



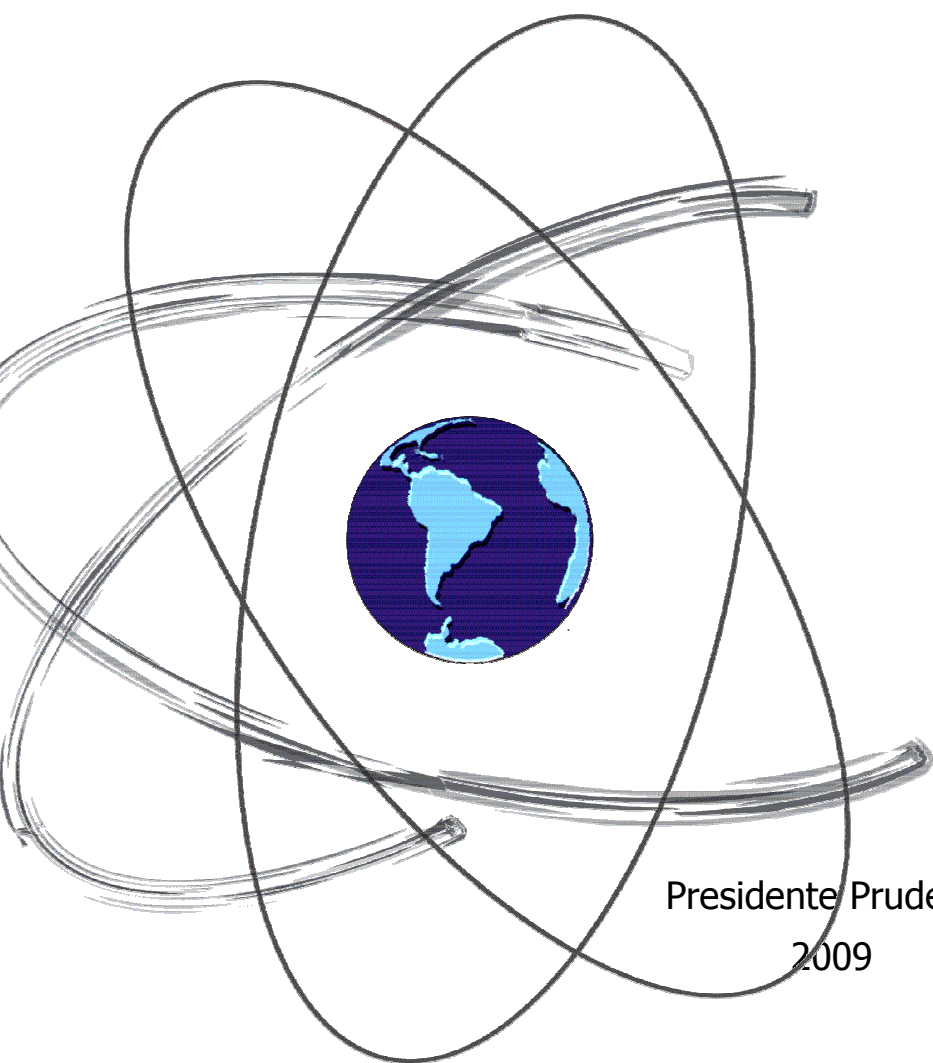
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

THIAGO TIEDTKE DOS REIS

**Estudo e Implementação de Técnicas de
Sincronismo de Dispositivos para o
Georreferenciamento de Imagens Digitais**



Presidente Prudente

2009



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

THIAGO TIEDTKE DOS REIS

Estudo e Implementação de Técnicas de Sincronismo de Dispositivos para o Georreferenciamento de Imagens Digitais

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo de Oliveira Camargo

Presidente Prudente

2009

Reis, Thiago Tiedtke dos.
R313e Estudo e implementação de técnicas de sincronismo de dispositivos
para o georreferenciamento de imagens digitais / Thiago Tiedtke dos
Reis. - Presidente Prudente : [s.n], 2009
xvii, 111 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade
de Ciências e Tecnologia
Orientador: Antonio Maria Garcia Tommaselli

Banca: Edson Aparecido Mitishita, Julio Kiyoshi Hasegawa
Inclui bibliografia

1. Sincronismo. 2. Georreferenciamento direto. 3. Fotogrametria
digital. I. Autor. II. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Ciências e Tecnologia. III. Título.

CDD(18.ed.) 621.71

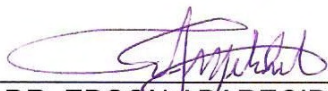
BANCA EXAMINADORA



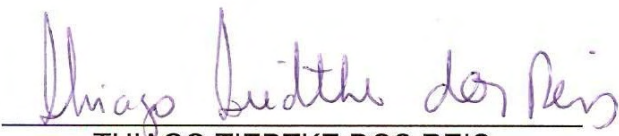
PROF. DR. ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI
(ORIENTADOR)



PROF. DR. JÚLIO KIYOSHI HASEGAWA
(FCT/UNESP)



PROF. DR. EDSON APARECIDO MITISHITA
(UFPR)



THIAGO TIEDTKE DOS REIS

PRESIDENTE PRUDENTE (SP), 25 DE SETEMBRO DE 2009

RESULTADO: APROVADO

DADOS CURRICULARES

Thiago Tiedtke dos Reis

Nascimento: 14/09/1978

Filiação: Francisco Vilela dos Reis
Irene Tiedtke dos Reis

2001-2006 Curso de Graduação
Bacharelado em Engenharia Cartográfica
Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP

2007-2009 Curso de Pós-Graduação
Mestrado em Ciências Cartográficas
Área de Concentração: Aquisição, Análise e Representação de Informações
Espaciais
Linha de Pesquisa: Computação de Imagens
Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP

DEDICATÓRIA

*À minha mãe Irene, meu pai
Francisco (in memoriam), minhas irmãs Daniela e Yvi,
e à minha namorada Tathiana.*

AGRADECIMENTOS

O autor deste trabalho deseja externar seus mais sinceros agradecimentos a todos que em algum momento se envolveram ou colaboraram com a realização desta pesquisa, e em particular:

A toda à minha família, em especial à minha mãe Irene, por sempre ter cultivando em mim a idéia de continuar meus estudos, por se esforçar para que eu e minhas irmãs nos tornássemos pessoas corretas e bem sucedidas na vida, e por proporcionar carinho e força para suportar os momentos de dificuldade.

À minha namorada Tathiana, pela extrema compreensão e paciência no período de desenvolvimento deste trabalho, sempre compartilhando comigo momentos de dificuldade, e cedendo sua atenção e carinho para que eu pudesse continuar mesmo quando tudo parecia dar errado.

Ao professor Antonio Maria Garcia Tommaselli, pela amizade, paciência e por proporcionar tantos conhecimentos e ensinamentos profissionais e pessoais, que serão sempre lembrados e aplicados.

Da mesma forma, ao amigo Roberto da Silva Ruy, pela convivência e amizade, pelos infinitos ensinamentos profissionais e pessoais, pela confiança depositada em mim, e pela imensa ajuda na realização deste trabalho.

Ao professor Paulo de Oliveira Camargo, pela ajuda na organização, correção, e diversas sugestões para a melhoria deste texto.

Aos professores: Maurício Galo, João Francisco Galera Monico, Julio Hasegawa, Mônica Decanini e Maria de Lourdes, pelas sugestões sempre pertinentes, além dos momentos de conversa e descontração no Departamento de Cartografia.

Aos amigos da Engemap, em especial ao Marcelo Pacheco, Eduardo Borges, Roberto Mantovani, Flávio Picinini, Adriano Brambila e Glauter Camilo, por auxiliar em etapas importantes de desenvolvimento e testes.

À empresa Engemap Engenharia, Mapeamento e Aerolevante e seus colaboradores, que disponibilizaram a estrutura e aeronave para a execução deste trabalho.

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC): Érico, João Paulo, Guilherme, Marcelo "Gaúcho", Tiago Samizava, Juliano Fazan, Eduardo "Goiano", Rodrigo "Paulista", Luiz Dalbelo, Wesley Polezel, Lígia Mancini, Paula Langhi, Fernanda Puga, Maria Lígia e todos os demais amigos, pelas idéias compartilhadas,

pelas conversas do café, pelos ótimos momentos nas confraternizações e eventos, proporcionando um grande enriquecimento pessoal e profissional.

Ao amigo Guilherme Poleszuk dos Santos Rosa, pela sua extrema dedicação aos amigos, e por suas dicas sempre pertinentes e importantes.

Aos amigos Aparecido Hermógenes Leite, Délio Tomaz e Neimar Mena, pela companhia mesmo que virtual e quase sempre durante longas madrugadas, ajudando a suportar os momentos de cansaço e exaustão.

À CAPES, pela concessão de uma bolsa de estudos durante o período da realização deste trabalho.

E a todos os funcionários da UNESP de Presidente Prudente (Kátia, Dona Geni, “Paulão” do LatoGeo, entre outros), por ajudarem diariamente esta instituição a proporcionar a nós estudantes e pesquisadores, o ensino público, gratuito e de qualidade.

RESUMO

Atualmente, sensores de posição e orientação podem ser adquiridos e integrados com um custo relativamente baixo, fornecendo resultados promissores em aplicações como o mapeamento. Neste contexto, câmaras digitais de pequeno e médio formato proporcionam novos horizontes aos processos de mapeamento, devido às diversas vantagens sobre sistemas convencionais, como custo reduzido, pequenas dimensões, menor peso e fácil manejo. Mas, fatores como estabilidade geométrica e resolução dos sensores ainda podem se tornar limitantes para determinadas aplicações, devendo ser observados e corrigidos nos processos de produção. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo o estudo e implementação de *hardware* e *software* para permitir o sincronismo entre o receptor GPS e câmaras digitais para aplicações de mapeamento. O sincronismo baseou-se no uso do sistema operacional Linux com modificações em seu núcleo, juntamente com o *software* NTP, responsável por sincronizar o relógio do computador usando uma referência de tempo externa, no caso o PPS de um receptor GPS. A validação foi realizada comparando-se diretamente os instantes registrados pelo sistema comercial SPAN-CPT e a técnica proposta neste trabalho. Além disto, os Centros Perspectivos determinados pelas técnicas implementadas foram usados em experimentos com fototriangulação de um bloco de imagens, possibilitando a análise das discrepâncias da fototriangulação nos pontos de verificação. O resultado do sincronismo apresentou pequenas discrepâncias em relação ao sistema comercial, implicando na determinação das coordenadas dos CPs com boa qualidade, permitindo seu uso em mapeamento e em outras aplicações.

Palavras chave: Sincronismo, Georreferenciamento Direto, Fotogrametria Digital.

ABSTRACT

Currently, position and orientation sensors can be acquired and integrated with affordable costs, providing valuable results in mapping applications. In this context, small and medium format digital cameras are offering new horizons in mapping processes, due to several advantages when compared to conventional systems, like: low cost, low size, less weight and easy of handling. However, its internal stability and resolutions can limit use in some applications. This work aims at the study and implementation of hardware and software components for synchronization of a GPS receiver and digital cameras for mapping applications. Synchronization was based on Linux operational system with a modified kernel, and NTP software, used to synchronize computer time with the GPS reference time, through the 1 PPS pulse. The validation of the implemented system was done by comparing directly the recorded events from a commercial navigation system (SPAN-CPT) and from the proposed techniques. Furthermore, the PC coordinate determined by these techniques were used in an aerial triangulation, enabling the analysis of discrepancies in the checkpoints. The result of the synchronization showed small discrepancies with the commercial system, resulting in the determination of the PC coordinates with good quality, enabling its use in mapping and several other applications.

