade e alta precisão combinado com panoramas de alta resolução de acordo com seu fabricante. O sistema de posicionamento do IP-S3 é uma integração de um sistema de medição inercial (INS), receptores GNSS e um hodômetro externo no veículo. O Sistema de Varredura à Laser (SVL) rotativo que captura dados com uma frequência de 700 kHz e durante cada rotação, os 32 lasers internos cobrem os 360° graus ao redor do sistema, cada um de um ângulo de visão ligeiramente diferente, possuindo assim uma enormidade de dados aos usuários.

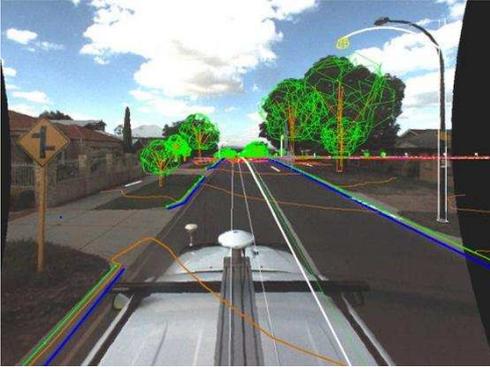
Um STMM comercial pode variar de R\$70.000,00 a R\$1.000.000,00 de acordo com a qualidade e estabilidade geométrica dos sensores envolvidos no sistema, alguns desses sistemas são desenvolvidos por marcas referências na área de medições, tais como o MX8 - TRIMBLE, IP-S2 – TOPCON, VMX-250 – RIEGL. Para detalhes e estudos referente a qualidade das observações tomadas por alguns STMM comerciais, pode-se conferir o trabalho de Puente *et al.* (2013), onde são revisados alguns dos STMM disponíveis no mercado.

Já um sistema considerado de baixo custo a depender dos sensores envolvidos pode custar de R\$12.000,00 à R\$ 30.000,00. A estimativa de gastos envolvidos nos processos e nos sensores utilizados no STMM deste trabalho foi de aproximadamente R\$15.000,00.

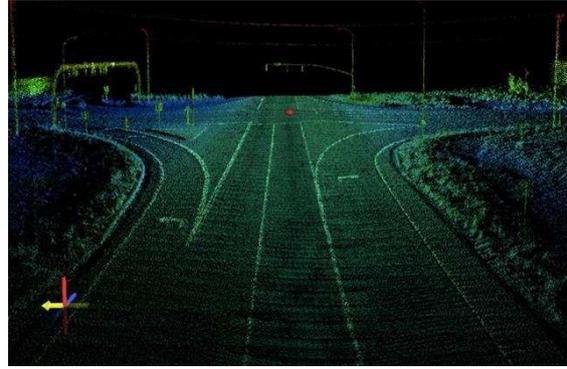
São exemplos de produtos gerados por STMM: nuvem de pontos obtida por procedimentos fotogramétricos, a criação de curvas de nível (Figura 15 (a)) e nuvem de pontos gerada por SVL (Figuras 15 (b)).

**Figura 15** – Produtos gerados por meio de dados obtidos por STMM.

(a)



(b)



Fonte: (a) <https://www.landsurveys.net.au>. (b) <https://www.spar3d.com/>

Vale ressaltar que a escolha de um STMM deve ser realizada em função de sua aplicação, precisão demandada e requisitada pelo projeto.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção serão apresentados os materiais e os métodos utilizados nesse trabalho de pesquisa, com a finalidade de demonstração e entendimento da metodologia executada.

#### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados nessa dissertação serão detalhados nessa seção e divididos em *hardware* e *software*. Tanto os equipamentos utilizados na construção do STMM-BC bem como os instrumentos utilizados para os experimentos de comparação serão descritos.

##### 3.1.1 Hardware

Esta seção apresentará o conjunto de equipamentos utilizados neste trabalho para coleta e processamento dos dados.

A aquisição das imagens foi feita utilizando um conjunto de 5 GoPro Hero5 Black (Figura 16 (a)) que pode capturar vídeos a 60 frames por segundo, onde cada imagem possui uma resolução de 4000x3000 pixels. Algumas outras características dessa câmara são apresentadas no (Quadro1):

**Quadro 1** – Especificações da Câmara

Resolução máxima	4000 x 3000
Pixels efetivos	12 megapixels
Tamanho do Sensor	1/2.3" (6.17 x 4.55 mm)
Tipo do Sensor	CMOS
Dimensões	62 x 45 x 33 mm

O receptor GPS usado foi um *Navspark Raw* (Figura 16(b)) de simples frequência (L1) que utiliza a constelação GPS coletando dados em uma taxa de atualização que pode ser definida entre 1 e 20 Hz. Este receptor permite salvar observáveis (pseudodistâncias a partir do código C/A e fase de batimento da onda portadora) para pós-processamento. Esse receptor foi testado e pode atingir precisão de 0,39cm em planimetria e 0,51cm em altimetria em modo cinemático via pós-processamento conforme descrito por Fernandes, Oliveira e Garcia (2018). Para esse STMM serão utilizados dois receptores para se ter uma redundância no sistema de posicionamento da plataforma.

O *Raspberry Pi 3* (Figura 16(c)) é um microcontrolador de placa única da marca *Raspberry Pi Foundation*. Nesta versão, ele possui um processador ARM quad-core de 1,2 GHz e 64 bits e uma placa de rede sem fio (*wifi*) 802.11n, Bluetooth 4.1 de baixo consumo energético, bem como a possibilidade de gravação de arquivos em cartões de memória. Neste trabalho foi utilizado para coletar e armazenar os dados dos receptores GPS.

O controle remoto (Figura 16(d)) foi utilizado para o sincronismo relativo entre as câmaras, ou seja, garantindo início e fim da captura de imagens de maneira simultânea. Abaixo seguem exemplos dos *hardware* que compõem o STMM-BC.

**Figura 16** - (a) câmara não-métrica (GoPro® HERO 5), (b) receptor(es) GNSS (NavSpark RAW), (c) plataforma eletrônica de prototipagem *open-source* (Raspberry – PI 3B) (d) Controle utilizado para sincronismo das câmaras.



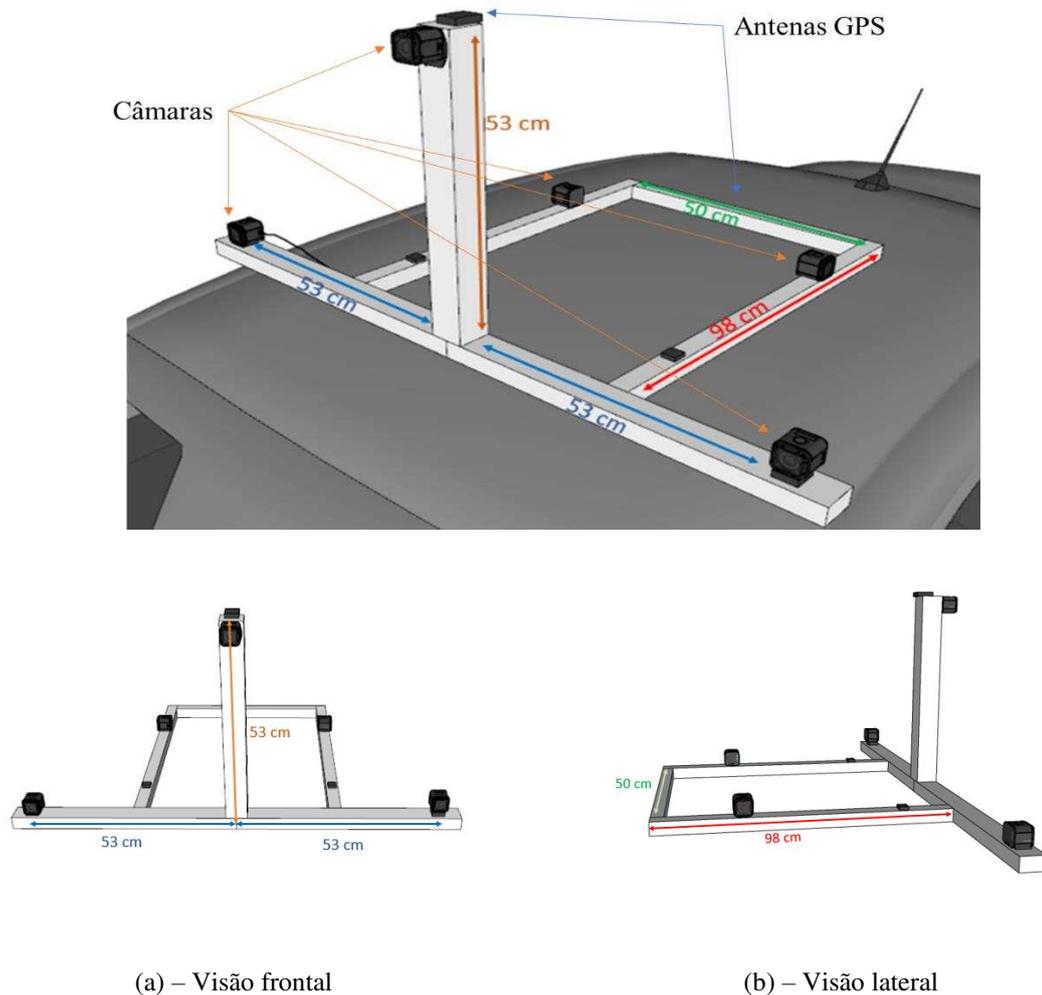
Fonte: Autor

Para a comparação entre os sistemas de baixo e alto custo foi utilizado também um receptor de dupla frequência (L1/L2) *Hyper+* da marca Topcon.

Para o funcionamento do STMM-BC as 5 câmaras GoPro® HERO 5 (Figura 16(a)) foram usadas na seguinte disposição: As três câmaras frontais, conforme apresentado na Figura 17, foram utilizadas para estereoscopia e medições, enquanto as duas câmaras laterais serão para registro cadastral (uso futuro), e poderão ser utilizadas para geração de nuvem de pontos da área mapeada. O microcontrolador *Raspberry – PI 3B* terá a função de sincronismo e armazenamento de dados dos receptores GNSS envolvidos no STMM, esse equipamento permanecerá dentro do veículo que transporta a plataforma. Já os receptores GPS *Navspark Raw*, fornecem o posicionamento da plataforma.

A plataforma em que as câmaras e antenas GNSS são acoplados é feita de alumínio e possui fácil conexão e montagem. As dimensões da plataforma serão descritas na figura abaixo.

**Figura 17** – Medidas e disposição dos sensores na plataforma.



Para o processamento e análise dos dados foram utilizados um Laptop Lenovo ThinkPad X250, bem como um computador Dell Intel i3 com 4gb de memória e Hd de 500gb, para auxílio e desenvolvimento do *software* de processamento.