Key Words: Synchronization, Direct-Georeferencing, Digital Photogrammetry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistemas de navegação x Acurácia Posicional (2D).....	22
Figura 2: IMU Litton LN-200 e processador de navegação (Fonte: Colomina, 2002).	24
Figura 3: Unidade de medida inercial <i>Gimballed</i> (mecânica): (a) esquema, (b) modelo comercial. ..	25
Figura 4: Unidade de medida inercial <i>Strapdown</i> (analítica): (a) esquema, (b) modelo comercial.	25
Figura 5: (a) Núcleo de um acelerômetro MEMS de 3 eixos. (b) ácaro ao lado de engrenagens desenvolvidas com a tecnologia MEMS.	26
Figura 6: Curvas hiperbólicas constantes entre as estações.	27
Figura 7: Receptor DECCA MK12.	28
Figura 8: Receptor LORAN-C ANP-157 para aeronaves.	30
Figura 9: Receptor e antena do sistema eLORAN.	30
Figura 10: Receptor OEM GPS – Dimensões reduzidas.	34
Figura 11: Esquema de funcionamento dos métodos DGPS e RTK.	37
Figura 12: Cristal Piezo-elétrico usado como base de tempo em dispositivos eletrônicos.	44
Figura 13: Relógio Atômico de Césio.	45
Figura 14: Classificação em “Strata” do NTP.....	46
Figura 15: Componentes do Sistema Aerotransportado de Aquisição de Imagens digitais (SAAPI). .	53
Figura 16: Adaptação do sistema SAAPI para funcionar paralelamente às técnicas de sincronismo propostas neste trabalho.....	53
Figura 17: Componentes do sistema de sincronismo da Técnica 1.	54
Figura 18: Etapas do Projeto.	56
Figura 19: Determinação das posições dos eventos de disparo, usando bases de tempos sincronizadas.....	56
Figura 20: Divisor de sinais para 4 receptores GPS.	57
Figura 21: Receptor Novatel SPAN/CPT montado sobre sistema de câmaras.....	58
Figura 22: Receptor GPS Super Star II – Referência de tempo para o computador de controle.	58
Figura 23: Computador de controle.....	59
Figura 24: Hasselblad de 39 MPixel e Sony F-828 de 8 Mpixel infravermelha.	60
Figura 25: Primeira abordagem: <i>Patch</i> do LinuxPPS aplicado ao S.O. Linux.	61
Figura 26: Formato de um sinal PPS.	63
Figura 27: Alinhamento entre o sinal PPS e mensagens NMEA.....	64
Figura 28: Formato da mensagem GPWGA do protocolo NMEA.	64
Figura 29: Ligações do GPS ao computador de controle.	64
Figura 30: Fluxograma do funcionamento do NTP.....	65
Figura 31: Pino para ligação de flash externo.	66
Figura 32: Configurações para sincronismo e registro de eventos.	67
Figura 33: Tensões e Níveis Lógicos de uma Porta Serial – Padrão RS232.	68

Figura 34: (a)Inversor de sinal desenvolvido. (b) Comportamento do sinal através do inversor.....	68
Figura 35: Comportamento do sinal de disparo da câmara.	69
Figura 36: Trecho do arquivo com eventos de disparos com origem na era UNIX.	69
Figura 37: Área do experimento e disposição das faixas.....	72
Figura 38: Equipamentos embarcados em voo.....	73
Figura 39: Vetor (<i>Lever Arm</i>) entre a origem do sistema Fotogramétrico da câmara e o Centro de Fase da antena GPS.....	74
Figura 40: Fluxograma para conversão dos eventos registrados na época UNIX (01/01/1970).....	76
Figura 41: Fluxograma para correção dos valores de <i>offset</i> fornecido pelo NTP.	77
Figura 42: Comportamento do <i>offset</i> entre relógio do computador e de sincronismo.....	78
Figura 43: Discrepâncias entre instantes de disparos registrados pelo receptor SPAN/CPT (técnica 2) e pela técnica 1, sem a correção do <i>offset</i> do NTP.....	79
Figura 44: Discrepâncias entre instantes de disparos registrados pelo receptor SPAN/CPT (técnica 2) e pela técnica 1, usando a correção do <i>offset</i> do NTP.	79
Figura 45: Desvio padrão estimado do processamento dos dados do receptor da técnica 2 (L1/L2). 81	
Figura 46: Interpolação das coordenadas dos CPs em função dos instantes de disparo – somente para técnica 1.....	83
Figura 47: Desvio padrão estimado do processamento dos dados do receptor da técnica 1 (L1).	83
Figura 48: Discrepâncias entre coordenadas dos CPs obtidas pelas técnicas 1 e 2.....	84
Figura 49: Fluxograma do pré-processamento dos dados coletados.	85
Figura 50: Disposição das estações GNSS de referência e a área de voo.	87
Figura 51: Bloco de imagens usadas para autocalibração da câmara, com a disposição dos pontos de apoio.	89
Figura 52: Distribuição dos Pontos de Passagem no bloco de autocalibração.	89
Figura 53: Deslocamento da feição devido à reamostragem da imagem usando os parâmetros da câmara.	92
Figura 54: Configuração do bloco de e disposição dos pontos de Apoio.....	93
Figura 55: Disposição dos pontos de passagem.	93
Figura 56: Discrepâncias entre os parâmetros de OE da fototriangulação e a técnica 1.	95
Figura 57: Discrepâncias entre os parâmetros de OE da fototriangulação e a técnica 2.	95
Figura 58: Disposição dos Pontos de apoio e verificação no bloco de imagens.....	97
Figura 59: Erro Médio Quadrático nos pontos de apoio nos experimentos realizados.....	98
Figura 60: Erro Médio Quadrático nos pontos de verificação – conjunto 1.	98
Figura 61: Erro Médio Quadrático nos pontos de verificação – conjunto 2.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Experimentos e configurações propostas.	52
Tabela 2: Vetores que relacionam os diversos sensores embarcados (<i>Lever Arm</i>).	74
Tabela 3: Discrepâncias entre instantes de disparos registrados pelas técnicas 1 e 2.....	79
Tabela 4: Dados para a autocalibração da câmara	90
Tabela 5: Parâmetros de OI obtidos da autocalibração no CMC.	90
Tabela 6: Resíduos nos pontos de apoio do bloco de autocalibração	90
Tabela 7: Resíduos nos pontos de apoio e verificação.	94
Tabela 8: Discrepâncias entre as coordenadas dos CPs: Fototriangulação x técnica 1 e 2.	94
Tabela 9: Configurações dos experimentos realizados.	97
Tabela 10: nos pontos de apoio e verificação – Conjuntos 1 e 2	98

LISTA DE SIGLAS

APL	<i>Applied Physics Laboratory</i> – Laboratório de Física Aplicada
BIH	<i>Bureau International de l'Heure</i> – Bureau Internacional da Hora
CF	Centro de Fase
CMC	Calibração Multi-Câmaras
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CP	Centro Perspectivo
CPU	<i>Central Processessing Unit</i> – Unidade de Processamento Central
CTP	<i>Conventional Terrestrial Pole</i> – Pólo Terrestre Convencional
DCD	<i>Data Carrier Detect</i> – Detector de dados transportados
DGPS	<i>Differential GPS</i> – GPS Diferencial
DoD	<i>Department of Defense</i> – Departamento de Defesa
eLORAN	<i>Enhanced LORAN</i> – LORAN Melhorado
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FLL	<i>Frequency Locked Loop</i> – Loop Travado na Frequência
GCC	<i>GNU C/C++ Compiler</i> – Compilador GNU C/C++
GLONASS	<i>GLObalnaya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i> – Sistema Global de Navegação por Satélites
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> – Sistema Global de Navegação por Satélites
GNU	GNU Not is UNIX – GNU não é UNIX
GPS	<i>Global Positioning System</i> – Sistema de Posicionamento Global
GSD	<i>Ground Sample Distance</i> – Elemento de resolução no terreno
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGS	International GNSS Service – Serviço GNSS Internacional
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> – Unidade de Medida Inercial
INS	<i>Inertial Navitation System</i> – Sistema de Navegação Inercial
IONEX	<i>Ionosphere Map Exchange Format</i> – Formato de troca de mapa da Ionosfera
LED	<i>Light-Emitting Diode</i> – Diodo Emissor de Luz
LORAN	<i>LOnge RAnge Navigation</i> – Navegação de Longa Distância
LPS	<i>Leica Photogrammetry Suite</i> – Sistema Fotogramétrico Digital da empresa Leica Geosystems

LVTTL	<i>Low Voltage Transistor-Transistor Logic</i> – Lógica Transístor-Transístor de Baixa Voltagem
MIT	<i>Massachussets Institute of Technology</i> – Instituto de Tecnologia de Massachussets
NMEA	<i>National Marine Eletronic Assossiation</i> – Associação Nacional Marítima e Eletrônica
NTP	<i>Network Time Protocol</i> – Protocolo de Tempo para Redes
MEMS	<i>Microelectromechanical Systems</i> – Sistemas MicroEletroMecânicos
OE	Orientação Exterior
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i> – Equipamento Original do Fabricante
OI	Orientação Interior
PC	<i>Personal Computer</i> – Computador Pessoal
PDOP	<i>Positional Dilution of Precision</i> – Diluição da Precisão Posicional
PLL	Phase Locked Loop – <i>Loop</i> Travado na Fase
PPP	<i>Point Precise Positioning</i> – Posicionamento por Ponto Preciso
PPS	<i>Pulse per Second</i> – Pulso por Segundo
RBMC/RIBaC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo/Rede INCRA de Bases Comunitárias
RS232	<i>Recommended Standard 232</i> – Padrão Recomendado 232
RTAI	<i>Real Time Application Interface</i> – Interface para Aplicações em Tempo Real
RTCM	<i>Radio Technical Commission for Maritime Services</i> – Comissão Rádio-Técnica para Serviços Marítimos
RTK	<i>Real Time Kinematic</i> – Posicionamento Cinemático em Tempo Real
SAAPI	Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-processamento de Imagens digitais
SI	Sistema Internacional
TAI	<i>Temps Atomique International</i> – Tempo Atômico Internacional
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i> – Lógica Transístor-Transístor
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UNIX	Sistema Operacional multi-usuários e multi-tarefas
UT	<i>Universal Time</i> – Tempo Universal
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i> – Tempo Universal Coordenado
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i> - Sistema Universal Transverso de Mercator
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i> – Sistema Geodésico Global de 1984

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	18
1.1 INTRODUÇÃO	18
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.2.1 OBJETIVO GERAL	20
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
CAPÍTULO II.....	21
2.1 SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO, POSICIONAMENTO E GEORREFERENCIAMENTO DIRETO	21
2.2 CONTEXTO HISTÓRICO	21
2.3 SISTEMA DE NAVEGAÇÃO INERCIAL	23
2.4 DECCA NAVIGATION SYSTEM.....	27
2.5 OMEGA NAVIGATION SYSTEM	28
2.6 LORAN E CHAYKA	29
2.7 TRANSIT	31
2.8 DORIS	32
2.9 GNSS – GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM	32
2.9.1 GLOBAL POSITIONING SYSTEM	33
2.9.2 GLONASS	34
2.9.3 GALILEO	35
2.9.4 BEIDOU/COMPASS.....	35
2.10 POSICIONAMENTO CINEMÁTICO	36
2.11 GEORREFERENCIAMENTO DIRETO E ORIENTAÇÃO INTEGRADA	38
CAPÍTULO III	41
3.1 SISTEMAS DE TEMPO: MANUTENÇÃO E CONTROLE	41
3.2 TEMPO E ESCALAS DE TEMPO	41
3.3 TEMPO GPS.....	43
3.4 SINCRONIZAÇÃO.....	44
3.5 PROTOCOLO DE TEMPO PARA REDES – NTP.....	46
CAPÍTULO IV	49

4.1 MATERIAL E MÉTODO	49
4.2 MATERIAL	49
4.3 MÉTODO.....	51
4.3.1 CONFIGURAÇÕES DOS SISTEMAS DE SINCRONISMO.....	51
4.4 ETAPAS PARA O DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES	55
4.4.1 O SISTEMA	57
4.4.2 MODIFICAÇÕES NO SISTEMA OPERACIONAL LINUX	60
4.4.3 SINCRONIZAÇÃO ENTRE GPS E O COMPUTADOR	62
4.4.4 COLETA DO INSTANTE DE DISPARO.....	66
 CAPÍTULO V.....	 71
5.1 EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	71
5.2 EXPERIMENTOS COM DADOS REAIS	71
5.3 DETERMINAÇÃO DO VETOR POSIÇÃO DA ANTENA GPS NO REFERENCIAL FOTOGRAMÉTRICO (LEVER ARM) ..	74
5.4 DETERMINAÇÃO DOS INSTANTES DOS DISPAROS DA CÂMARA EM RELAÇÃO AO TEMPO GPS.....	75
5.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS GPS	80
5.6 TESTES DE FOTOTRIANGULAÇÃO COM INJUNÇÕES DE CPS	84
5.6.1 CONVERSÕES ENTRE FORMATOS RAW E TIFF	85
5.6.2 MÓDULOS DE PROCESSAMENTO DOS DADOS GPS/INS	86
5.6.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR DA CÂMARA.....	88
5.6.4 REAMOSTRAGEM E CORREÇÕES GEOMÉTRICAS DAS IMAGENS	91
5.6.5 FOTOTRIANGULAÇÃO DO BLOCO EXPERIMENTAL SOBRE A CIDADE DE ASSIS.....	92
5.6.6 FOTOTRIANGULAÇÃO COM INJUNÇÕES NAS COORDENADAS DOS CPS OBTIDOS PELA TÉCNICA 1.....	96
 CAPÍTULO VI	 101
6.1 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	101
6.2 RECOMENDAÇÕES	103
 REFERÊNCIAS	 105
 APÊNDICE A	 108
 PONTOS DE APOIO E VERIFICAÇÃO DOS EXPERIMENTOS DA SEÇÃO 5.6.6	 108
 ANEXO A.....	 110

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUÇÃO

Pode-se observar nas três últimas décadas um grande avanço no uso de novas tecnologias, principalmente em áreas ligadas à eletrônica e computação. Tais avanços têm proporcionando novos horizontes para pesquisa e desenvolvimento. Aliado a isso, a produção em série e em escala global destas tecnologias proporcionam custos reduzidos, permitindo que pequenas organizações, instituições de pesquisa e usuários civis tenham acesso facilitado a estas.

Neste contexto, o uso de câmaras digitais de médio formato surge como uma alternativa para serviços de mapeamento, devido ao baixo custo se comparado a sistemas métricos digitais de grande formato. Atualmente, há uma grande disponibilidade de modelos de câmaras digitais no mercado, dentre as quais se destacam as de médio e grande formato. Estas câmaras possuem boa estabilidade interna e grande capacidade de armazenamento de dados, os que as tornam economicamente atrativas para atividades de aerolevanteamento (HABIB e MORGAN, 2003).

Somente o uso de câmaras digitais não implica em aumento da eficiência no mapeamento. Dependendo da dimensão da área a ser mapeada, tanto a operação manual de aquisição (acionamento), como o processamento em sistemas fotogramétricos digitais demanda muito tempo e cuidados (processos de orientação e medição de pontos de passagem), o que pode tornar antieconômico o uso deste tipo de câmaras para projetos maiores.

Combinando-se adequadamente câmaras digitais, sensores de posição e orientação, dispositivos de aquisição, sincronismo e disparo, pode-se obter imagens digitais georreferenciadas com custos relativamente baixos, se comparados aos sistemas existentes no mercado. A acurácia do georreferenciamento direto das imagens será proporcional à precisão dos sensores e interfaces utilizadas.

Neste contexto, a proposta deste trabalho é a implementação e avaliação de técnicas de sincronismo de dados para o georreferenciamento direto de imagens coletadas por câmaras digitais. Como será apresentado na seção de experimentos, obtiveram-se nos resultados de uma fototriangulação, valores de discrepâncias nas

coordenadas dos pontos verificação na ordem de 15 a 30 cm (1 a 2 GSD – *Ground Sample Distance*), levando-se em consideração fatores como:

- Determinação dos parâmetros de orientação interior da câmara em um pequeno bloco de imagens (autocalibração com parâmetros adicionais) e aplicação destes parâmetros a todo o bloco de imagens;
- Determinação do vetor entre o centro perspectivo de cada tomada, e o centro de fase da antena (determinação do *Lever Arm*) GPS (*Global Positioning System*);
- Uso de um Sistema Local de Referência para evitar distorções provocadas por sistemas de projeção, como o UTM (*Universal Transverse Mercator*);
- Uso de Receptores de simples e dupla frequência coletando em modo cinemático e dados pós-processados em modo relativo com três estações de redes GNSS (*Global Navigation Satellite System*) ativas.

Foram estudadas diversas configurações de coleta de dados, a partir de interfaces eletrônicas, algoritmos computacionais, câmaras digitais, receptores GPS e sensores inerciais, resultando numa classificação da precisão do georreferenciamento direto para as configurações apresentadas, bem como na implementação física de algumas das alternativas estudadas e sua avaliação experimental em situações reais.

A utilização do sistema proposto (Linux e receptor de simples frequência) permite a montagem de um sistema de custo inferior aos sistemas comerciais e com exatidão compatível com as aplicações de mapeamento.

Por fim, é importante ressaltar que este trabalho utilizou recursos do projeto PIPE desenvolvido pela empresa Engemap em parceria com o Departamento de Cartografia da UNESP, e financiado pela FAPESP (processo n. 04/09217-3), intitulado: "Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-Processamento de Imagens Tomadas com Câmaras Digitais (SAAPI)", além de equipamentos do projeto ARMOD (Automação dos processos de Reconstrução e orientação de MODElos usando imagens digitais), financiado pelo CNPQ, (processo n. 472322/2004-4).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral o estudo e a implementação de *software* e *hardware*, bem como a avaliação experimental de técnicas de sincronismo de dispositivos para a obtenção de informações para o georreferenciamento direto de imagens digitais.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Definir configurações do sistema de coleta, no que se refere ao nível de precisão do sincronismo em função dos sensores utilizados na plataforma de coleta;
- Definir o método de sincronismo adequado para cada configuração de coleta de dados estabelecida;
- Desenvolver dispositivos de *hardware* para comunicação, disparo e sincronismo para cada configuração proposta;
- Programar módulos computacionais para controle de disparos, sincronismo de dados e controle dos sensores do sistema de coleta;
- Realizar testes simulados em laboratório e experimentos reais em voos com o sistema de aquisição SAAPÍ;

CAPÍTULO II

2.1 SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO, POSICIONAMENTO E GEORREFERENCIAMENTO

DIRETO

O homem sempre teve a necessidade de se locomover de um local a outro para caçar, colonizar, trabalhar, estudar, etc., e retornar à sua origem com segurança. Baseando-se em conhecimentos e tecnologias existentes em cada época, criaram-se métodos para se locomover de maneira planejada sobre a superfície terrestre. Nas épocas das grandes navegações (século XV) os principais objetivos eram colonização e exploração de novas terras. Nos dias atuais, uma simples viagem resgata a idéia de navegação e posicionamento.

Atualmente os sistemas de posicionamento se encontram em um estágio tecnológico muito avançado, podendo-se obter posicionamentos de alta precisão em qualquer local da superfície terrestre. Este avanço foi introduzido principalmente a partir do surgimento do posicionamento por satélites artificiais, como por exemplo, o sistema GPS, que se encontra operacional desde 1983. Diversas nações mantêm constelações de satélites semelhantes ao GPS, que são classificadas como GNSS, como por exemplo, o GLONASS (*GLObalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* - Russo), Galileo (Europeu), Compass (Chinês).

No próximo tópico este assunto será tratado em mais detalhes, fazendo uma breve contextualização dos principais sistemas de navegações desenvolvidos e os que atualmente podem ser utilizados. Navegação e posicionamento estão intimamente ligados ao georreferenciamento direto de imagens, visto que um sistema de posicionamento ou a combinação deles se faz necessária para obter imagens georreferenciadas.

2.2 CONTEXTO HISTÓRICO

Com o avanço tecnológico, diversas técnicas de posicionamento foram desenvolvidas. Observa-se principalmente que os grandes desenvolvimentos nesta área foram iniciados e são mantidos por forças armadas de grandes nações, como os Estados

Unidos. A necessidade de posicionar corretamente tropas no campo de batalha inimigo fez com que essas técnicas fossem aprimoradas e mais tarde, sem momentos de conflito, acessíveis à comunidade civil e científica.

Na Figura 1 é exibido um gráfico que relaciona os sistemas de navegação e sua respectiva acurácia posicional (2D).

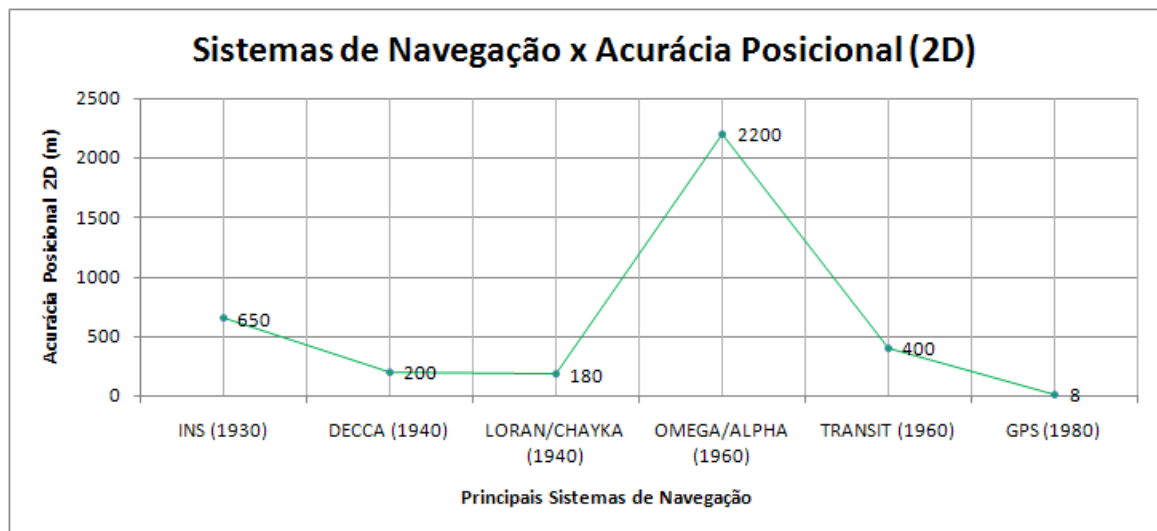


Figura 1: Sistemas de navegação x Acurácia Posicional (2D).

No início do século 20 foram desenvolvidos na Alemanha bússolas baseadas em giroscópios, usados para navegação de embarcações. Os primeiros conceitos ou sistemas analógicos de navegação foram desenvolvidos antes e durante a Segunda Guerra Mundial.

Giroscópios rudimentares começam a ser desenvolvidos para guiar experimentos com foguetes realizados por Robert Godard. Charles S. Draper, dos laboratórios MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), demonstrou pela primeira vez em 1949 os conceitos de um sistema de navegação inercial (INS – *Inertial Navigation System*) - Um sistema de navegação que não necessitava de sinais de rádio externos para funcionar. Com o avanço da eletrônica, estes dispositivos passaram a se tornar mais confiáveis, sendo usados para auxiliar na navegação de aeronaves comerciais e militares, mísseis e famosas missões espaciais (JEKELI, 2001).

Observa-se que para todos estes sistemas desenvolvidos, principalmente a partir da Segunda Guerra Mundial, o maior avanço se deu devido ao uso de sinais de rádio transmitidos de estações terrestres com posições conhecidas.