### 3.1.2 Software

Foram utilizados os sistemas operacionais *Microsoft Windows 10* e *Linux Ubuntu 4.2.2*. Os programas utilizados para processamento e análise dos dados são: *Excel*, *QGIS*, bem como os códigos desenvolvidos pelo autor para processamento fotogramétrico. A linguagem de programação utilizada foi *Python*, em conjunto com as bibliotecas *Opencv* e *RtkLib*. O *Python* foi usado para implementação da resseção e interseção espacial por meio do MMQ e fator de escala, respectivamente. Já a *Opencv*, teve como função auxiliar a manipulação das imagens e

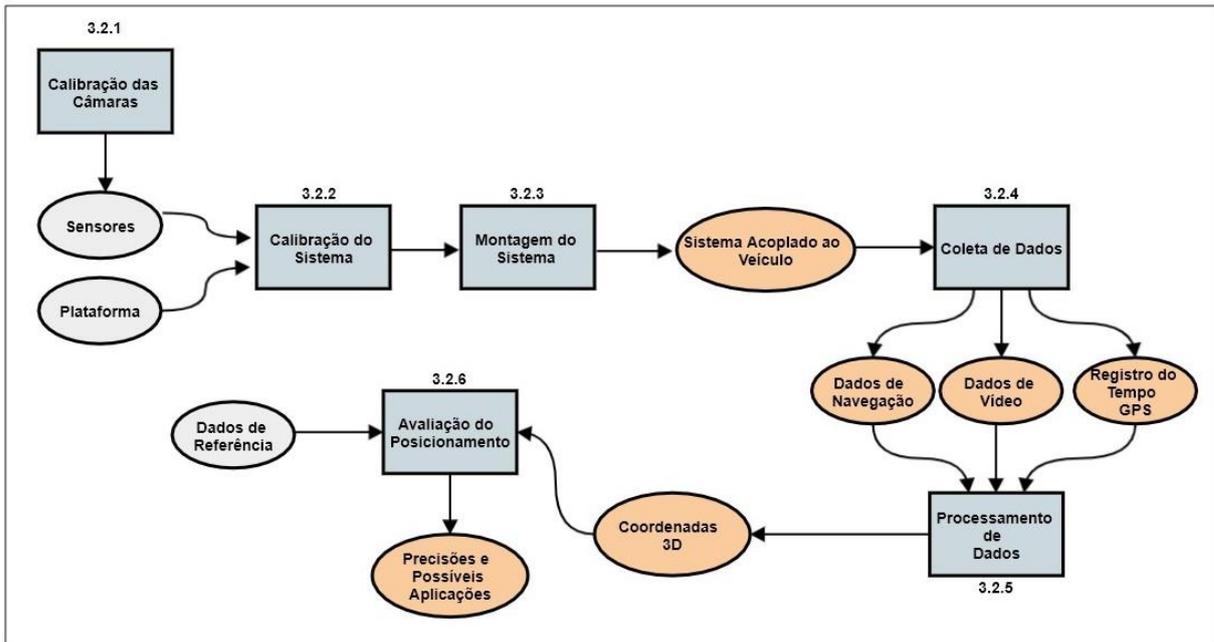
transformações fotogramétricas, assim como a obtenção dos POI dada pela calibração das câmaras. Para o pós-processamento dos dados GNSS foi utilizada a biblioteca *RtkLib*.

### **3.2 Método**

Esse tópico descreve o método que foi utilizado para avaliação do STMM-BC. Primeiramente, é executada a validação dos equipamentos no intuito da verificação dos erros referentes a cada sensor do STMM-BC. Logo após, é realizada a calibração do sistema por Fototriangulação (ou Recessão Espacial) com o objetivo da determinação da posição e orientação relativa dos sensores. Em seguida, foi executada o sincronismo dos sensores por método baseado no tempo GPS. Em posse dos dados sincronizados foi possível a execução do levantamento para captação de coordenadas (E, N e H) por interseção fotogramétrica.

O método apresentado nesta pesquisa pode ser entendido pelo (Fluxograma 1). Basicamente, os sensores montados em uma plataforma são embarcados em um veículo. O conjunto de dados obtido é composto por dados de navegação, vídeos e um registro do relógio GPS para sincronização do sistema. Conhecendo esses elementos, é possível processar os dados via processamento fotogramétrico e obter informações tridimensionais das cenas. Como o objetivo principal deste trabalho é desenvolver e avaliar um STMM-BC, a informação tridimensional obtida foi então comparada a um valor de referência obtido por um método de levantamento de tradicional, a aerofotogrametria e por fim foram determinadas possíveis aplicações em transporte.

Fluxograma 1– Apresentação de todos os métodos executados



Fonte: Autor

### 3.2.1 Calibração das Câmaras

O primeiro procedimento é a calibração das câmaras e para isso são tomados vídeos de um padrão *chessboard*, utilizando-se do método das câmaras convergentes explicado na Seção (2.3.3). É necessário repetir o procedimento para as 3 câmaras frontais que fazem parte do processo de obtenção de coordenadas, pois pode haver diferença entre as distorções envolvidas em cada câmara. Os vídeos devem ser gravados em uma configuração pré-definida que é mantida nos processos posteriores tais como, calibração do sistema e coleta de dados.

Nas câmaras em questão, GoPro® HERO 5 existem algumas configurações padrões relacionada ao campo de visão, sendo elas: *narrow*, *linear*, *medium*, *wide* e *super wide*. Sendo assim, as configurações possuem diferentes distâncias focais justificando o uso da mesma configuração por todo procedimento. Existem também a configuração de quantidade de pixel por quadro que pode variar de 1920 x 1080 até 4000 x 3000 pixels por quadro. Neste trabalho os levantamentos dos dados foram realizados com a configuração *linear* por ser uma configuração média em relação ao campo de visão e que praticamente não possui os efeitos causados pelas lentes *fisheye* de acordo com o manual de instruções da câmara. E resolução do quadro de 1920 x 1080. Abaixo (Quadro (2)), seguem as configurações utilizadas na coleta de dados com STMM-BC.

Caso o usuário desejar poderá ser utilizadas outras configurações seguindo o mesmo procedimento, uma vez que a saída da calibração são os POI. Um fator fundamental é manter a configuração durante toda coleta de dados.

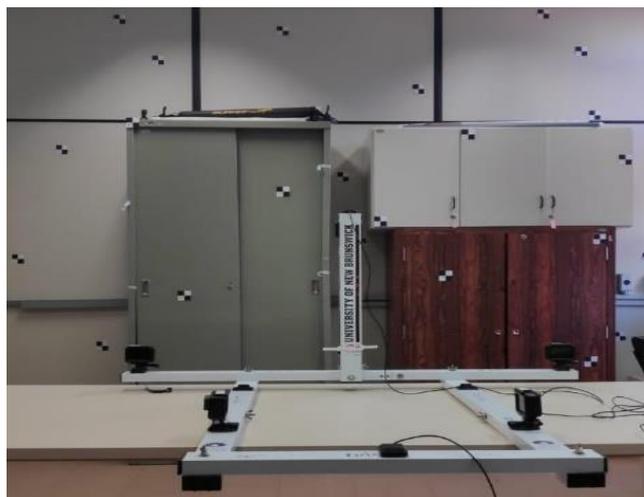
**Quadro 2** – Configuração Câmaras

Resolução	FPS	FOV
1920x1080	60	Linear

O procedimento de aquisição dos vídeos se dá pela gravação do *chessboard* em diferentes angulações e posições (retrato/paisagem), essa gravação pode ter duração de aproximadamente um minuto. Após a gravação do vídeo é realizado o processamento em um computador, onde é iniciado um algoritmo baseado em visão computacional que reproduzirá o vídeo. O usuário seleciona os *frames* a serem processados para calibração da câmara. São necessários em média quinze *frames* para que sejam calculados os parâmetros de maneira adequada. Esses valores do POI são salvos em um documento de texto que é utilizado posteriormente para a calibração do sistema e interseção fotogramétrica.

### 3.2.2 Calibração do Sistema

A calibração do sistema é o procedimento que fornece os deslocamentos lineares e angulares relativos da plataforma. Para isso um campo de calibração (Figura 18) foi criado para essa finalidade.

**Figura 18** – Campo de Calibração.

(a) Imagem da esquerda



(b) Imagem do centro



(c) Imagem da direita

Fonte: Autor

As coordenadas do campo de calibração são conhecidas e foram obtidas com estação total e os alvos estão distribuídos em uma localidade do laboratório na disposição tridimensional. Com a plataforma disposta em frente ao campo de calibração (Figura 18), imagens são tomadas de maneira simultânea pelas três câmaras frontais (Figura 18(a)(b)(c)).

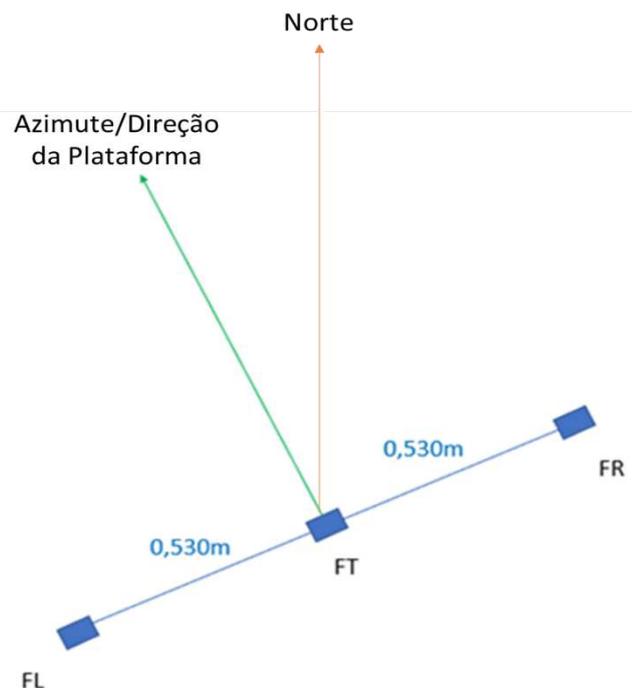
Em posse das fotografias é possível proceder para o processamento dessa informação. Isso pode ser feito por meio de uma Fototriangulação com auxílio de *software* comerciais, tais como *Photoscan* ou *Pix4d*. Ou também é possível calibrar o sistema por meio da Ressecção Espacial. Para a realização da calibração do sistema por intermédio da ressecção espacial é necessário a aquisição da coluna e linha em milímetros de cada alvo em cada fotografia (Figura 18(a)(b)(c)). Ambos os procedimentos tem como resultado os POE, porém a Fototriangulação realizada por *software* comercial é um procedimento mais robusto, pois ele realiza a correlação entre as feições presentes nas imagens possibilitando assim um maior número de observações e um melhor ajuste.

### 3.2.3 Montagem do Sistema

O sistema é composto por três câmaras frontais para fins de medição e duas câmaras laterais para fins cadastrais. Para as medições das feições que é o objetivo deste estudo, não são necessárias as 2 câmaras laterais. Além disso, uma antena/receptor GPS é colocada no topo da plataforma para obter a posição do CP da câmara central. Como saída do procedimento anterior, a calibração do sistema, têm-se os deslocamentos lineares ( $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ ) e angulares ( $\Delta \omega, \Delta \varphi, \Delta k$ ) em relação à câmara central. Os azimutes são calculados em função das coordenadas sequenciais da trajetória dadas pelo receptor GPS (Figura 19).

A partir disso é possível calcular os POE para todos os frames utilizando as equações apresentadas a seguir.

**Figura 19** – Disposição das Câmaras.



Fonte: Autor

Os valores de 0,530m devem ser calculados em função dos deslocamentos relativos oriundos do processo de calibração do sistema (Seção (3.2.2)). Os cálculos a serem executados para obtenção das posições das câmaras da direita e esquerda são:

Para câmara da direita:

$$FRx = CoordenadaFTx + \text{sen}(\text{Azimunte} + 90) * 0,530 \quad (54)$$

$$FRy = CoordenadaFTy + \text{cos}(\text{Azimunte} + 90) * 0,530 \quad (55)$$

$$FRz = CoordenadaFTz - 0,530 \quad (56)$$

Para câmara da esquerda:

$$FLx = CoordenadaFTx + \text{sen}(\text{Azimunte} - 90) * 0,530 \quad (57)$$

$$FLy = CoordenadaFTy + \text{cos}(\text{Azimunte} - 90) * 0,530 \quad (58)$$

$$FLz = CoordenadaFTz - 0,530 \quad (59)$$

A partir de uma posição GPS mais o azimute e os parâmetros de calibração do sistema, é possível determinar os POE de cada câmara.

### 3.2.4 Coleta de Dados

Primeiramente, antes de iniciar a coleta de dados, é aconselhável que o veículo permaneça na mesma posição por cerca de 20 minutos em uma localização sem obstruções laterais ou superiores (“céu aberto”) a fim de resolver possíveis inconsistências que o receptor GPS de baixo custo pode possuir, tais como número de satélites observados - conforme descrito por Madeira (2012).

Logo após, é realizada uma importante tarefa na configuração inicial do STMM-BC que é a sincronização entre sensores. Essa integração pode ser realizada de diferentes maneiras. A simultaneidade de coleta de dados entre as 5 câmaras é chamada de (sincronização relativa) e foi realizada nesse caso por meio de um controle remoto da fabricante da câmara. Com esse equipamento as câmaras são ligadas de maneira simultânea, sendo assim as câmaras possuem o mesmo sistema de tempo entre si, porém ainda não estão sincronizadas com os outros sensores do STMM-BC. O conjunto de dados de vídeos precisa estar relacionado também com outros sensores, como receptores GPS. Como dito por Madeira (2014) o sistema de tempo mais preciso em um STMM é o do GPS, sendo assim o ideal é realizar a sincronização por esse sistema de tempo.

Para isso após as câmaras e receptor GPS ligados, foi colocado no visor no celular um relógio que informa o tempo GPS na casa do milésimo de segundo em uma das câmaras do sistema sendo essa informação gravada. Como esses dados registrados é possível realizar a

sincronização do sistema via pós-processamento. O nome dado para a integração no mesmo sistema de tempo, neste caso tempo GPS é a sincronização absoluta (OLIVEIRA, *et al.*, 2019).

Com câmaras, receptores GPS e microcontroladora ligados, inicia-se a coleta, para isso é recomendada que a velocidade do veículo trafegue com velocidade em torno de 20-30 km/h, pois, quando se eleva a velocidade, há a perda de precisão no resultado final como pode ser visto em Silva, Camargo e Gallis (2003) um dos trabalhos relacionado no estado da arte. O sistema de imagem grava vídeos a 60fps e o receptor GPS coleta dados de posição a uma taxa de 1Hz. Os vídeos são armazenados em um cartão SD em cada câmara no formato .mp4, enquanto os dados brutos do receptor GPS são armazenados no microcontrolador (*Raspberry Pi*). Todos os conjuntos de dados são utilizados na etapa de pós-processamento que será explicada a seguir.

### 3.2.5 Processamento de Dados

O processamento dos dados é a etapa onde todas as informações são integradas para possibilitar os processamentos fotogramétricos. O primeiro passo é a inserção de todos os dados para a um computador, após isso, é realizada a sincronização dos vídeos com receptor GPS proporcionando que os dados da câmara e GPS estejam em um mesmo sistema de tempo. Esse procedimento é realizado por meio do corte do vídeo no tempo GPS desejado - inteiro. Para isso é utilizada uma biblioteca em Python chamada FFmpeg que permite o corte dos vídeos no mesmo instante e com precisão no milissegundo. Sendo assim, sabe-se o tempo GPS no instante “zero” dos vídeos.

Após sincronizados, câmaras e GPS, os vídeos são então manipulados para fornecer quadros com a mesma taxa de coleta do receptor GPS (1 segundo), para isso é utilizado um comando em *LINUX UBUNTU* que viabiliza essa atividade, ou seja, o comando possibilita captar quadros a cada segundo nos vídeos.

A próxima etapa é processar as observações do receptor GPS utilizando o método de posicionamento relativo, usando uma rede de apoio GNSS de monitoramento ativo, como a RBMC do IBGE, com auxílio da biblioteca *RTKlib*.

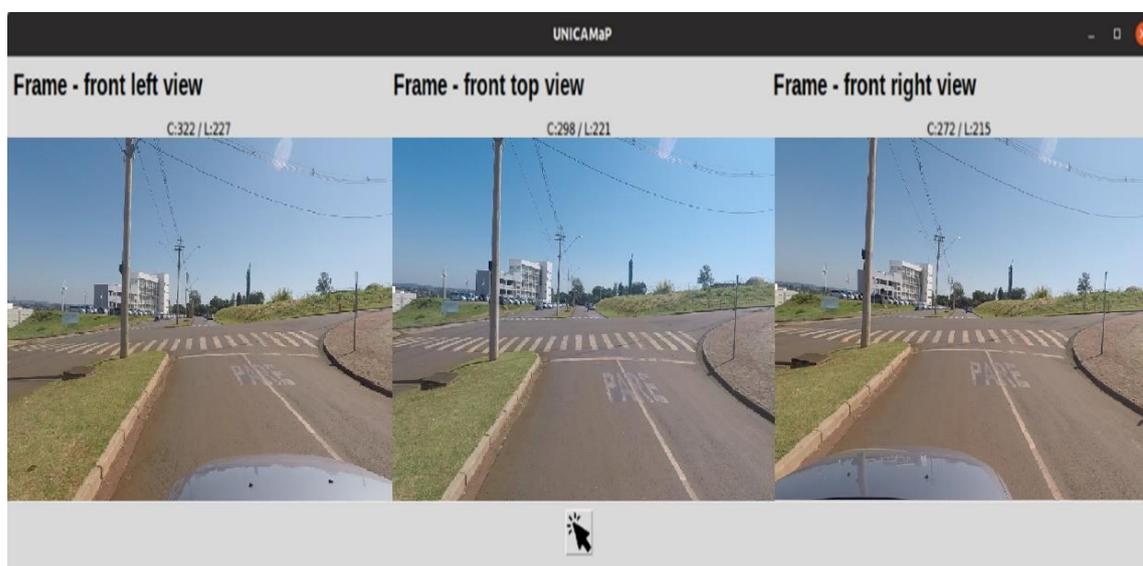
Logo após, em posse dos dados do posicionamento (E, N, H) que se refere ao CP da câmara central, executa-se o cálculo dos azimutes. Para essa tarefa são calculados os azimutes com base nas posições consecutivas fornecidas pelo GPS – trajetória do veículo. Após a obtenção dos azimutes, o CP das câmaras esquerda e direita podem ser calculados conforme demonstrado na Seção 3.2.3. O pacote de *software* desenvolvidos para o pós-processamento é composto pelos seguintes procedimentos: Preparação dos dados de POE, calibração de câmara,

remoção das distorções das imagens, calibração do sistema por ressecção espacial, e interseção espacial pelo método do fator de escala, todos esses códigos foram desenvolvidos neste trabalho.

A calibração das câmaras é feita pelo método baseado nas câmaras convergentes (Figura 11(b)) com a finalidade de obtenção dos POI como descrito na Seção 2.3.3. Para isso em cada câmara foram adquiridas fotografias em diferentes posições e angulações de padrões retangulares. Essas imagens serão obtidas usando cada uma das 5 câmaras para o conhecimento da geometria interna de cada uma delas. Sendo assim, é possível a aplicação da correção dos erros sistemáticos de cada sensor nos respectivos vídeos/frames.

A aquisição dos dados pelas câmaras seguirá o princípio da Fotogrametria atendendo uma geometria que garanta a estereoscopia. Portanto, tem-se coordenadas fotogramétricas (espaço-imagem), de três pontos de vistas distintos, que serão transformadas em coordenadas no espaço-objeto, por meio de um procedimento denominado Interseção Fotogramétrica, conforme descrito na Seção 2.3.2. O *software* desenvolvido tem uma função que conta com o congelamento de quadros no momento da aquisição das imagens em pontos de vista distintos observando a mesma área. Logo após obter o quadro desejado, é possível selecionar a feição de interesse nas 3 imagens. Após, converte-se a coordenada de tela para sistema fotogramétrico. Em posse das coordenadas fotogramétricas, dos POEs e POIs das 3 câmaras é possível aplicar a Interseção Fotogramétrica. O resultado do *software* de Interseção é uma lista de coordenadas tridimensionais (E, N, H) que são salvas em formato .csv. Abaixo segue um exemplo de visualização do *software* chamado UNICAMaP (Figura 20).

Figura 20 –UNICAMaP



Fonte: Autor

### 3.2.6 Avaliação Posicional

O controle de qualidade foi executado por meio de uma comparação entre dois métodos de obtenção de coordenadas tridimensionais. Todas as feições medidas com o STMM-BC desenvolvido foram então comparadas com medições feitas em ortofotos e MDTs gerados por um mapeamento aéreo utilizando um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) na escala 1:500, com RMSE planimétrico de 0,027 m e RMSE altimétrico de 0,033 m respectivamente, indicando um produto de alta precisão classificado com conceito A no Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) como descrito no trabalho realizado por Garcia e Oliveira (2020). Considera-se suficiente tal produto para fins de comparação, visto que o sistema de posicionamento utilizado no sistema desenvolvido, possui uma precisão planimétrica de 0,39 cm e altimétrica de 0,51 cm, como destacado na Seção 3.1.1. Portanto, a referência certamente possui uma qualidade superior aos resultados.

A avaliação da qualidade foi feita por intermédio da comparação entre as coordenadas obtidas por mapeamento aéreo e as coordenadas extraídas com o STMM-BC. A maioria das feições utilizadas para a coleta de dados das coordenadas foram as sinalizações verticais (bases dos postes de placas), horizontais (sinalizações no solo), assim como os postes de distribuição de energia. O controle de qualidade foi essencial para esse trabalho, pois permitiu a definição das possíveis aplicações para esse STMM-BC, a serem apresentadas no final da seção seguinte.

Para as comparações foram realizadas duas análises estatísticas, as médias de erros planimétricos (Equação 60), altimétricos (Equação 61) e desvio-padrão (Equação 62) das observações.

$$\text{Média do erro planimétrico} = \frac{\sum \sqrt{\text{Erro}_{x_i}^2 + \text{Erro}_{y_i}^2}}{n} \quad (60)$$

$$\text{Média do erro altimétrico} = \frac{\sum \text{Erro}_{z_i}}{n} \quad (61)$$

Para Dalmolin (2010), o desvio padrão é uma medida que representa o grau de dispersão de um conjunto de dados. Sendo assim, o desvio padrão indica o quanto um agrupamento de observações é uniforme. Quanto mais próximo de zero for o resultado do

desvio padrão, mais homogêneo é o grupo de dados – mais confiável. A fórmula que descreve o desvio padrão é demonstrada abaixo em.

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (xi - MA)^2}{n}} \quad (62)$$

Onde:

$xi$ : é o valor na posição  $i$  no conjunto de dados;

$MA$ : média aritmética dos dados;

$n$ : quantidade de dados no conjunto.

As medidas realizadas nas validações dos dados forneceram resultados que auxiliaram nas definições de aplicação para o STMM-BC.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises foram feitas com o objetivo de averiguar a qualidade das medições tridimensionais realizadas pelo STMM-BC. Um total de 60 pontos foram extraídos a partir de uma ortofoto de alta precisão para a avaliação de qualidade das coordenadas obtidas pelo sistema conforme a Figura 21. Foram realizadas coletas de dados em diferentes configurações e dias, porém as localizações geográficas das feições mapeadas foram as mesmas (Figura 21).