Estes eram compostos por vários transmissores de rádios de alta potência, operando em frequências muito baixas (de 90 a 110 kHz) do espectro eletromagnético. Desta forma, um receptor que fosse capaz de sintonizar os sinais das várias estações, usando técnicas de multilateração, realizaria a determinação de sua posição.

Alguns destes sistemas estão em operação até hoje, como é o caso de estações terrestres eLORAN (Enhanced LORAN) para a eventual falha dos sistemas por navegação por satélite. Outros sistemas de navegação terrestre foram desenvolvidos por diversas nações, mas desativados com o passar do tempo, e principalmente pelo advento da navegação por sinais de rádio transmitidos por satélites artificiais.

A partir do final da década de 60, novos sistemas de navegação passaram a ser compostos por satélites artificiais em órbita terrestre. O TRANSIT foi o primeiro sistema de posicionamento por satélite operante até o final de 1996, seguido após quase duas décadas pelo GPS, operante e modernizado até os dias atuais (SEEBER, 2003).

Os sistemas de navegação e posicionamento que já foram desenvolvidos são listados a seguir, e serão tratados nos próximos tópicos:

- Sistemas de Navegação Inercial – Década de 30;
- DECCA Navigation System – Década de 40;
- LORAN e CHAYKA (Rússia) – Década de 40;
- OMEGA (EUA) / ALPHA (Rússia) – Década de 60;
- TRANSIT – Década de 60;
- GNSS (GPS – Década de 80, GLONASS, Galileo, Beidou/Compass) –
Sistemas baseados em navegação por Satélites.

2.3 SISTEMA DE NAVEGAÇÃO INERCIAL

É um sistema composto por sensores e um computador que continuamente registra a posição, orientação e velocidades de uma plataforma não necessitando de referências ou sinais externos. Os sensores medem forças de aceleração lineares e angulares exercidas sobre o mesmo, em relação a um referencial inercial. Os sensores presentes em um sistema de navegação inercial são giroscópios e acelerômetros, além de outros sensores de movimento.

Ao se iniciar o sistema inercial, deve-se primeiro fazer a determinação da origem (gravidade local e norte geográfico), também chamado de alinhamento. Desta forma,

determina-se o sistema de referência, que é um sistema local. A partir daí a IMU (*Inertial Measurement Unit* – Unidade de Medida Inercial) atualiza sua posição e velocidade pela integração das informações recebidas dos diversos sensores que a compõe.

Desta forma, o INS navega de forma autônoma, não necessitando de sinais externos para funcionar. Porém é um sistema que acumula erros no posicionamento com o passar do tempo, devido à característica de integração das observações (feitas pela IMU) e os próprios erros dos sensores (SCHERZINGER, 2001).

A Figura 2 ilustra a unidade de medida inercial, e o computador de navegação, também chamado de processador de navegação.

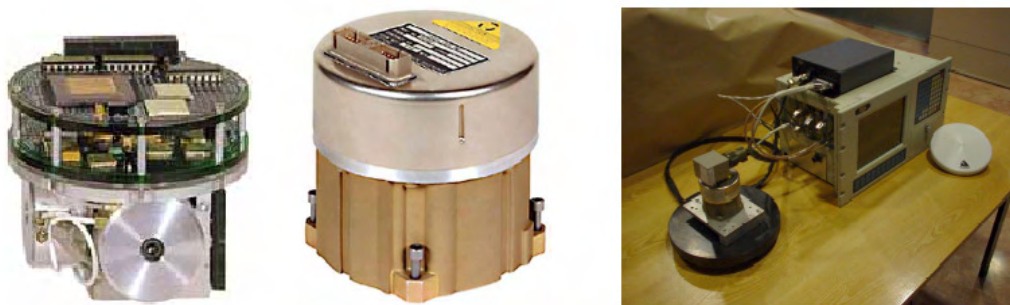


Figura 2: IMU Litton LN-200 e processador de navegação (Fonte: Colomina, 2002).

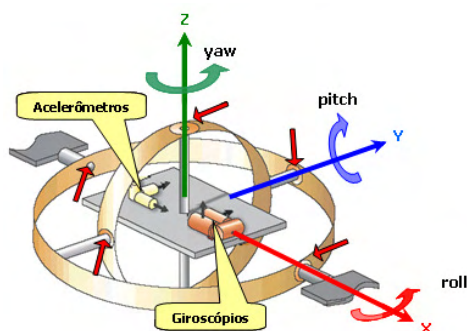
Historicamente o sistema inercial teve seu desenvolvimento com a finalidade de guiar foguetes e torpedos, sendo composto basicamente por giroscópios rudimentares. Com o avanço tecnológico, muitas melhorias foram adicionadas ao sistema inercial, e hoje é um sistema de navegação muito utilizado em aeronaves, para automação na navegação, além do uso militar, para o que qual foi originalmente desenvolvido.

O sistema fornece informações de posição, velocidade, acelerações angulares e lineares, e atitude da plataforma em que se encontra instalado.

Na literatura, alguns autores classificam os sistemas inerciais existentes segundo a maneira pela qual são construídos (KOCAMAN, 2003; KING e FRIN, 1998), e os separam em dois grupos:

- *Gimballed Platform (mecânica)*: Uma plataforma suportada por pivôs, que é estabilizada no espaço por servos-motores, onde são instalados os giroscópios e acelerômetros. É um sistema de alta precisão, porém de construção muito complexa, o que as torna de custo muito elevado (Figura 3a e 3b);

- Strapdown Platform (analítica): É um sistema que não possui componentes móveis. Os giroscópios e acelerômetros e outros sensores de orientação são instalados em uma plataforma de maneira rígida. Desta forma, observações de variações de acelerações lineares e angulares são feitas a taxas muito elevadas, o que implica na capacidade de processamento do computador de navegação. Devido ao mesmo não possuir um sistema mecânico complexo, o custo é muito reduzido (Figura 4a e 4b).



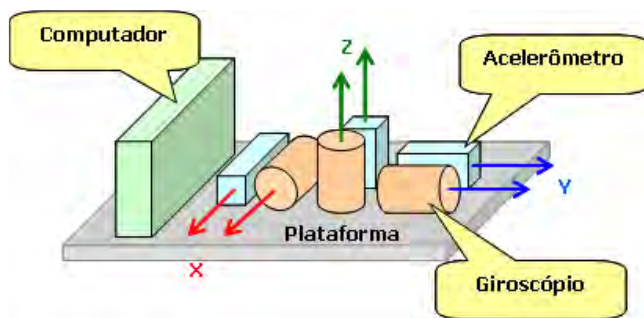
(a)



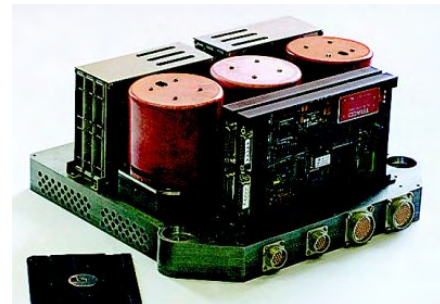
(b)

Fonte: <http://www.elektropribor.spb.ru/ru/img01/zh35.jpg>

Figura 3: Unidade de medida inercial *Gimballed* (mecânica): (a) esquema, (b) modelo comercial.



(a)



(b)

Fonte: <http://www.elektropribor.spb.ru/img/24.jpg>

Figura 4: Unidade de medida inercial *Strapdown* (analítica): (a) esquema, (b) modelo comercial.

Greenspan (1995)¹ apud Skaloud (1999) apresenta uma classificação dos sensores inerciais em relação aos erros no posicionamento em função do tempo da seguinte forma:

¹ GREENSPAN, R. L. Inertial Navigation Technology from 1970-1995. **NAVIGATION, Journal of the Institute of Navigation**. 1995, v. 42, n. 1, p. 165-166.

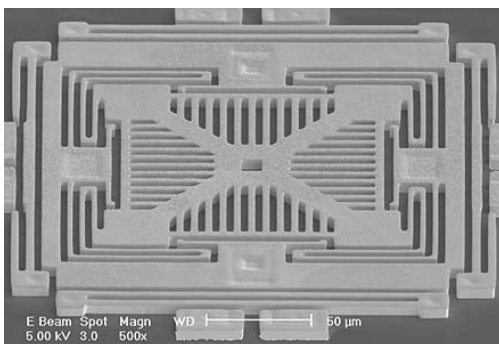
- Estratégicos: unidades inerciais de baixa precisão e que acumulam grande quantidade de erro com o passar do tempo. Necessitam de uma fonte externa de posição (GPS, por exemplo) para corrigir erros na navegação;
- Táticos: Normalmente usados para guiar foguetes ou mísseis. Como a plataforma normalmente não é usada por longos períodos de tempo, a trajetória não é muito afetada pelos erros;
- Navegação: unidades inerciais de alto desempenho e custos elevados, usadas para navegação de alta precisão e por longos períodos de tempo.

Uma contribuição muito importante no que diz respeito aos sensores usados em uma unidade de medida inercial, se deu com o surgimento da tecnologia MEMS (*MicroElectroMechanical Systems* – Sistemas MicroEletroMecânicos).

Isto se deve ao fato de que sensores desenvolvidos com a tecnologia MEMS são de tamanhos muito reduzidos, tendo conseqüentemente, um menor peso, consomem menos energia, com baixos custos em sua fabricação e a confiabilidade de operação quando comparados aos sensores fabricados de maneira tradicional.

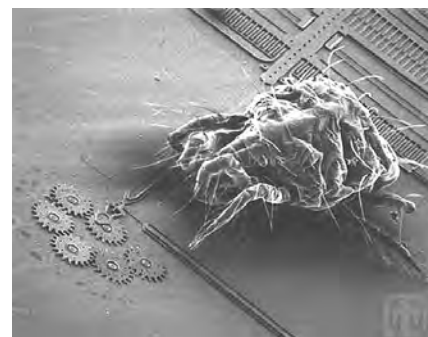
Empresas especializadas em tecnologia MEMS passaram a produzir sensores de baixo custo, promovendo o uso intensivo em diversos tipos de dispositivos como celulares, vídeo games, automóveis (acelerômetros usados como sensores dos dispositivos de *AirBag*), entre muitas outras aplicações. As Figuras 5a e 5b exibem imagens das estruturas internas de dispositivos MEMS.

Um amplo detalhamento sobre o uso de sensores giroscópios e acelerômetros baseados em tecnologia MEMS pode ser encontrado em Lima (2005).



<http://archives.sensormag.com/articles/1203/20/fig1.jpg>

(a)



http://mems.sandia.gov/gallery/images/Bug_1b.jpg

(b)

Figura 5: (a) Núcleo de um acelerômetro MEMS de 3 eixos. (b) ácaro ao lado de engrenagens desenvolvidas com a tecnologia MEMS.

2.4 DECCA NAVIGATION SYSTEM

O sistema de navegação DECCA foi desenvolvido na Segunda Guerra Mundial, usado para posicionar as forças aliadas em território inimigo. Inicialmente também foi usado para navegação de embarcações em regiões costeiras da América do Norte e Europa.

O DECCA usava bases terrestres denominadas cadeias. Cada cadeia consistia de uma estação mestre e duas ou três estações escravas, e recebiam as denominações de vermelha, verde e roxa.

As estações escravas eram posicionadas em vértices de um triângulo equilátero, com a estação mestre ao centro. A linha de base entre as estações mestre-escrava era de 60 a 120 milhas náuticas (111,12 a 222,24 km). Cada estação transmitia um sinal contínuo, e por comparação de diferenças de fase dos sinais emitidos das estações mestres e escravas, resultava-se em um conjunto de linhas hiperbólicas (Figura 6), que recebiam o nome de padrão (MARINHA-BR, 2008).