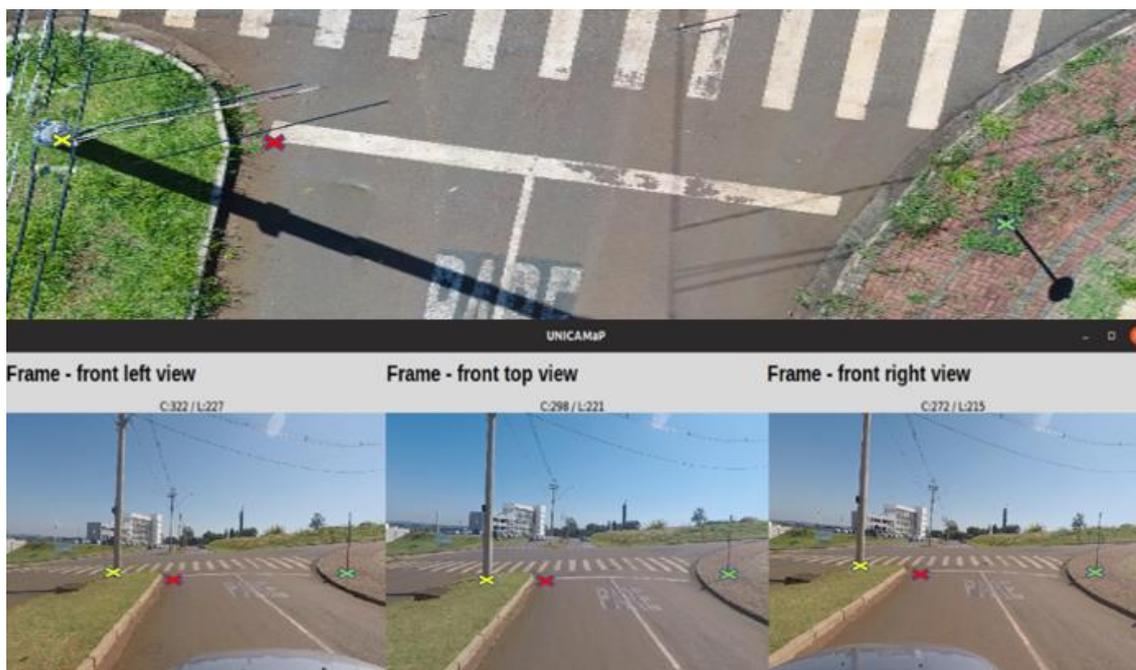
**Figura 21** – Feições Escolhidas para Comparação.



Fonte: Autor

Feições fotoidentificáveis como postes de distribuição de energia, cantos nas faixas de pedestres e placas de sinalização vertical foram selecionadas para extração das coordenadas tridimensionais, como mostrado na figura abaixo.

**Figura 22** - Exemplo de Obtenção das Feições



Fonte: Autor

A Figura 22, em sua parte superior, apresenta parte de uma ortofoto da área em questão, enquanto a imagem inferior se refere a uma visualização do STMM-BC. Os pontos da ortofoto foram usados como referência e comparados aos mesmos pontos mapeados com o STMM-BC.

Três experimentos foram realizados para verificação da precisão das coordenadas obtidas com o STMM-BC. O primeiro teste foi realizado com as câmaras e receptores GPS *Navspark Raw* (L1). O segundo teste realizado foi com a embarcação de um receptor *Hyper +* de dupla frequência (L1/L2), da fabricante Topcon, em substituição aos receptores de baixo custo e simples frequência. No terceiro, e último, experimento foi realizada uma integração dos dados do receptor *Navspark Raw* (L1) e sistema inercial da câmara GoPro pelo método *loosely-coupled* descrito na Seção 2.1.3, obtendo-se assim a atitude da plataforma dadas pelos sensores internos da GoPro. Esses parâmetros foram considerados para os cálculos. A figura abaixo apresenta representação visual da diferença em qualidade posicional entre os receptores *Navspark Raw* (L1) e o Topcon *Hyper +* (L1/L2).

**Figura 23** – Qualidade das observações GNSS



(a) Receptor L1

(b) Receptor L1/L2

Fonte: Autor

As observações em verde demonstram as posições fixas obtidas pelos receptores GNSS e as amarelas refletem as observações flutuantes. Uma vez que o STMM-BC tem uma alta dependência do sistema de posicionamento, a escolha do receptor GNSS é totalmente correlacionada com a sua precisão final.

Para o primeiro experimento, foram considerados somente os dados das câmaras e do sistema de posicionamento *Navspark Raw* de simples frequência para os cálculos, sendo assim se obteve os seguintes resultados mostrados na Tabela 1. Os pontos referência e os observados estão destacados no Apêndice A, juntamente com os valores dos resíduos.

**Tabela 1** – Resultados Obtidos com Câmara e *Navspark Raw*

<b>Análises</b>	<b>Erros(m)</b>	
	Planimétrico	Altimétrico
Média	3,314	0,639
Mediana	3,090	0,600
Desvio Padrão	1,758	0,353

O experimento 2 foi realizado com auxílio de um receptor de dupla frequência Topcon *Hyper+* em substituição ao *Navspark*. Os resultados obtidos são demonstrados na Tabela 2 abaixo.

**Tabela 2** – Resultados Obtidos com Câmara e Topcon *Hyper+* (L1/L2)

<b>Análises</b>	<b>Erros(m)</b>	
	Planimétrico	Altimétrico
Média	1,914	0,344
Mediana	1,672	0,379
Desvio Padrão	1,134	0,183

Como esperado, devido a melhor precisão do receptor GNSS, esse experimento obteve um melhor resultado em relação ao anterior devido a uma maior quantidade de pontos fixos como pode se observar na Figura 23.

Como último experimento foi realizado a coleta de dados utilizando receptor GPS *Navspark Raw* e câmaras, porém dessa vez foi realizada a integração dos dados do sistema de posicionamento e do sistema inercial das câmaras com as observáveis do receptor GPS. Como resultado foram obtidos os seguintes valores mostrados na Tabela 3 abaixo.

**Tabela 3** – Resultados Obtidos com Integração dos Dados.

<b>Análises</b>	<b>Erros(m)</b>	
	Planimétrico	Altimétrico
Média	2,563	0,547
Mediana	2,533	0,183
Desvio Padrão	0,982	0,353

O terceiro teste contendo a integração dos dados obteve um resultado intermediário, quando comparado ao experimento 1 e 2, isto elucida bem a proposta inicial do trabalho que é a obtenção da melhor precisão com o menor valor financeiro investido. Como pode se notar os melhores resultados foram obtidos no segundo experimento, porém o procedimento foi realizado com um receptor que custa aproximadamente R\$ 50.000,00 enquanto o experimento 3 foi realizado com um receptor de aproximadamente R\$ 320,00.

As diferentes precisões entre as abordagens são frutos de técnicas e equipamentos diferentes. A pior precisão alcançada entre os experimentos foi a com a primeira configuração, onde somente os dados de posicionamento e fotogramétricos foram utilizados. Esses resultados se dão em função de um provável erro nos ângulos de atitude da plataforma no momento da tomada das imagens bem como o a possível diferença de sincronismo do sistema.

O segundo experimento ao qual foi embarcado um receptor de dupla frequência foi o que apresentou melhores médias devido a uma melhor qualidade das observações do receptor GNSS, fazendo com que a posição dos CPs das câmaras sejam determinadas de maneira mais precisa, propiciando um melhor resultado na interseção fotogramétrica. Porém esse tipo de configuração não é adequada ao tema proposto por esse trabalho, pois o receptor utilizado é considerado de alto custo. O intuito dessa abordagem foi verificar a influência da qualidade do posicionamento da plataforma no método adotado.

Como a terceira análise utilizou-se os mesmos equipamentos da primeira configuração, porém com uso da técnica de integração apresentada na Seção 2.1.3, foi possível trabalhar como os ângulos de atitude da plataforma no momento da tomada da imagem. Essa abordagem requer um passo a mais no pós-processamento que é a integração dos dados (GPS + GPS/Inercial câmaras) por meio de algoritmos *loosely-coupled*, porém obtêm-se melhor precisão e confiabilidade em relação a primeira configuração conforme mostrado nos

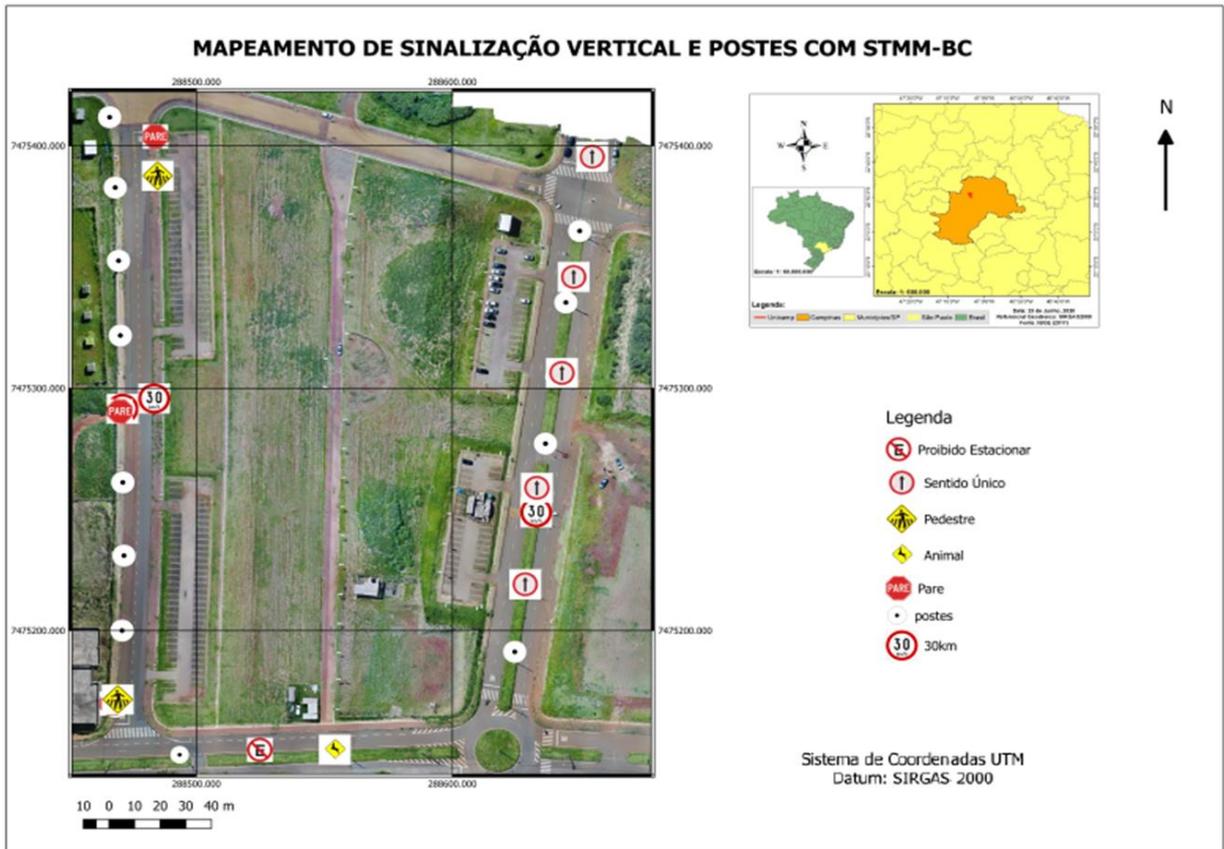
resultados. Sendo assim, essa abordagem é a recomendada para obtenção de dados com esse STMM-BC.

A análise de mediana foi realizada para verificar se a distribuição da probabilidade está simétrica, isso indica se há ou não *outlier* nas observações. Caso a média diferenciar muito em valores da mediana, isso indica *outliers*. Todos os dados base para os cálculos desta seção estão disponibilizados em apêndice neste trabalho.

#### **4.1 Aplicações do STMM-BC**

Considerando os resultados apresentados na Tabela 3, o sistema desenvolvido neste trabalho pode ser utilizado no mapeamento de rodovias e ferrovias para gerenciamento de ativos e planejamento geral de engenharia numa fase inicial; além disso, é capaz de entregar mapas contendo feições características de rodovias para cadastramento e inventário (Figura 24). Esses mapas podem ser usados por departamentos de transporte e gestão pública para a aplicação desejada em engenharia de transportes. O STMM-BC pode ser utilizado em algumas aplicações que podem auxiliar os gestores públicos, tais como mapas como os de inventário de sinalização vertical/horizontal (Figura 24), inventários de postes de energias elétricos (Figura 24), cadastramento ambiental de árvores e vegetações são exemplos de aplicações do STMM-BC em transportes.