Neste sistema, as estações que compunham a cadeia não podiam transmitir nas mesmas frequências, pois a diferença de fase entre dois sinais de frequências iguais é constante, o que torna praticamente impossível a separação destes sinais pelo receptor. Desta forma para cada corrente, era determinada uma frequência principal, $1f$, e cada estação escrava transmitia em harmônicos dessa frequência principal. Da mesma forma que o LORAN, os receptores calculavam a interseção das diversas linhas hiperbólicas para determinar a posição do mesmo. Na Figura 7 é mostrado um receptor DECCA MK 12.

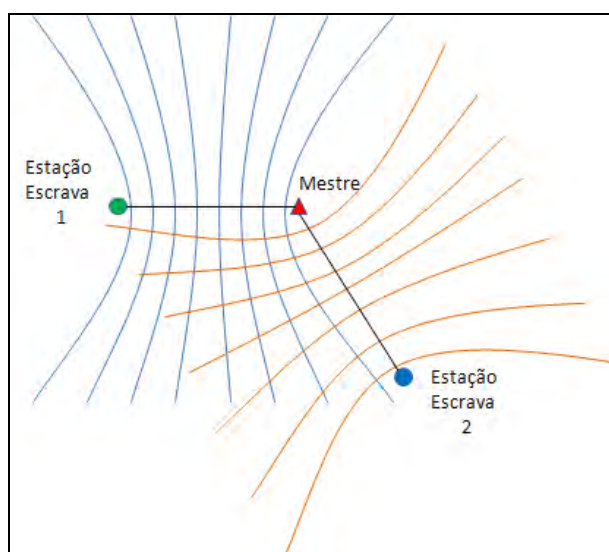


Figura 6: Curvas hiperbólicas constantes entre as estações.

Com este sistema era possível obter posições com acurácia de uma dezena de metros, mas isso era muito variável e esse posicionamento poderia piorar muito em alguns horários, principalmente durante a noite. Os últimos sistemas em funcionamento foram desativados por volta de 2001, devido ao grande sucesso e facilidade proporcionados pelo GPS (GRAHAM e READ, 1998).

Diversos países possuíam cobertura do posicionamento proporcionado pelo sistema DECCA, podendo-se citar boa parte dos países da Europa, Canadá, Golfo da Guiné, Sul da África, Golfo Pérsico, Índia, Austrália, Japão e extremo Oriente Médio.



Fonte: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/94/Decca_Navigator_Mk_12.jpg

Figura 7: Receptor DECCA MK12.

2.5 OMEGA NAVIGATION SYSTEM

Foi um sistema desenvolvido pela Marinha americana no final da década de 60. Era composta por oito estações espalhadas por seis países que faziam parte da UKUSA (aliança entre Estados Unidos, Reino Unido, Austrália, Canadá e Nova Zelândia, com objetivo de realizar o compartilhamento de inteligência entre estas nações). Foi o primeiro sistema de navegação por rádio usado para auxiliar na navegação de aeronaves militares dos Estados Unidos (GRAHAM e READ, 1998).

Neste sistema, cada estação transmitia sinais compostos por quatro padrões de tons únicos, sendo que esses tons eram repetidos pelas outras estações depois de dez segundos. Com um receptor, sintonizando três estações, posicionava-se um objeto com acurácia da ordem de 4 milhas náuticas (7,408 km), usando técnicas de comparações de sinais.

A Rússia, paralelamente aos Estados Unidos, desenvolveu um sistema nos mesmos moldes do OMEGA, denominado ALPHA, no início dos anos 60, e mantém 5 estações em operação até os dias de hoje.

Devido ao sucesso do posicionamento por GPS, o sistema OMEGA foi desativado no final dos anos 90.

2.6 LORAN E CHAYKA

LORAN (*L*ong *R*ange *N*avigation) é um sistema de navegação terrestre desenvolvido também pelas Forças Armadas americanas, nos moldes do GEE (Letra G, pronunciada em inglês, deriva da palavra *Grid* – Grade) Britânico. Foi usado amplamente durante a segunda guerra mundial pelas Marinhas dos Estados Unidos e Reino Unido, mas até hoje se encontra em funcionamento, como alternativa primária em caso de falhas do GPS.

É um sistema composto por rádios transmissores instalados em posições bem determinadas, emitindo sinais com potência da ordem de 100 KWatts até 4 Mwatts, e em frequências muito baixas (entre 90 a 110 kHz). O método de determinação da posição e/ou velocidade de um receptor é feito por multilateração, com sinais sintonizados de várias estações ao mesmo tempo. A Rússia tem a sua contrapartida ao LORAN, com o nome de CHAYKA. O GEE tem alcance da ordem de 644 km, enquanto que o LORAN tem alcance de 1930 km.

O princípio de funcionamento desse sistema baseia-se na diferença de tempo entre a recepção dos sinais em dois receptores distintos. Se as posições de duas estações sincronizadas são conhecidas, então a posição de um receptor pode ser determinada em algum lugar de uma curva hiperbólica onde a diferença de tempo entre os sinais recebidos é constante (NAVY, 1994). Em condições ideais, isto é proporcionalmente equivalente à diferença das distâncias do receptor a cada uma das duas estações (Figura 6).

O posicionamento pelo LORAN é agravado por efeitos elétricos de tempestades magnéticas e efeitos da ionosfera nos períodos de nascer e por do sol. O sinal mais acurado é o sinal próximo à superfície terrestre, em particular ao nível do mar. Durante a noite, sinais indiretos refletidos pela ionosfera causam problemas de múltiplos sinais, degradando ainda mais o posicionamento.

Como são sistemas de transmissores espalhados em alguns locais do planeta, nem todas as regiões recebem a cobertura dos sinais do LORAN. As principais áreas com cobertura são a América do norte, Europa, Japão e algumas regiões do Oriente médio.

2.7 TRANSIT

Foi um sistema de navegação por satélite desenvolvido em cooperação entre os laboratórios APL (*Applied Physics Laboratory*) e o DOD (*Department of Defense*) dos Estados Unidos. Recebe também a denominação de NNSS (*Navy Navigation Satellite System*). É um sistema de navegação que se baseia no efeito Doppler. O efeito Doppler pode ser entendido como a alteração de frequência de um sinal percebida por um observador, devido ao movimento relativo de aproximação ou afastamento entre a fonte emissora do sinal e o observador.

O primeiro satélite do sistema TRANSIT foi lançado em 1962, e liberado para o uso civil em 1967, proporcionando posicionamento e navegações confiáveis por aproximadamente 30 anos. O sistema foi desativado em 31 de dezembro de 1996.

Foi um sistema com propósitos geodésicos, e durante três décadas exerceu influência considerável sobre os posicionamentos geodésicos. É considerado o sistema precursor do GPS, pois muitos métodos de observações e ajustamento usados hoje em dia no sistema GPS tiveram suas origens durante o desenvolvimento do sistema TRANSIT (SEEBER, 2003).

O TRANSIT possuía as seguintes características:

- Navegação em tempo real, com acurácia da ordem de 200 m;
- Não necessitava de receptores ativos;
- Cobertura global;
- Intervalo mínimo para a determinação de duas posições consecutivas de duas horas.

Os satélites que compunham o sistema TRANSIT possuíam órbitas próximas à polar ($\pm 0,5^\circ$ dos pólos), com uma altitude de aproximadamente 1100 km, sendo necessário cerca de sete satélites para a realização da cobertura global.

Os satélites do sistema possuíam algumas especificações, e sinais transmitidos, como segue:

- Duas frequências bem estabilizadas: aproximadamente 150 MHz e 400 MHz, geradas a partir de um oscilador de 5 MHz de quartzo (usadas para observação do deslocamento devido ao efeito Doppler);
- Cronometragem do sinal a cada dois minutos (em relação ao UTC);

- Elementos de órbita predita (efemérides transmitidas), para a determinação da posição dos satélites.

Um dos principais problemas enfrentados pelo TRANSIT, no que diz respeito à determinação de órbitas precisas, e conseqüentemente, ao posicionamento preciso de estações terrestres, foi a determinação do campo gravitacional da terra. Este foi determinado durante a evolução do TRANSIT, sendo que um grande avanço ocorreu com a introdução do campo gravitacional denominado APL 4.5, a partir de 1969, até o campo gravitacional determinado para o WGS 1972 (*World Geodetic System 1972*) e a sua transição para o WGS84 em 1988.

Após todas as melhoras no sistema TRANSIT, principalmente com o uso de efemérides precisas (acurácia da ordem de um a dois metros), podia-se obter coordenadas geocêntricas com acurácia absoluta da ordem de 0,1 a 0,5 metros. Mas para isso eram necessários muitos dias de observação, devido ao tempo entre as transmissões das observáveis pelos satélites do sistema (SEEBER, 2003).

2.8 DORIS

O DORIS (*Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite*) outro sistema de navegação desenvolvido, e de forma semelhante ao TRANSIT, usava os conceitos do efeito Doppler, mas de maneira inversa, ou seja, os sinais são transmitidos de bases terrestres, com frequências estáveis, e observados pelos satélites do sistema. Foi um sistema de posicionamento desenvolvido pela Agência Espacial Francesa. Teve o objetivo de auxiliar a determinação da altitude de satélites de baixa órbita. A primeira missão se deu em 1990, tendo o sistema sido utilizado junto à missão SPOT-2, para fins de sensoriamento remoto.

2.9 GNSS – GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM

O GNSS é um padrão genérico para sistemas de navegação por satélite. Devido aos novos horizontes proporcionados pelos avanços e aplicações do sistema GPS (Estados Unidos) e GLONASS (Antiga União Soviética), outras nações decidiram iniciar construção de seu próprio sistema de navegação por satélites, como citados abaixo:

- Galileo – União Européia;
- Beidou/Compass – China.

Nas próximas seções serão apresentados os sistemas citados e uma breve descrição de sua estrutura e funcionamento. Maior ênfase será dada na descrição do sistema GPS, já que foi o sistema de navegação utilizado neste trabalho.

2.9.1 GLOBAL POSITIONING SYSTEM

O GPS é um sistema de navegação por mensagens de rádio, enviados por satélites, proporcionando navegação precisa em três dimensões, além de uma base de tempo muito confiável e precisa. Foi criado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (*DoD – Department of Defense*) para fins de navegação em aplicações militares. Teve seu desenvolvimento iniciado em 1973. Seu uso foi aberto à comunidade civil e científica em 1983 devido à sua alta acurácia e muitas aplicações surgiram, como: navegação, controle de frotas, agricultura de precisão, cadastro e posicionamento geodésico. Porém só foi declarado totalmente operacional apenas em 1995.

O sistema é atualmente possui número de satélites variável, com um mínimo de 24 satélites, compondo os blocos (blocos IIA, IIR e IIR-M) distribuídos em seis planos orbitais com um ângulo de cinquenta e cinco graus em relação ao Equador. O período de passagem é de doze horas siderais. Desta forma, a qualquer momento e em qualquer posição da superfície terrestre o usuário terá a disposição no mínimo quatro satélites (número mínimo de satélites necessário para realizar o posicionamento) para serem utilizados.

Em relação aos levantamentos geodésicos convencionais (Poligonação, Irradiação, entre outros), o GPS apresenta a vantagem de não necessitar da intervisibilidade entre as estações, além de poder ser utilizado sob quaisquer condições climáticas.

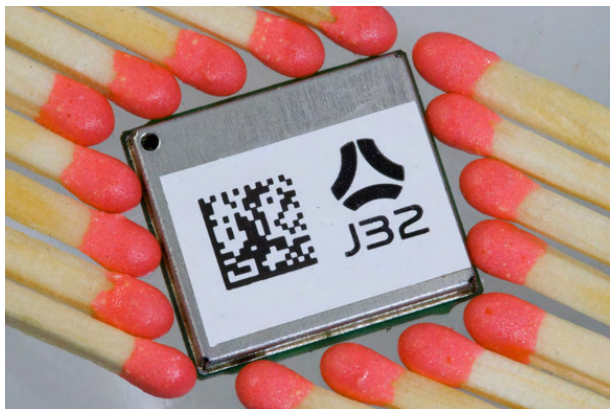
O sistema GPS de navegação usa o princípio baseado na medição das pseudodistâncias entre o receptor e no mínimo quatro satélites que compõem o sistema. Conhecendo-se as coordenadas dos satélites em um referencial, podem-se determinar as coordenadas da antena do receptor. Geometricamente somente três satélites seriam necessários, porém uma quarta observação se faz necessária, devido ao não sincronismo entre as bases de tempo do receptor e dos satélites observados. O termo pseudodistâncias

se dá justamente devido à falta de sincronismo entre os relógios dos satélites e do receptor (SEEBER, 2003).

Diversas técnicas podem ser usadas para determinar a posição de um receptor sobre a superfície terrestre. O posicionamento por ponto simples, usando somente informações recebidas dos satélites (efemérides transmitidas e as pseudodistâncias – Código C/A) pode proporcionar posições com acurácia da ordem de 10 metros.

Para o caso de determinação de posições para o georreferenciamento direto, métodos como DGPS (*Differential GPS*), relativo ou PPP (*Precise Point Positioning*) normalmente são utilizados. Mais detalhes das técnicas de posicionamento e processamento podem ser encontrados em Monico (2008) e Seeber (2003).

Atualmente o acesso às tecnologias de posicionamento que usam o sistema GPS tem sido muito facilitado, principalmente pelo desenvolvimento da microeletrônica e computação. Receptores GPS de dimensões reduzidas e de baixo custo são facilmente incorporados aos mais diversos equipamentos eletrônicos, como por exemplo, telefones celulares, máquinas fotográficas digitais, notebooks etc. A Figura 10 exibe um receptor GPS OEM, muito utilizados em dispositivos eletrônicos, como os já citados.



Fonte: http://www.tdc.co.uk/datasite/gps/_images/j32_1_small.jpg

Figura 10: Receptor OEM GPS – Dimensões reduzidas.

2.9.2 GLONASS

O GLONASS, assim como o sistema GPS, foi desenvolvido com o objetivo de proporcionar posição e velocidade em tempo real. Foi concebido por volta de 1970, na antiga União Soviética, e atualmente é mantido e operado pela Federação Russa de Forças Espaciais. Foi inicialmente desenvolvido para fins militares, mas atualmente é usado por usuários civis.

Apesar de ter seu desenvolvimento iniciado na década de 70, só foi considerado funcional no final de 1995. Foi concebido para possuir 24 satélites em 3 planos orbitais (um a cada 120°), com inclinação de $64,8^\circ$, em órbitas aproximadamente circulares. Os satélites deste sistema transmitem seus sinais em duas portadoras (L1 e L2), mas diferentemente do sistema GPS, cada satélite possui uma frequência principal, e faz uso da técnica denominada FDMA (*Frequency Division Multiple Access* – Múltiplo Acesso pela Divisão da Frequência) para distinguir as mensagens enviadas por diversos satélites ao mesmo receptor. Mais detalhes podem ser encontrados em Monico (2008).

2.9.3 GALILEO

O sistema Galileo nasceu da necessidade dos países da União Européia tornarem-se independentes dos sistemas militares (GPS, GLONASS, Compass).

Os primeiros estudos para a definição e implementação deste sistema datam de julho de 1998, até o lançamento do primeiro satélite, em dezembro de 2005, denominado GEOVE (*Galileo In-Orbit Validation Element* – Elemento de Validação em Órbita). O Galileo será um sistema aberto e global, de controle civil, e deverá ser totalmente compatível com o sistema GPS e GLONASS. Espera-se que até 2013 o sistema esteja completamente funcional.

Conterá com 30 satélites em três órbitas circulares média, com inclinação de 56° em relação ao plano do equador, sendo que três destes estarão ativos, mas poderão ser usados como reserva no caso de falhas em algum dos outros 27 satélites da constelação principal (nove satélites por plano orbital).

O Galileo não foi projetado para fins militares, e possuirá serviços como de busca e resgate, segurança de vida, auxílios a serviços públicos como polícia, bombeiros, etc. e devido a isto, alguns destes serviços deverão ser taxados. O Galileo deverá ter um desempenho no mínimo ao alcançado pelo sistema GPS modernizado, mesmo para aplicações de usuários comuns ou posicionamentos simples (MONICO, 2008).

2.9.4 BEIDOU/COMPASS

O sistema Compass (Beidou-1) é um sistema de navegação Chinês baseado no uso de satélites geoestacionários, e fornece seus sinais a toda a China em algumas regiões vizinhas. Atualizações neste sistema (Beidou-2) prevêem lançamentos de novos

satélites para compor uma constelação semelhante ao GPS, GLONASS e Galileo, além de seus 5 satélites geostacionários já existentes. Mais detalhes podem ser encontrados em Compass (2008).

2.10 POSICIONAMENTO CINEMÁTICO

O método cinemático é uma técnica de posicionamento na qual o receptor GNSS coleta dados enquanto se desloca, possibilitando a estimação de sua trajetória. De acordo com Monico (2008), os dados deste tipo de posicionamento podem ser processados após a coleta (pós-processados) ou em tempo real (RTK – *Real Time Kinematic*):

- Posicionamento Relativo: Este método faz o uso de dois receptores GNSS: um base, que é estacionado em um ponto com coordenadas conhecidas ou previamente determinadas, enquanto que o outro receptor pode estar em repouso ou movimento. Atualmente redes GNSS ativas (RBMC/RIBaC, Rede Ativa do Estado de São Paulo e Rede INCRA de Bases Comunitárias) permitem a realização do posicionamento com apenas um receptor, sendo que o usuário após o levantamento deve acessar dados de umas das estações pertencentes a esta rede ativa da próxima à região do levantamento. Espera-se que este tipo de posicionamento proporcione precisões na ordem de 1 a 5 ppm (parte por milhão), considerando-se bases a distâncias de 10 km. Desta forma o receptor móvel registra as posições na taxa de coleta configurada para este, gerando uma trajetória composta por uma série de pontos (MONICO, 2008). No RTK é utilizada a fase da onda portadora, como a observável, e espera-se que no posicionamento em tempo real, o desvio padrão seja da ordem de poucos centímetros (FREIBERGER JUNIOR e KRUEGER, 2003).

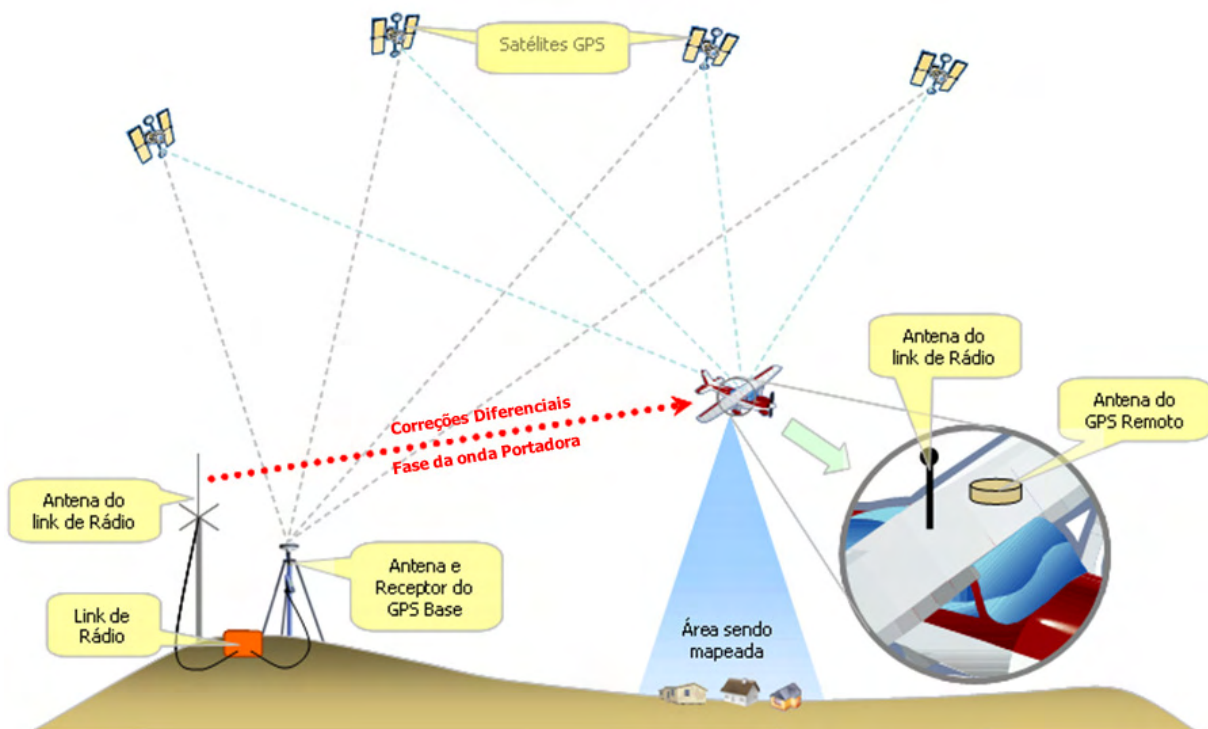


Figura 11: Esquema de funcionamento dos métodos DGPS e RTK.

- **Posicionamento DGPS:** Estas técnicas baseiam-se no fato de que duas estações que rastreiam simultaneamente os mesmos satélites têm seus erros considerados correlacionados. Desta forma, a estação base gera e transmite correções diferenciais para a estação móvel, que aplica esta por sua vez usa estas informações para determinar sua posição em tempo real. Estas correções, geralmente, são transmitidas por um link de rádio usando protocolos (RTCM 104 – *Radio Technical Commission for Maritime Services 104*) específicos para este tipo de troca de mensagens (Figura 11). Atualmente, a tendência é enviar as correções via internet. Para o DGPS, considerando-se o envio de correções a cada 10 segundos, pode-se obter precisões da ordem de 1 m (1σ) em linhas de base de até 50 km (MONICO, 2008). O que diferencia o DGPS do RTK é o tipo da observável usada no posicionamento.
- **Posicionamento por Ponto Preciso:** O posicionamento cinemático por PPP faz o uso de efemérides precisas e informações sobre erros dos relógios dos satélites para realizar o posicionamento. O IGS (*International GNSS Service*) é uma organização responsável por combinar e disponibilizar os dados referentes aos erros de órbita e de relógios dos satélites, para

serem usados em processamentos PPP ou relativo. O PPP realiza o posicionamento através de correções em diversas fontes de erros como (MONICO, 2008):

- Órbitas dos satélites;
- Relógio dos satélites;
- Ionosfera e troposfera;
- Rotação da terra;
- Movimento da crosta terrestre;
- Marés terrestres;
- Movimento do pólo;
- Erro no relógio do receptor, etc.

O processamento de dados cinemáticos com a técnica PPP pode alcançar precisões da ordem de 0,07 m usando-se taxas de coletas de 5 segundos. Mais detalhes destes métodos podem ser encontrados em Seeber (2003) e Monico (2008).

2.11 GEORREFERENCIAMENTO DIRETO E ORIENTAÇÃO INTEGRADA

A fototriangulação tem por objetivo determinar coordenadas de pontos no espaço objeto, parâmetros de orientação exterior (OE) e suas respectivas precisões a partir de observações feitas em fotografias ou imagens digitais. A aerotriangulação é um caso particular da fototriangulação com imagens ou fotos aéreas.

Os parâmetros de orientação interior definem a geometria interna da câmara (distância focal, ponto principal e erros sistemáticos) e são determinados através de processos de calibração. Estes parâmetros podem também ser determinados no processo de fototriangulação (calibração em serviço).

Já a orientação exterior diz respeito à determinação da posição e orientação da câmara para cada imagem no instante de aquisição. Desta forma, conhecendo-se esses parâmetros de orientação exterior de uma imagem, diz-se que a mesma está orientada.