**Figura 24** – Mapas de Inventário de Sinalização Vertical



Fonte: Autor

A grande vantagem do STMM-BC é a possibilidade do mapeamento sistemático das feições. Um exemplo ao qual é importantíssimo o mapeamento sistemático é o de qualidade superficial de vias urbanas quantificando o número e locais de buracos e imperfeições. Em posse de um STMM-BC é possível a criação de um banco de dados georreferenciado com esse tipo de informação que poderia fomentar os agentes públicos em melhores práticas de gestão. Devido a seu caráter dinâmico o STMM-BC possibilita uma alta resolução temporal, sendo assim podendo auxiliar em aplicações que demanda uma alta taxa de revisita.

O STMM-BC é um equipamento que poderia auxiliar na fiscalização do cumprimento da resolução nº 9, de 12 de agosto de 2020 que dispõe sobre o uso das faixas de domínio de rodovias federais sob circunscrição do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Além das medições para verificação de possíveis irregularidades o sistema também propicia o registro fotográfico que pode auxiliar em algumas tarefas que demanda análise visual, tais como reconhecimento do tipo de edificação, análise dos equipamentos públicos instalados nas rodovias, entre outros. Novamente devido ao caráter dinâmico do STMM as fiscalizações da legislação tornam-se ágeis.

Uma outra possibilidade da aplicação do STMM-BC seria o de “fiscal automático de trânsito” que é o veículo que monitora os estacionamentos rotativos conhecidos também como “zona azul”. Em alguns lugares do Brasil como Santos e São Paulo as prefeituras já adotaram essa prática. A Figura 25 demonstra um exemplo do sistema de São Paulo.

**Figura 25** – Fiscalização Automática de Estacionamento Rotativo



Fonte: <<https://sao-paulo.estadao.com.br/noticias/geral,cet-testa-em-sp-carro-que-multa-zona-azul,70002552182>> Acesso em: 4/2020

Esses sistemas de verificação possuem o processamento imediato das informações obtidas, tarefa que seria inviável com a configuração do STMM-BC deste trabalho pois as câmaras não possuem uma conexão direta com o microcontrolador. Contudo é possível a implementação de conexão das câmaras com a microcontroladora por *wifi* (tarefa não realizada neste trabalho) podendo ser uma abordagem para a resolução dessa problemática.

Percebe-se também que para qualquer aplicação com a finalidade de criação de um mapa, o STMM-BC pode ser utilizado com segurança, pois a depender da escala do mapa os erros contidos no STMM-BC tornam-se irrelevantes.

Aplicações como projeto geométrico de rodovias, projetos hídricos, entre outros projetos que demandam alta precisão não se recomenda o uso desse STMM-BC e dos métodos aqui utilizados. Para esses tipos de aplicação aconselha-se a integração de um sistema inercial de alta precisão. Além de se implantar o procedimento de fototriangulação entre as tomadas de imagem para um aprimoramento da posição final. Pode-se também acoplar um sistema de varredura à LASER, tornando assim o STMM mais robusto com maior número de produtos e aplicações.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As precisões de cada equipamento utilizado neste STMM-BC foram estudadas e mapeadas com a finalidade de melhoria na precisão posicional final do sistema. A avaliação da qualidade posicional das feições extraídas dos dados obtidos com o STMM-BC permitiu a indicação de uso desse sistema para diversas aplicações que atendem a precisão alcançada pelo STMM-BC descrito nessa dissertação.

O trabalho demonstra o potencial de uso desse STMM-BC para países em desenvolvimento como o caso do Brasil devido a seu caráter econômico (baixo-custo) e suas possíveis aplicações que podem auxiliar os gestores em boas práticas de administração.

As precisões obtidas na avaliação de qualidade permitem algumas observações. Os resultados da interseção fotogramétrica poderiam ser melhorados consideravelmente caso o STMM-BC possuísse um sistema inercial de boa precisão. A integração *loosely-coupled* permite uma melhoria na qualidade dos dados, porém por ser uma metodologia extremamente sensível a qualidade das coordenadas do GPS, a melhoria na posição pode não ser tão significativa a depender da aplicação. Outro ponto que possibilitaria a melhoria da precisão das coordenadas tridimensionais obtidas com o STMM-BC seria a implementação da Fototriangulação no instante da tomada das imagens (tomadas consecutivas), possuindo assim uma melhoria nos dados de atitude da plataforma na entrada da interseção fotogramétrica.

O *software* UNICAMaP e os manuais de montagem desenvolvidos neste trabalho serão disponibilizados para toda comunidade acadêmica por meio do *github* que é um meio de compartilhamento de algoritmos. A ideia é disponibilizar os códigos bem como vídeos explicando o uso dos mesmos.

Em linhas gerais o trabalho cumpriu o objetivo pretendido que era desenvolver e avaliar um STMM-BC desenvolvido na UNICAMP. Hoje, o sistema é totalmente operacional podendo ser utilizado para as aplicações discutidas nesse trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGARWAL, P.; SYED, Z.; EL-SHEIMY, N. **MEMS-Based Integrated Navigation**; Artech House Publisher: Norwood, UK, 2010.

ANGRISANO, A.; PETOVELLO, M.; PUGLIANO, G. GNSS/INS integration in vehicular urban navigation. In: **Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2010)**. p. 1505-1512, 2010.

BALLETTI, C., GUERRA, F., TSIUKAS, V. VERNIER, P. Calibration of action cameras for photogrammetric purposes. **Sensors**, v. 14, n. 9, p. 17471–17490, 2014.

BERNARDI, J.V.E. & LANDIM, P.M.B. **Aplicação do Sistema de Posicionamento Global (GPS) na coleta de dados**. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático 10, 31 pp, 2002. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>> Acesso em: 10 set. 2019.

BOSSLER, J.; GOAD, C.; JOHNSON, P.; GPS and GIS map the nation's highways. **Geo Info Systems**, v. 1, n. 3, p. 27–37, 1991.

BOSSLER, J.; CAMPBELL, J.; MCMASTER, R. Coordinates and coordinate systems. **Manual of geospatial science and technology**, p. 9-16, 2010.

BRITTING, K. **Unified error analysis of terrestrial inertial navigation systems**. In Guidance, Control and Flight Mechanics Conference (p. 901), 1971.

BROWN, D. C. **Close-range camera calibration Photogramm. Eng.** v. 37, p. 855–866, 1971.

COELHO, L.; BRITO, J. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: EdUERJ, p. 196, 2007.

CRESPILLO, O. G., MEDINA, D., SKALLOUD, J., & MEURER, M.. Tightly coupled GNSS/INS integration based on robust M-estimators. **IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)**. IEEE, 2018. p. 1554-1561, 2018.

CUI, G.; LUO, J.; WANG, X. Personalized travel route recommendation using collaborative filtering based on GPS trajectories. **International journal of digital earth**, v. 11, n. 3, p. 284-307, 2018.

DA SILVA. **Special Applications of Photogrammetry**. BoD—Books on Demand, 2012.

DALMOLIN, Q. **Ajustamento por mínimos quadrados**. Imprensa Universitária-UFPR. 3ª Edição, 2010

DANIEL, S.; DORAN, M. A. geoSmartCity: geomatics contribution to the smart city. In: **Proceedings of the 14th Annual International Conference on Digital Government Research**. p. 65-71, 2013.

DUANE, C. B. Close-range camera calibration. **Photogramm. Eng**, v. 37, n. 8, p. 855–866, 1971.

ELLIOTT, K.; HEGARTY, C. **Understanding GPS/GNSS Principles and Applications**. Norwood, MA: Artech House. ISBN-13, p. 978-1, 2017.

EL-SHEIMY, N. **The development of VISAT: a mobile survey system for GIS applications**. University of Calgary, 1996.

EL-SHEIMY, N.; SCHWARZ, K. P. **Navigating urban areas by VISAT—A mobile mapping system integrating GPS/INS/digital cameras for GIS applications**, Navigation: J. Inst. Navigation, v. 45, n. 4, p. 275-285, 1998.

EL-SHEIMY, N. **Inertial Techniques and INS/DGPS Integration**. Department of Geomatics Engineering lecture notes, University of Calgary, Calgary, AB, Canada, 2012.

ELLUM, C.; EL-SHEIMY, N. Land-based mobile mapping systems. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 68, n. 1, p. 13–17, 2002.

FALCO, G., PINI, M., & MARUCCO, G. Loose and tight GNSS/INS integrations: Comparison

of performance assessed in real urban scenarios. **Sensors**, 17(2), 255, 2017.

FERNANDES, R. F.; OLIVEIRA, H. C.; GARCIA, M.V.Y. Avaliação de Sensores de Baixo Custo para Uso em um Sistema de Mapeamento móvel. In: **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2019, Santos. Anais eletrônicos... Campinas, GALOÁ, 2019. Disponível em: <<https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/avaliacao-de-sensores-de-baixo-custo-para-uso-em-um-sistema-de-mapeamento-movel>>. Acesso em: 05 set. 2019.

GALLIS, R. B. A.; SILVA, J. F. C.; CAMARGO, P.O.; BARBOSA, R. L. Mapeamento móvel no Brasil: **Resultados obtidos com a utilização da Unidade Móvel de Mapeamento Digital** In: Série em Ciências Geodésicas Ed. Curitiba: Imprensa Universitária, v.2, 2002. pp. 248-266, 2002.

GALLIS, R. B. A.; BARBOSA, R. L.; CUNHA, S. R.; HIRAGA, A. K.; FARIA, M. A. WebSIG alimentado com dados coletados com sistema de mapeamento móvel terrestre. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 70, n. 5, p. 1644-1663, 2018.

GALO, M.; TOMMASELLI, A. M. G. Calibração de câmaras. In: Piteri, Marco A.; Rodrigues, José C. (Org.). **Fundamentos de visão computacional**. Presidente Prudente, Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP. p. 53-112, 2011.

GARCIA, M. V. Y., & OLIVEIRA, H. C. (2020). The Influence of Ground Control Points Configuration and Camera Calibration for DTM and Orthomosaic Generation Using Imagery Obtained from a Low-Cost Uav. **ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, v.5, n. 1, 2020.

GLEASON, S.; GEBRE-EGZIABHER, D.; EGZIABHER, D. G. **GNSS Applications and Methods**. 2009.

GONÇALVES, G. R. **Elementos da fotogrametria analítica**. Departamento de Matemática, 2005.

GREWAL, M. S.; WEILL, L. R.; ANDREWS, A. P. **Global positioning systems, inertial**

**navigation, and integration.** John Wiley & Sons, 2007.

GROETELAARS, N. J. **Um estudo da Fotogrametria Digital na documentação de formas arquitetônicas e urbanas.** Salvador: UFBA, 2004.

GROVES, P. D. **Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems.** Artech House, 2013.

HARRISON, C., & DONNELLY, I. A. A theory of smart cities. **In Proceedings of the 55th Annual Meeting of the ISSS-2011, Hull, UK,** 2011.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and more.** Springer Science & Business Media, 2008.

HOFMANN, S., & BRENNER, C. Accuracy assessment of mobile mapping point clouds using the existing environment as terrestrial reference. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences-ISPRS Archives 41,** v. 41, p. 601-608, 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual do Usuário: Posicionamento Por Ponto Preciso.** Disponível em: [http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual\\_ppp.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual_ppp.pdf). 2009. Acesso em 3 de setembro de 2019.

INCRA. Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. **Norma técnica para georreferenciamento de imóveis rurais:** aplicada à Lei 10.267. 3. ed. Brasília, 4 p., 2013.