Georreferenciamento então pode ser definido como o processo de se obter a posição, orientação de um objeto em um referencial geodésico, em um dado intervalo de tempo (SKALLOUD, 1999). Em Fotogrametria a determinação dos parâmetros de orientação

exterior por sensores de navegação e orientação (em tempo real ou pós-processados) é conhecida como georreferenciamento direto.

Tradicionalmente faz-se o uso de pontos no terreno com coordenadas bem determinadas (PC - Pontos de Controle), para calcular indiretamente, através de modelos matemáticos que relacionam um ponto na imagem a um ponto no terreno, os parâmetros de orientação exterior de uma imagem (CRAMER, 1999). Porém esta abordagem incrementa os custos e o tempo de processamento no projeto fotogramétrico.

Com o surgimento de novas tecnologias de posicionamento, houve nos últimos anos a crescente utilização de receptores GPS embarcados em aeronaves para execução de voos fotogramétricos, com o objetivo de determinação direta da posição do centro perspectivo da câmara no momento da tomada de cada imagem, além de auxiliar na navegação da aeronave e execução do projeto fotogramétrico.

O uso do GPS pode reduzir, mas não eliminar a necessidade de pontos de controle no projeto fotogramétrico, uma vez que não se dispõe de dados de atitude do sensor. Com isto, a integração entre os sensores GPS e inerciais (GPS/INS) tornou-se uma ferramenta útil para a determinação de forma direta do georreferenciamento das imagens.

O sistema de navegação inercial fornece informações como posição, velocidade e atitude da plataforma por meio de medidas das acelerações angulares e lineares a elevadas taxas de atualização por intervalo de tempo. Integrando-se o GPS com o sistema inercial pode-se obter um significativo aumento na acurácia em levantamentos aéreos, visto que se trata de sistemas complementares (RUY, 2004).

Segundo Tommaselli (2001), o georreferenciamento direto de imagens possibilita algumas vantagens sobre a abordagem tradicional de orientação de imagens, como citado abaixo:

- Possibilita a determinação mais rápida dos parâmetros de orientação exterior, pois a etapa de aerotriangulação pode ser eliminada ou inteiramente automatizada;
- Permite observar fenômenos com variação temporal, que necessitam de uma avaliação imediata (Inundações, vestígios de petróleo, desmatamento, etc.);
- Elimina as limitações de trajetória do voo, não sendo obrigatória a montagem de um bloco, o que permite aplicações como monitoramento de linhas de transmissão, projetos de estradas e outros;
- Permite o controle automático dos disparos da câmara;

- Mesmo se for empregada a aerotriangulação, os algoritmos de correlação funcionarão com melhor rendimento.

Porém devem ser feitas algumas considerações referentes ao uso do georreferenciamento direto de imagens:

- Os parâmetros de OI (Orientação Interior) devem ser conhecidos e acurados e estáveis; a ocorrência de instabilidades dos parâmetros de OI, causadas por variação de temperatura (BRIDI et al., 2007), e outros fatores que afetam diretamente os resultados do georreferenciamento direto;
- Problemas de sincronização entre os sensores: GPS/INS/Câmaras;
- Erros sistemáticos no posicionamento GPS, relacionados à ionosfera, troposfera, multicaminho, etc.;
- Erros sistemáticos inseridos pelo sistema inercial, devido ao uso de modelo funcional não apropriado;
- Não se recomenda o uso de sistemas de projeções, como o UTM (*Universal Transverse Mercator*), em processos de fototriangulação, por introduzir um erro sistemático de escala (JACOBSEN, 2003).

CAPÍTULO III

3.1 SISTEMAS DE TEMPO: MANUTENÇÃO E CONTROLE

Neste trabalho, a correta manipulação e manutenção da base do tempo são usadas para a obtenção de dados de georreferenciamento de imagens tomadas com câmaras digitais. Desta forma, trabalhando com registro de eventos associados a uma base de tempo única, é possível obter as informações de georreferenciamento sem a necessidade de fazer modificações ou intrusões no *hardware* original dos equipamentos.

Neste capítulo, serão tratados assuntos referentes a definições e realizações de escalas de tempo, sincronização de dispositivos, manutenção e controle do tempo usando software NTP (*Network Time Protocol*), e o protocolo NMEA (*National Marine Eletronic Assossiation*) 0183.

3.2 TEMPO E ESCALAS DE TEMPO

Normalmente o tempo pode ser associado à ocorrência de dois eventos em instantes distintos. Sendo assim, a diferença entre os dois instantes define a quantidade tempo, ou intervalo de tempo. Essa quantidade representada pela ocorrência de dois eventos distintos é medida por um relógio. No Sistema Internacional (SI), o segundo foi definido como a unidade de medida de tempo.

Historicamente, o segundo foi definido com base no tempo solar médio (1 segundo = 1/86400 do dia solar médio). Mas como a rotação da terra não pode ser predita, e se comporta de maneira totalmente aleatória esta definição foi substituída em 1954. Nesta nova definição, o segundo foi definido com base na rotação da terra em torno do sol (1 segundo = 1/ 31.556.925,9747 do tempo que a Terra levou para percorrer toda sua órbita em torno do sol, a partir das 12h do dia 04/01/1990). Mas como anteriormente, a órbita também é incerta.

Desta forma, em 1967, definiu-se na 13ª Conferência do Comitê Internacional de Pesos e Medidas, em Paris, que o segundo na escala atômica é definido da seguinte forma no SI (SEEBER, 2003):

"O segundo é a duração de 9.192.631.770 períodos de radiação correspondente à transição entre dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo do Césio 133".

Este valor foi definido após a realização de grande número de observações nos mais acurados relógios atômicos em diversos laboratórios do mundo. Desde 31 de dezembro de 1987 o BIH (*Bureau International de l'Heure*) é responsável por gerenciar e manter a escala de tempo atômico (MONICO, 2008; SEEBER, 2003).

Com a evolução dos sistemas de manutenção de tempo, diversas escalas de tempo surgiram. Escalas de tempo podem ser definidas por convenções utilizadas para medir e representar o tempo. Devem ser estáveis, homogêneas e não fornecer informação ambígua a respeito do tempo.

Todas essas escalas de tempo são baseadas em observações uniformes e repetitivas de fenômenos astronômicos e físicos. O intervalo de tempo entre dois fenômenos consecutivos define a escala de medida em uma escala de tempo particular (SEEBER, 2003).

Segundo Seeber (2003), existem três grupos importantes de escalas de tempo:

- Tempo Sideral (*Sideral Time*) e Tempo Universal (*Universal Time*) – São escalas de tempo associadas à rotação da terra. O tempo universal (UT) é dependente da localização de onde o mesmo é medido além de sofrer influências da posição atual do pólo verdadeiro. Desta forma, após a redução ao CTP (*Conventional Terrestrial Pole* – Pólo Terrestre Convencional), o tempo universal é definido por UT1. O UT1 é escala de tempo fundamental para a navegação astronômica e geodésica, pois o mesmo define a orientação atual do sistema terrestre convencional em relação ao espaço.
- Tempo das Efemérides (*Ephemeris Time*) e Tempo Dinâmico (*Dinamica/Time*) ou Tempo Terrestre (*Terrestrial Time*) - Escala de tempo para descrever os movimentos de satélites. Necessitam de medidas uniformes que podem ser usadas como variáveis independentes nas equações de movimento. São escalas de tempo derivadas de movimentos orbitais de corpos celestes em torno do sol;
- Escala de Tempo Atômica Internacional (*Temps Atomique Internationale*)
- É uma escala de tempo precisa, para medir o tempo de viagem de

sinais em longas distâncias. A época do Tempo Atômico Internacional (TAI) coincide com a época UT1 em 1º de janeiro de 1958. As diferenças entre essas escalas de tempo sofrem ajustes com o passar do tempo. A diferença em 1º de janeiro de 2009: $TAI - UT1 = 33,59$ segundos.

Em 1972, foi introduzido o UTC (*Universal Time Coordinated* – Tempo Universal Coordenado), com o objetivo de proporcionar uma escala de tempo com grande uniformidade e melhor adaptada ao UT1. A UTC e o TAI diferem basicamente por um número inteiro de segundos, também chamados de *leap seconds* (salto de segundos). E a relação entre os dois sistemas é dada por:

$$UTC = TAI - n \text{ (1s)}. \quad (1)$$

O valor de n representa saltos de segundo, esse valor pode ser alterado de acordo com algumas datas, como 1º de janeiro ou 1º de junho, de forma a adaptar a época UTC ao UT1, removendo ou adicionando um salto de segundo. Em 1º de janeiro de 2009, a diferença entre TAI e UTC foi:

$$TAI - UTC_{2009} = + 34 \text{ s}. \quad (2)$$

Ainda em relação às escalas de tempo, deve-se citar o Tempo Local, que é uma adaptação feita à escala de tempo UTC e é representada por diferenças de horas introduzidas pelos fusos horários. É feita de forma a se adequar ao tempo solar local. Países com grandes extensões em longitude podem possuir mais de um fuso horário, como é o caso do Brasil, que possui três fusos horários diferentes: UTC-2, UTC-3 e UTC-4.

3.3 TEMPO GPS

O sistema de posicionamento por satélite, GPS, tem sua escala de tempo própria, denominada Tempo GPS (*GPS Time*). Esta escala difere do tempo UTC por alguns segundos inteiros. Tanto o UTC quanto o Tempo GPS tem sua origem na época 6 de janeiro de 1980. O Tempo GPS não é incrementado por saltos de segundos (SEEBER, 2003). Atualmente, a relação entre o tempo GPS e UTC é de 15 segundos, ou seja:

$$\text{GPS}_{\text{Time}} - \text{UTC}_{2009} = +15 \text{ s.} \quad (3)$$

Mas a correta relação entre o tempo GPS e o UTC é dada pela equação 4.

$$\text{GPS}_{\text{Time}} - \text{UTC} = n \text{ s} - C_0 \quad (4)$$

onde n é um número inteiro de segundos, e C_0 é um termo de correção, com valor da ordem dos nano segundos. Neste trabalho, o tempo GPS será usado como base de tempo para o sincronismo e conseqüente, o georreferenciamento direto.

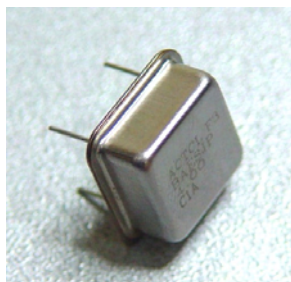
3.4 SINCRONIZAÇÃO

A sincronização diz respeito à coordenação de eventos em uma base de tempo única. É um conceito importante em muitas áreas do conhecimento como eletrônica, telecomunicações, computação, artes, entre outros.

Em sistemas e dispositivos eletrônicos, dos mais simples aos mais avançados, geralmente se torna necessário o uso de bases de tempos controladas e confiáveis, dependendo da aplicação desejada.

Os dispositivos eletrônicos para as mais diversas funcionalidades possuem uma base de tempo interna própria. Essas bases possibilitam a comunicação entre vários dispositivos separados, possibilitando efetuar a sincronia entre os dois dispositivos, e a posterior troca de informações entre estes.

A Figura 12 mostra o aspecto de um cristal piezo-elétrico, que é um tipo de cristal ou cerâmica que ao ser submetido a um esforço mecânico gera uma tensão elétrica em resposta a essa tensão mecânica aplicada, e vice-versa, e dessa forma passa a oscilar em uma determinada frequência. É muito usado em dispositivos eletrônicos que necessitam de uma base de tempo relativamente estável.