INFANTE, E. **Development and assessment of loosely-coupled ins using smartphone sensors.** 2016. Tese de Doutorado. University of New Brunswick.

KEANE, J. F.; CARR, Stephen S. A brief history of early unmanned aircraft. **Johns Hopkins APL Technical Digest,** v. 32, n. 3, p. 558–571, 2013.

KLEIN, I., MATSUOKA, M. T., SOUZA, S. F. D., & VERONEZ, M. R. Ajustamento de observações: uma interpretação geométrica para o método dos mínimos quadrados. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v.17, n. 2, p.272-294, 2011.

KOLBE, T. H., KÖNIG, G., & NAGEL, C. **Advances in 3D geo-information sciences**. Springer Science & Business Media, 2011.

KÜHLING, C. *Fisheye Camera System Calibration for Automotive Applications*, 2017.

LEICK, A.; RAPOPORT, L.; TATARNIKOV, D. **GPS satellite surveying**. John Wiley & Sons, 2015.

LUHMANN, T., FRASER, C., & MAAS, H. G. Sensor modelling and camera calibration for close-range photogrammetry. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 115, p. 37-46, 2016.

LINDER, W. **Digital photogrammetry: theory and applications**. [s.l.]: Springer Science & Business Media, 2013.

LINDER, W. Lens Distortion and Calibration. In: **Digital Photogrammetry**. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 109-114, 2016.

LUKIC, D. **Dual Fisheye Camera Calibration**, 2019 Disponível em: [https://lukic.io/files/Dual\\_Fisheye\\_Camera\\_Calibration.pdf](https://lukic.io/files/Dual_Fisheye_Camera_Calibration.pdf) Acesso em 18 de março de 2021.

MADEIRA, S.; GONÇALVES, J. A.; BASTOS, L. Sensor integration in a low cost land mobile mapping system. **Sensors**, v. 12, n. 3, p. 2935–2953, 2012.

MADEIRA, S.; YAN, W.; BASTOS, L., Accuracy Assessment of the Integration of GNSS and a MEMS IMU in a Terrestrial Platform. **Sensors**, v. 14, n. 11, p. 20866–20881, 2014.

MCGLONE, J. **Manual of Photogrammetry Fifth Edition**, the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 2004.

MARINELLI, G., BASSANI, M., PIRAS, M., & LINGUA, A. M. Mobile mapping systems and spatial data collection strategies assessment in the identification of horizontal alignment of highways. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 79, p. 257-273, 2017.

MOLINA, P.; BLÁZQUEZ, M.; SASTRE, J.; *et al.* A METHOD FOR SIMULTANEOUS AERIAL AND TERRESTRIAL GEODATA ACQUISITION FOR CORRIDOR MAPPING. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, v. 40, 2015.

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

NAVARRO, S.; LERMA, J. L. Accuracy analysis of a mobile mapping system for close range photogrammetric projects. **Measurement**, v. 93, p. 148-156, 2016.

NEBOT, E., & DURRANT-WHYTE, H. Initial calibration and alignment of low-cost inertial navigation units for land vehicle applications. **Journal of Robotic Systems**, v. 16, n. 2, p. 81-92, 1999.

OLIVEIRA, H. C.; MENDONÇA, M. A. M.; RIBEIRO, J. M. B.; ALVES R. M. F.; SOUZA J. R. Camera Synchronization Using an Audio-Based Approach For Mobile Mapping Systems. **The 11th International Conference On Mobile Mapping Technology: MMT**. Shenzhen, 2019. p. 356-361. Disponível em: [https://drive.google.com/file/d/1ewAaczzbwC\\_SzYNclo86B-kR0AY\\_syLO/view](https://drive.google.com/file/d/1ewAaczzbwC_SzYNclo86B-kR0AY_syLO/view). Acesso em: 15 juho de 2019.

ORESHCHENKO, A., & NESTERCHUK, I. Development and use of a geoinformation system for revealing urban problems. **Eastern-European Journal of Enterprise Technologies**, v. 2, n. 2, p. 32-41, 2017.

PETOVELLO, M. **Real-Time Integration of a Tactical-Grade IMU and GPS for High-Accuracy Positioning and Navigation**. Calgary, AB: University of Calgary, Department of Geomatics Engineering, 2003.

PUENTE, I., GONZÁLEZ-JORGE, H., MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, J., & ARIAS, P. Review of mobile mapping and surveying technologies. **Measurement**, v. 46, n. 7, p. 2127-2145, 2013.

REMONDINO, F., & FRASER, C. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 36, n. 5, p. 266-272, 2006.

RUY, R. D. S., TOMMASELLI, A. M. G., GALO, M., HASEGAWA, J. K., & MENOSSI, R. C. Fototriangulação com parâmetros adicionais para câmaras digitais: uma avaliação experimental. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 14, n. 4, 2008.

SILVA, J. F.; CAMARGO, P. O.; OLIVEIRA, R. A.; *et al.* A STREET MAP BUILT BY A MOBILE MAPPING SYSTEM. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 33, n. B2; PART 2, p. 510–517, 2000.

SILVA, J. F. C.; CAMARGO, P.; GALLIS, R. B. A. Development of a low-cost mobile mapping system: a South American experience. **The Photogrammetric Record**, v. 18, n. 101, p. 5–26, 2003.

SILVA, JOÃO FERNANDO C.; DE OLIVEIRA CAMARGO, PAULO; GALLIS, RODRIGO B.A. Development of a low-cost mobile mapping system: A South American experience. **Photogrammetric Record**, v. 18, n. 101, p. 5-26, 2003. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/67206>. Acesso em 02 março de 2018.

SILVA, C. M; JUNIOR P. T. S; ALVES M. B.; MONICO J. F. G (2020). Galileo: a consolidação do sistema de posicionamento europeu. **Revista Brasileira de Geomática**, p.238. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo/article/view/11484/7953> Acesso em 18 de março de 2021

SCHWALBE, E. Geometric modelling and calibration of fisheye lens camera systems. **In Proc.**

**2nd Panoramic Photogrammetry Workshop, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing.** Vol. 36, No. Part 5, p. W8, 2005.

SCHENK, T. **Introduction to photogrammetry.** The Ohio State University, Columbus, v. 106, 2005.

TAGLIORETTI, C.; MANZINO, A. M. Terrestrial Mobile Mapping: photogrammetric simulator. **The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 40, n. 3, p. 333, 2014.

TAO, C. V. Mobile mapping technology for road network data acquisition. **Journal of Geospatial Engineering**, v. 2, n. 2, p. 1–14, 2000.

TEUNISSEN, P.; MONTENBRUCK, O. **Springer handbook of global navigation satellite systems.** Springer, 2017.

TOKIWA, K., TANAKA, H., & SENBA, T. U.S. Patent No. 7,519,291. Washington, DC: U.S. **Patent and Trademark Office**, 2009.

TOSCHI, I.; RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ, P.; REMONDINO, F. Accuracy evaluation of a mobile mapping system with advanced statistical methods. **The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 40, n. 5, p. 245, 2015.

WELCH, G., & BISHOP, G. **An introduction to the Kalman filter.** 1995.

WENG, J.; COHEN, P.; HERNIOU, M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. **IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence**, n. 10, p. 965–980, 1992.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. WILKINSON, B. E. **Elements of Photogrammetry with Applications in GIS.** McGraw-Hill Education, 2014.

XU, Z., CUI, G., ZHONG, M., & WANG, X. Anomalous urban mobility pattern detection based on GPS trajectories and POI data. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, 8(7), 308, 2019.

ZHANG, Z. A flexible new technique for camera calibration. **IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence**, v. 22, n. 11, p. 1330-1334, 2000.

**APÊNDICE A – Coordenadas referência e as observações e análises estatísticas para o experimento 1 com receptor L1.**

	Análises Planimétricas - Levantamento Final				Ref-obs	Ref-obs	(Ref-obs)^2	(Ref-obs)^2	Raiz
	Referência		Receptor L1/L2		Δ E (m)	Δ N (m)	Δ E (m)	Δ N (m)	Δ Plani
	E(m)	N(m)	E(m)	N(m)					
1	288649.426	7475346.618	288649.327	7475347.838	0.099	-1.220	0.010	1.488	1.224
2	288653.812	7475359.113	288651.532	7475360.333	2.280	-1.220	5.198	1.488	2.586
3	288651.952	7475363.828	288652.867	7475362.718	-0.915	1.110	0.837	1.232	1.439
4	288627.791	7475217.125	288629.939	7475215.176	-2.148	1.949	4.612	3.798	2.900
5	288632.225	7475246.965	288634.781	7475245.682	-2.556	1.282	6.534	1.644	2.860
6	288635.786	7475262.522	288636.093	7475261.263	-0.307	1.259	0.094	1.585	1.296
7	288637.248	7475276.226	288638.719	7475274.621	-1.471	1.604	2.164	2.574	2.177
8	288640.820	7475298.256	288641.243	7475297.882	-0.423	0.373	0.179	0.139	0.564
9	288640.906	7475299.332	288641.641	7475299.134	-0.735	0.198	0.541	0.039	0.762
10	288640.954	7475304.355	288642.255	7475304.336	-1.301	0.020	1.691	0.000	1.301
11	288651.145	7475298.090	288653.942	7475295.797	-2.797	2.293	7.822	5.257	3.617
12	288646.797	7475300.098	288649.672	7475297.381	-2.875	2.717	8.268	7.384	3.956
13	288645.474	7475334.120	288641.974	7475331.364	3.500	2.756	12.250	7.597	4.455
14	288654.032	7475354.277	288652.951	7475355.839	1.081	-1.562	1.169	2.440	1.900
15	288653.818	7475359.140	288651.918	7475364.041	1.900	-4.901	3.609	24.018	5.256
16	288655.467	7475363.049	288651.373	7475359.770	4.094	3.279	16.761	10.754	5.246
17	288659.419	7475362.278	288659.292	7475365.395	0.127	-3.117	0.016	9.718	3.120
18	288652.018	7475364.217	288645.398	7475365.344	6.621	-1.128	43.834	1.272	6.716
19	288649.325	7475363.740	288651.407	7475364.844	-2.083	-1.104	4.337	1.220	2.357
20	288643.070	7475335.395	288642.115	7475332.534	0.955	2.861	0.911	8.184	3.016
21	288634.065	7475280.203	288633.359	7475283.143	0.706	-2.940	0.499	8.644	3.024
22	288627.170	7475281.358	288626.020	7475283.086	1.150	-1.728	1.323	2.986	2.076
23	288631.068	7475279.182	288631.096	7475284.084	-0.028	-4.902	0.001	24.033	4.902
24	288632.733	7475269.804	288629.937	7475276.251	2.796	-6.447	7.818	41.562	7.027
25	288623.756	7475250.608	288628.431	7475250.329	-4.676	0.279	21.861	0.078	4.684
26	288628.865	7475249.768	288631.944	7475247.135	-3.078	2.633	9.475	6.932	4.051
27	288623.887	7475235.812	288625.551	7475238.416	-1.664	-2.604	2.770	6.778	3.090
28	288612.512	7475182.702	288620.324	7475184.774	-7.811	-2.072	61.016	4.294	8.081
29	288614.892	7475181.757	288613.305	7475183.145	1.587	-1.388	2.519	1.926	2.108
30	288619.258	7475180.558	288614.331	7475185.450	4.927	-4.892	24.277	23.933	6.943
31	288481.679	7475226.179	288479.989	7475230.525	1.690	-4.347	2.856	18.893	4.664
32	288481.486	7475289.535	288478.197	7475291.057	3.290	-1.522	10.822	2.316	3.625
33	288477.374	7475289.710	288476.332	7475290.892	1.042	-1.182	1.087	1.397	1.576
34	288482.361	7475344.308	288483.815	7475347.208	-1.454	-2.900	2.114	8.410	3.244
35	288477.532	7475401.513	288477.896	7475399.540	-0.364	1.973	0.133	3.894	2.007
36	288479.439	7475401.635	288475.982	7475402.820	3.457	-1.185	11.948	1.405	3.654
37	288479.369	7475404.033	288481.352	7475400.155	-1.983	3.878	3.932	15.038	4.355
38	288475.388	7475405.896	288475.649	7475405.909	-0.262	-0.013	0.068	0.000	0.262
39	288471.188	7475352.462	288468.747	7475347.976	2.442	4.486	5.961	20.128	5.108
40	288471.652	7475322.783	288471.764	7475319.393	-0.112	3.390	0.013	11.494	3.392
41	288471.669	7475292.580	288471.766	7475290.481	-0.096	2.099	0.009	4.405	2.101
42	288474.189	7475293.525	288477.414	7475292.471	-3.225	1.053	10.399	1.110	3.392
43	288471.608	7475262.638	288475.794	7475263.333	-4.186	-0.694	17.525	0.482	4.243
44	288470.969	7475232.645	288471.068	7475225.163	-0.098	7.482	0.010	55.973	7.482
45	288471.731	7475227.986	288467.562	7475231.616	4.169	-3.631	17.379	13.182	5.528
46	288469.674	7475202.367	288469.552	7475200.450	0.122	1.917	0.015	3.673	1.920
47	288481.667	7475226.192	288484.683	7475226.866	-3.015	-0.674	9.093	0.455	3.090
48	288481.534	7475289.454	288483.151	7475286.545	-1.617	2.909	2.615	8.461	3.328
49	288480.195	7475289.520	288481.409	7475284.111	-1.214	5.409	1.474	29.260	5.544
50	288477.539	7475401.435	288478.994	7475398.055	-1.455	3.380	2.117	11.424	3.680
51	288478.563	7475401.479	288479.425	7475400.813	-0.862	0.666	0.743	0.444	1.089
52	288473.754	7475446.375	288476.275	7475446.674	-2.521	-0.299	6.356	0.089	2.539
53	288472.974	7475457.116	288474.216	7475458.593	-1.242	-1.477	1.543	2.182	1.930
54	288472.642	7475462.572	288472.715	7475465.362	-0.073	-2.790	0.005	7.785	2.791
55	288645.493	7475296.612	288648.816	7475298.072	-3.323	-1.460	11.042	2.132	3.630
56	288648.232	7475315.089	288650.131	7475316.134	-1.899	-1.045	3.606	1.092	2.168
57	288654.043	7475354.301	288654.360	7475355.967	-0.318	-1.666	0.101	2.776	1.696
58	288654.507	7475369.386	288654.613	7475367.064	-0.106	2.322	0.011	5.392	2.324
59	288654.928	7475385.777	288651.298	7475387.719	3.630	-1.942	13.177	3.771	4.117
60	288647.181	7475393.195	288648.136	7475394.536	-0.955	-1.341	0.912	1.798	1.646

Análises estatísticas	
Receptores	L1 Navspark
Média dos Erro Planimé	3.314
Desvio Padrão Planimé	1.758
Mediana	3.090
Coefficiente de Variação	0.530

**APÊNDICE B – Coordenadas referência e as observações e análises estatísticas para o experimento 1 com receptor L1/L2.**

	Análises Planimétricas - Levantamento Final				Ref-obs	Ref-obs	(Ref-obs)^2	(Ref-obs)^2	Raiz
	Referência		Receptor L1/L2		Δ E (m)	Δ N (m)	Δ E (m)	Δ N (m)	Δ Plani
	E(m)	N(m)	E(m)	N(m)					
1	288649.426	7475346.618	288650.726	7475346.508	-1.300	0.110	1.690	0.012	1.305
2	288653.812	7475359.113	288652.732	7475357.413	1.080	1.700	1.166	2.890	2.014
3	288651.952	7475363.828	288651.956	7475364.833	-0.004	-1.005	0.000	1.010	1.005
4	288627.791	7475217.125	288626.294	7475216.676	1.497	0.449	2.240	0.202	1.563
5	288632.225	7475246.965	288631.983	7475246.966	0.242	-0.002	0.059	0.000	0.242
6	288635.786	7475262.522	288635.112	7475262.480	0.674	0.042	0.455	0.002	0.676
7	288637.248	7475276.226	288636.023	7475276.160	1.226	0.065	1.502	0.004	1.227
8	288640.820	7475298.256	288639.825	7475297.547	0.995	0.709	0.991	0.503	1.222
9	288640.906	7475299.332	288640.280	7475298.014	0.626	1.318	0.392	1.737	1.459
10	288640.954	7475304.355	288639.200	7475303.578	1.754	0.778	3.078	0.605	1.919
11	288651.145	7475298.090	288651.248	7475298.810	-0.103	-0.720	0.011	0.518	0.727
12	288646.797	7475300.098	288645.537	7475302.246	1.260	-2.148	1.586	4.612	2.490
13	288645.474	7475334.120	288644.437	7475333.865	1.037	0.255	1.076	0.065	1.068
14	288654.032	7475354.277	288653.491	7475352.081	0.540	2.196	0.292	4.822	2.261
15	288653.818	7475359.140	288652.300	7475359.280	1.518	-0.141	2.303	0.020	1.524
16	288655.467	7475363.049	288654.965	7475363.449	0.502	-0.400	0.252	0.160	0.642
17	288659.419	7475362.278	288658.900	7475364.859	0.519	-2.581	0.269	6.662	2.633
18	288652.018	7475364.217	288653.867	7475365.075	-1.848	-0.858	3.417	0.737	2.038
19	288649.325	7475363.740	288648.143	7475364.154	1.182	-0.414	1.397	0.171	1.252
20	288643.070	7475335.395	288645.586	7475335.785	-2.517	-0.390	6.335	0.152	2.547
21	288634.065	7475280.203	288636.733	7475279.964	-2.668	0.240	7.117	0.057	2.678
22	288627.170	7475281.358	288628.749	7475279.616	-1.579	1.743	2.493	3.037	2.352
23	288631.068	7475279.182	288633.491	7475277.760	-2.423	1.422	5.872	2.022	2.810
24	288632.733	7475269.804	288634.392	7475270.140	-1.660	-0.336	2.754	0.113	1.693
25	288623.756	7475250.608	288623.112	7475249.426	0.643	1.182	0.414	1.397	1.346
26	288628.865	7475249.768	288629.778	7475247.825	-0.912	1.943	0.832	3.776	2.147
27	288623.887	7475235.812	288624.287	7475234.567	-0.400	1.245	0.160	1.551	1.308
28	288612.512	7475182.702	288613.243	7475179.464	-0.731	3.237	0.534	10.481	3.319
29	288614.892	7475181.757	288615.213	7475179.413	-0.321	2.344	0.103	5.495	2.366
30	288619.258	7475180.558	288622.307	7475179.282	-3.048	1.276	9.293	1.628	3.305
31	288481.679	7475226.179	288482.090	7475227.356	-0.411	-1.177	0.169	1.385	1.247
32	288481.486	7475289.535	288480.120	7475290.825	1.367	-1.290	1.868	1.664	1.879
33	288477.374	7475289.710	288477.294	7475290.877	0.080	-1.167	0.006	1.363	1.170
34	288482.361	7475344.308	288483.635	7475345.283	-1.274	-0.975	1.622	0.952	1.604
35	288477.532	7475401.513	288478.378	7475401.034	-0.847	0.478	0.717	0.229	0.972
36	288479.439	7475401.635	288481.088	7475401.732	-1.649	-0.097	2.718	0.009	1.652
37	288479.369	7475404.033	288480.825	7475402.249	-1.456	1.784	2.121	3.183	2.303
38	288475.388	7475405.896	288476.146	7475404.046	-0.759	1.851	0.575	3.424	2.000
39	288471.188	7475352.462	288472.553	7475351.122	-1.365	1.340	1.864	1.796	1.913
40	288471.652	7475322.783	288469.120	7475326.947	2.531	-4.164	6.408	17.335	4.873
41	288471.669	7475292.580	288472.376	7475300.482	-0.706	-7.902	0.499	62.444	7.934
42	288474.189	7475293.525	288473.153	7475290.902	1.036	2.623	1.074	6.880	2.820
43	288471.608	7475262.638	288472.547	7475264.935	-0.939	-2.296	0.881	5.273	2.481
44	288470.969	7475232.645	288469.081	7475230.866	1.889	1.779	3.567	3.164	2.594
45	288471.731	7475227.986	288469.930	7475230.161	1.801	-2.175	3.242	4.731	2.824
46	288469.674	7475202.367	288468.095	7475201.729	1.579	0.638	2.494	0.406	1.703
47	288481.667	7475226.192	288480.437	7475225.191	1.230	1.001	1.513	1.002	1.586
48	288481.534	7475289.454	288480.304	7475288.365	1.230	1.089	1.513	1.186	1.643
49	288480.195	7475289.520	288481.009	7475292.720	-0.814	-3.200	0.663	10.240	3.302
50	288477.539	7475401.435	288477.561	7475400.355	-0.022	1.080	0.000	1.166	1.080
51	288478.563	7475401.479	288478.585	7475399.579	-0.022	1.900	0.000	3.610	1.900
52	288473.754	7475446.375	288473.776	7475444.975	-0.022	1.400	0.000	1.960	1.400
53	288472.974	7475457.116	288472.996	7475455.916	-0.022	1.200	0.000	1.440	1.200
54	288472.642	7475462.572	288473.565	7475461.562	-0.923	1.010	0.852	1.020	1.368
55	288645.493	7475296.612	288646.416	7475296.842	-0.923	-0.230	0.852	0.053	0.951
56	288648.232	7475315.089	288649.132	7475314.689	-0.900	0.400	0.810	0.160	0.985
57	288654.043	7475354.301	288654.783	7475353.967	-0.740	0.334	0.548	0.112	0.812
58	288654.507	7475369.386	288654.499	7475367.286	0.008	2.100	0.000	4.410	2.100
59	288654.928	7475385.777	288654.498	7475387.710	0.430	-1.933	0.185	3.736	1.980
60	288647.181	7475393.195	288646.736	7475394.535	0.445	-1.340	0.198	1.796	1.412

Análises estatísticas	
Receptores	L1 Navspark
Média dos Erro Planimetria	1.914
Desvio Padrão Planimétrico	1.134
Mediana	1.672
Coefficiente de Variação	0.593

APÊNDICE C – Coordenadas referência e as observações e análises estatísticas para o experimento 2 com receptor L1 integração (*loosely-coupled*).

Análises Planimétricas - Levantamento Final					Ref-obs	Ref-obs	(Ref-obs)^2	(Ref-obs)^2	Raiz
Referência		Receptor L1/L2		E(m)	Δ N (m)	Δ E (m)	Δ N (m)	Δ Plani	
E(m)	N(m)	E(m)	N(m)						
288630.279	7475224.205	288633.282	7475223.235	3.003	-0.970	9.017	0.941	3.156	
288635.697	7475262.438	288638.404	7475261.315	2.707	-1.123	7.327	1.260	2.930	
288639.100	7475276.859	288641.278	7475276.681	2.178	-0.178	4.744	0.032	2.185	
288642.525	7475300.887	288644.528	7475300.574	2.003	-0.312	4.010	0.097	2.027	
288649.426	7475346.618	288651.460	7475346.343	2.034	-0.275	4.136	0.075	2.052	
288653.812	7475359.113	288654.350	7475361.856	0.539	2.743	0.290	7.524	2.795	
288651.952	7475363.828	288653.536	7475363.625	1.584	-0.203	2.509	0.041	1.597	
288654.171	7475361.481	288655.770	7475364.240	1.599	2.759	2.556	7.610	3.188	
288655.134	7475389.753	288657.694	7475389.297	2.560	-0.456	6.551	0.208	2.600	
288656.783	7475395.608	288658.419	7475395.166	1.636	-0.442	2.676	0.196	1.694	
288643.104	7475364.708	288642.551	7475362.172	-0.553	-2.535	0.306	6.428	2.595	
288644.520	7475350.845	288642.611	7475353.702	-1.909	2.857	3.644	8.163	3.436	
288644.753	7475345.444	288641.377	7475348.859	-3.375	3.415	11.394	11.661	4.802	
288638.765	7475302.209	288637.901	7475305.142	-0.864	2.933	0.747	8.600	3.057	
288634.028	7475280.179	288633.829	7475282.073	-0.200	1.893	0.040	3.585	1.904	
288631.710	7475258.177	288630.736	7475261.125	-0.974	2.948	0.948	8.690	3.104	
288626.796	7475254.458	288626.128	7475251.689	-0.667	-2.769	0.445	7.667	2.848	
288616.829	7475181.476	288616.218	7475181.571	-0.611	0.095	0.374	0.009	0.619	
288616.924	7475188.233	288615.750	7475185.498	-1.173	-2.735	1.376	7.482	2.976	
288481.667	7475226.192	288484.769	7475230.560	3.102	4.368	9.621	19.080	5.357	
288481.534	7475289.454	288483.299	7475290.851	1.764	1.397	3.113	1.953	2.251	
288480.195	7475289.520	288481.811	7475290.503	1.616	0.982	2.612	0.965	1.891	
288477.539	7475401.435	288480.581	7475402.461	3.041	1.025	9.251	1.052	3.210	
288478.563	7475401.479	288481.676	7475403.253	3.113	1.774	9.689	3.147	3.583	
288473.754	7475446.375	288477.553	7475447.091	3.799	0.716	14.432	0.513	3.866	
288472.974	7475457.116	288476.638	7475457.358	3.665	0.242	13.430	0.058	3.673	
288472.642	7475462.572	288476.203	7475462.877	3.562	0.305	12.686	0.093	3.575	
288472.884	7475454.706	288470.166	7475456.608	-2.718	1.902	7.387	3.619	3.318	
288471.675	7475448.312	288469.477	7475449.264	-2.198	0.952	4.831	0.906	2.395	
288470.668	7475448.267	288468.447	7475448.270	-2.220	0.003	4.928	0.000	2.220	
288475.449	7475405.801	288472.888	7475407.537	-2.561	1.735	6.556	3.011	3.093	
288477.784	7475297.517	288475.997	7475299.336	-1.787	1.820	3.193	3.311	2.550	
288474.718	7475293.455	288473.266	7475293.048	-1.452	-0.407	2.110	0.165	1.508	
288476.113	7475293.433	288474.748	7475293.975	-1.365	0.543	1.863	0.295	1.469	
288472.156	7475165.830	288470.820	7475166.527	-1.336	0.698	1.785	0.487	1.507	
288471.365	7475165.885	288470.031	7475166.042	-1.333	0.157	1.778	0.025	1.343	
288473.551	7475161.851	288472.050	7475163.628	-1.501	1.777	2.252	3.159	2.326	
288645.493	7475296.612	288647.050	7475300.396	1.557	3.785	2.426	14.323	4.092	
288648.232	7475315.089	288648.846	7475318.737	0.614	3.648	0.377	13.310	3.700	
288654.043	7475354.301	288654.473	7475358.618	0.431	4.317	0.185	18.639	4.339	
288654.507	7475369.386	288654.648	7475369.790	0.140	0.403	0.020	0.163	0.427	
288654.928	7475385.777	288656.915	7475385.808	1.987	0.030	3.947	0.001	1.987	
288647.181	7475393.195	288647.612	7475395.624	0.431	2.428	0.186	5.897	2.466	
288651.741	7475396.117	288652.184	7475398.802	0.443	2.685	0.197	7.210	2.721	
288641.226	7475350.851	288641.938	7475352.166	0.712	1.315	0.507	1.730	1.496	
288627.923	7475262.289	288628.567	7475265.221	0.643	2.933	0.414	8.600	3.002	
288617.846	7475194.317	288618.848	7475197.566	1.001	3.248	1.003	10.552	3.399	
288617.238	7475181.446	288617.904	7475182.238	0.667	0.792	0.445	0.628	1.036	
288476.376	7475388.414	288478.990	7475388.494	2.614	0.080	6.835	0.006	2.616	
288473.238	7475454.725	288474.067	7475455.078	0.829	0.353	0.687	0.124	0.901	
288477.765	7475304.309	288479.302	7475306.259	1.538	1.950	2.365	3.803	2.484	
288474.439	7475175.572	288476.609	7475177.357	2.170	1.785	4.710	3.186	2.810	
288475.185	7475293.317	288473.963	7475292.933	1.222	0.384	1.494	0.147	1.281	
288476.868	7475292.758	288474.646	7475290.418	2.222	2.340	4.939	5.476	3.227	
288470.559	7475267.470	288470.550	7475266.250	0.009	1.220	0.000	1.488	1.220	
288470.865	7475227.544	288468.565	7475226.322	2.300	1.222	5.290	1.493	2.604	
288467.607	7475184.541	288466.385	7475184.631	1.222	-0.090	1.494	0.008	1.226	
288470.422	7475166.048	288468.222	7475165.928	2.200	0.120	4.840	0.014	2.203	
288472.350	7475166.186	288471.250	7475169.516	1.100	-3.330	1.210	11.089	3.507	
288473.993	7475163.429	288473.333	7475161.089	0.660	2.340	0.436	5.476	2.431	
288468.860	7475160.856	288470.760	7475159.968	-1.900	0.888	3.610	0.789	2.097	
288477.477	7475285.977	288474.597	7475287.677	2.880	-1.700	8.294	2.890	3.344	
288480.012	7475290.311	288477.912	7475288.424	2.100	1.887	4.410	3.561	2.823	
288481.407	7475290.355	288482.629	7475291.815	-1.222	-1.460	1.494	2.132	1.904	

Análises estatísticas	
Receptores	L1 Navspark Integração
Média dos Erro Planimetria	2.563
Desvio Padrão Planimétrico	0.982
Mediana	2.533
Coefficiente de Variação	0.383

APÊNDICE D – Coordenadas de referência observações e desvios para avaliação altimétrica.

	MDT - Z (m) - Ref.	L1	L1 - Integração	L1/L2	Ref-obs	Ref-obs	Ref-obs
					$\Delta Z$ (m)	$\Delta Z$ (m)	$\Delta Z$ (m)
1	627.282	626.436	628.048	627.794	0.846	-0.766	-0.512
2	628.705	626.42	629.51	628.666	2.285	-0.805	0.039
3	627.183	626.539	627.493	626.96	0.644	-0.31	0.223
4	627.192	626.636	627.413	627.329	0.556	-0.221	-0.137
5	627.178	626.636	627.64	627.399	0.542	-0.462	-0.221
6	627.167	626.675	627.569	627.418	0.492	-0.402	-0.251
7	627.219	626.596	626.676	627.621	0.623	0.543	-0.402
8	626.57	625.78	626.26	627.139	0.79	0.31	-0.569
9	626.839	625.751	626.821	626.972	1.088	0.018	-0.133
10	626.013	625.76	625.84	625.728	0.253	0.173	0.285
11	626.198	625.759	626.557	625.561	0.439	-0.359	0.637
12	640.137	639.489	639.969	640.264	0.648	0.168	-0.127
13	640.524	639.849	639.929	640.978	0.675	0.595	-0.454
14	640.798	639.89	639.97	641.285	0.908	0.828	-0.487
15	640.662	640.229	640.349	640.874	0.433	0.313	-0.212
16	641.1	640.38	640.383	641.599	0.72	0.717	-0.499
17	640.843	640.509	641.174	640.956	0.334	-0.331	-0.113
18	640.651	640.623	640.676	640.844	0.028	-0.025	-0.193
19	641.543	640.883	642.2	641.683	0.66	-0.657	-0.14
20	641.492	640.821	642.16	642.043	0.671	-0.668	-0.551
21	641.373	640.789	641.954	641.437	0.584	-0.581	-0.064
22	641.404	641.045	641.76	641.205	0.359	-0.356	0.199
23	641.484	640.937	642.028	641.911	0.547	-0.544	-0.427
24	639.854	640.789	640.456	639.139	-0.935	-0.602	0.715
25	640.668	640.769	640.766	640.687	-0.101	-0.098	-0.019
26	639.284	640.227	640.224	639.139	-0.943	-0.94	0.145
27	639.934	639.852	640.013	639.95	0.082	-0.079	-0.016
28	640.033	639.622	640.441	639.72	0.411	-0.408	0.313
29	639.845	639.15	640.537	640.442	0.695	-0.692	-0.597
30	639.823	639.357	640.286	639.455	0.466	-0.463	0.368
31	639.725	638.999	640.448	640.353	0.726	-0.723	-0.628
32	638.78	638.102	639.455	638.2	0.678	-0.675	0.58
33	638.818	638.046	639.587	639.492	0.772	-0.769	-0.674
34	638.744	638.156	639.329	638.254	0.588	-0.585	0.49
35	637.026	639.13	638.127	637.166	-2.104	-1.101	-0.14
36	639.875	639.468	640.279	639.601	0.407	-0.404	0.274
37	640.306	639.898	639.901	640.031	0.408	0.405	0.275
38	640.47	639.821	639.824	639.954	0.649	0.646	0.516
39	641.105	640.658	640.661	640.791	0.447	0.444	0.314
40	641.367	640.851	640.854	640.984	0.516	0.513	0.383
41	641.435	640.923	641.226	641.056	0.512	0.209	0.379
42	640.698	640.589	640.592	640.674	0.109	0.106	0.024
43	640.905	640.334	640.319	640.467	0.571	0.586	0.438
44	640.868	640.319	640.304	640.482	0.549	0.564	0.386
45	640.712	640.267	640.412	640.28	0.445	0.3	0.432
46	640.796	640.236	641.371	640.264	0.56	-0.575	0.532
47	640.603	640.155	639.992	640.269	0.448	0.611	0.334
48	640.568	640.1	641.051	640.154	0.468	-0.483	0.414
49	640.659	640.083	639.492	640.227	0.576	1.167	0.432
50	640.6	640	641.215	640.168	0.6	-0.615	0.432
51	640.542	639.893	639.229	640.776	0.649	1.313	-0.234
52	640.319	639.738	640.915	639.787	0.581	-0.596	0.532
53	640.276	639.683	639.668	640.244	0.593	0.608	0.032
54	640.316	639.667	639.652	639.709	0.649	0.664	0.607
55	639.932	639.28	639.265	639.622	0.652	0.667	0.31
56	639.565	638.86	638.845	639.438	0.705	0.72	0.127
57	639.492	638.751	638.736	639.073	0.741	0.756	0.419
58	639.355	638.619	638.604	638.911	0.736	0.751	0.444
59	639.23	638.454	638.439	638.752	0.776	0.791	0.478
60	639.063	638.322	638.307	638.665	0.741	0.756	0.398
61	638.923	638.193	638.968	639.311	0.73	-0.045	-0.388
62	638.87	637.988	639.767	638.545	0.882	-0.897	0.325
63	638.861	637.904	639.833	639.109	0.957	-0.972	-0.248

Análises estatísticas	L1	L1 (loosely-coupled)	L1/L2
Média dos Erro Altimétrico	0.6394127	0.54684127	0.343920635
Desvio Padrão Altimétrico	0.3532412	0.277236373	0.182820404
Mediana	0.6	0.585	0.379
Coefficiente de Variação	0.5524463	0.50697778	0.531577304