Fonte: <http://www.msebilbao.com/tienda/images/78osc4mp.jpg>

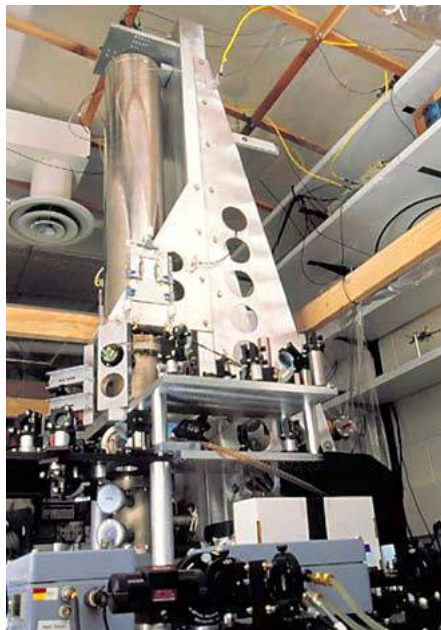
Figura 12: Cristal Piezo-elétrico usado como base de tempo em dispositivos eletrônicos.

Outras bases de tempo de maior precisão já foram desenvolvidas, como por exemplo, os relógios atômicos, que usam elementos químicos como o cézio, hidrogênio e rubídio. Contudo, esses tipos de relógios ou referências de tempos atômicas são dispositivos de custos elevadíssimos, além de serem dispositivos de grande dimensão e peso, inviabilizando o acesso de usuários comuns.

Muitos centros de pesquisas e universidades possuem relógios atômicos interligados em redes, com objetivo de auxiliar na manutenção do horário mundial, mantendo uma referência de tempo precisa em qualquer lugar do planeta. Desta forma, usuários podem se conectar a essas bases de tempo para obter correções e sincronizar o tempo de seu computador pessoal com o servidor de tempo. Deve-se considerar neste caso os erros inerentes ao processo de transmissão das informações de sincronia pela rede.

A Figura 13 mostra um relógio atômico de cézio do Instituto de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos.

Uma propriedade importante do tempo é sua monotonicidade, que significa que o tempo sempre avança. Essa parece ser uma propriedade simples, óbvia e fácil de ser mantida, mas de fato não é. Relógios implementados em software, como é o caso dos relógios de computadores, podem ser facilmente ajustados para representar um tempo no passado.



Fonte: <http://images.encarta.msn.com/xrefmedia/sharemed/targets/images/pho/00012/00012D47.jpg>

Figura 13: Relógio Atômico de Césio.

3.5 PROTOCOLO DE TEMPO PARA REDES – NTP

Um servidor de tempo consiste em um computador, ou uma rede de computadores que obtém a hora de uma referência de tempo confiável, e distribui essa informação aos usuários usando uma rede de computadores.

Normalmente usam-se servidores de tempo com a intenção de manter os horários corretamente ajustados, em aplicações que necessitam de registro de informações com grande precisão na escala do tempo (MILLS, 1990).

Em ambientes computacionais existem diversas implementações de servidores de tempo. Uma das mais utilizadas é o NTP. Trata-se de um software de domínio público que pode ser obtido gratuitamente do site de seus mantenedores (<http://www.ntp.org>), com suporte a diversos sistemas operacionais.

O NTP pode, por exemplo, usar referências de tempo externas como relógios atômicos, sinais de sincronismo de receptores GPS (através da saída 1 PPS – *One Pulse per Second*).

O protocolo possui uma classificação hierárquica que representa o quão distante um computador cliente se encontra do computador que possui a referência de tempo (no caso, o servidor NTP acoplado ao relógio externo de referência recebe a dominação de *stratum 0*). Essa classificação recebe o nome de *clock strata*.

A Figura 14 ilustra esta classificação. As setas azuis indicam uma conexão direta à base de tempo confiável (relógio atômico ou sinal PPS de um receptor GPS), e as setas em vermelho indicam conexões de redes entre os servidores, em um nível inferior à da referência de tempo.

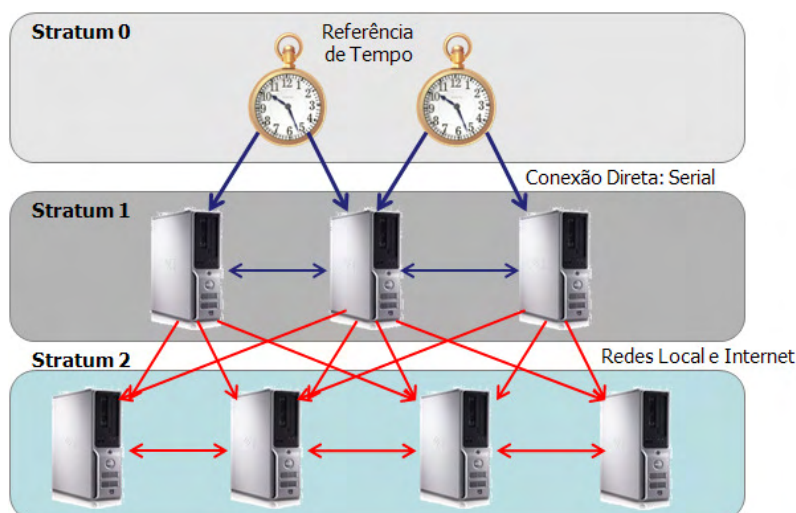


Figura 14: Classificação em "Strata" do NTP.

Os relógios de computadores, como qualquer outro tipo de relógio baseiam-se em três dispositivos:

- Um oscilador: Gera eventos cíclicos a uma taxa constante, ou seja, numa frequência constante, e estes osciladores normalmente são baseados no uso de cristais osciladores de quartzo;
- Um contador: Acumula os ciclos gerados pelo oscilador, usando interrupções no hardware, convertendo essas interrupções em unidades de medidas conhecidas, como segundos, minutos, horas. Cada valor do contador recebe o nome de *timestamp*;
- Um dispositivo responsável por fazer a leitura e visualização do tempo mantido pelo relógio.

Como já mencionado, os relógios podem ser mais ou menos acurados na tarefa de manter o tempo. Desta forma, algumas propriedades relacionadas aos relógios mantidos pelo sistema de tempo NTP serão descritas a seguir (MILLS, 1992):

- Frequência (*Frequency*): É a medida do número de vezes que um mesmo evento ocorre por uma unidade de tempo (usualmente um segundo);
- Acurácia (*Accuracy*): Quanto a frequência ou tempo de um relógio difere de uma referência de tempo padrão, indicando o quanto este relógio está “certo” ou “errado”;
- Deriva (*drift*): É a instabilidade na frequência do oscilador de um relógio, que pode ser causada por fatores externos ao mesmo, como por exemplo: variações na pressão atmosférica, umidade, temperatura, radiações próximas ao relógio e o envelhecimento;
- Envelhecimento (*Ageing*): É a instabilidade na frequência de um oscilador mesmo quando fatores externos estão controlados (os mesmos citados no item deriva), portanto pode ser considerada uma instabilidade interna ao oscilador;
- Estabilidade (*Stability*): É uma medida estatística de como o relógio mantém constante a sua frequência. Refere-se à variação sistemática de frequência com o tempo. Também pode ser chamada de deriva ou tendência.

- Resolução (*Resolution*): É o menor valor de incremento do contador do relógio, que é determinada pelo número de interrupções de hardware.
- Precisão (*Precision*): Variabilidade em torno de um valor médio ajustado pelo NTP em relação à referência de tempo;
- Variação (*Jitter*): Desvios ou erros nas leituras dos relógios. Causado por erros randômicos e de pequena duração na frequência do oscilador do relógio, ou latências devido a muitas interrupções, ou por uso excessivo do processador;
- Deslocamento (*offset*): É a diferença entre dois relógios. No NTP este valor indica o quanto o relógio local deve ser ajustado para ter seu valor igual ao relógio de referência.

CAPÍTULO IV

4.1 MATERIAL E MÉTODO

Nos capítulos anteriores foram abordados assuntos referentes às tecnologias utilizadas neste trabalho bem como a revisão bibliográfica necessária para a contextualização e entendimento do problema de sincronização de dispositivos e georreferenciamento direto de imagens digitais.

Este capítulo trata dos materiais utilizados, bem como da metodologia desenvolvida para permitir o sincronismo entre os dispositivos, visando a obtenção de dados de georreferenciamento das imagens adquiridas com o sistema SAAPI.

4.2 MATERIAL

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram adquiridos ou montados com recursos da FAPESP, via projeto PIPE (RUY, 2008), e de projetos de pesquisa (CNPq e FAPESP) realizados anteriormente na Universidade:

- Equipamentos obtidos com recursos FAPESP (processo n. 04/09217-3):
 - Uma câmara digital Hasselblad *H3D II* - focal 50 mm, com sensor de 39 Megapixel;
 - Um sistema de navegação inercial Novatel SPAN/CPT;
 - Um GPS de navegação – Garmin 76;
 - Um receptor de GPS OEM (L1) – Novatel SuperStar II – usado na coleta de dados brutos para pós-processamento;
 - Software de pós-processamento WayPoint Inertial Explorer, da WayPoint Consulting – versão 8.0;
 - Um computador Via Epia-M 600 MHz, com 1 GB de RAM, Hard Disk de 80 GB, para o registro de eventos e armazenamento dos dados brutos do GPS;

- Um notebook Sony Vaio PGC-K35 – Pentium 4 de 3 GHz – 1GB de RAM - 80 GB de espaço em disco – Usado em testes do sistema e para processamento dos dados GPS/INS coletados;
- Computador Athlon(tm) 64 1.8GHz 2800+ 512MB de memória RAM, 80GB de espaço em disco, uma porta paralela, uma porta serial - Usado em laboratório para desenvolvimento dos componentes do sistema e edição de texto;
- Um receptor de GPS OEM (L1)– Novatel SuperStar II – usado como referência de tempo para o sincronismo dos dispositivos (via pino PPS), e fonte de mensagens NMEA – Projeto ARMOD (processo CNPq n. 472322/2004-4);
- *Software Phocus 1.2* – Conversão das imagens brutas (3fr) para tif;
- Ambiente de desenvolvimento *Code::Blocks 8.02* e *Eclipse Ganymede*;
- Compilador *MinGW/GCC 3.4.5* – Windows 32bit;
- Compilador *GCC 4.3.2* – Linux;
- Pannel de conexão de alimentação padronizado (12 V e 127 V);
- Dispositivo de conversão de sinais LVTTTL/TTL para RS232 e vice-versa;
- Dispositivo conversor e regulador de tensão para câmaras (8 volts) e PC de controle (12 volts);
- Osciloscópio DEGEM System, modelo 112 A, 20 MHz;
- Conjunto de instrumentos de bancada:
 - Multímetro Digital;
 - Freqüencímetro;
 - Gerador de Funções/Sinais;
- Linguagem de programação Tcl/Tk 8.4 e 8.5 – Criação da interface de controle e *scripts* para manutenção do sistema;
- Gerenciador de banco de dados PostgreSQL 8.3 – Armazenamento dos dados de sincronismo, e usado em consultas/ordenação/processos de buscas;
- Uma câmara digital Sony F-828 (8 Megapixels) – FAPESP (processo 02/01886-8);
- Uma aeronave modelo Minuano, de propriedade da empresa Engemap Engenharia e Mapeamentos Ltda;
- Software AutoCad 2000, para a geração de planos de;
- Sistema Fotogramétrico Digital LPS (Leica Photogrammetry Suite);

- GNU Linux Debian 4.0 release 3;
- Linuxpps – Complemento para que o Linux possa manipular eventos PPS – versão 5.0.0.
- Software CMC – Calibração Multi-Câmaras (RUY, 2008).

4.3 MÉTODO

4.3.1 CONFIGURAÇÕES DOS SISTEMAS DE SINCRONISMO

Como já contextualizado nos capítulos anteriores, o sincronismo é muito importante quando se necessita conectar dispositivos e processos. Neste trabalho o sincronismo é o ponto chave para se obter dados de georreferenciamento direto a partir de sensores de posição embarcados e integrados a um sistema de aquisição de imagens aéreas para fins de mapeamento.

Para isso foram definidas técnicas para sincronismo entre os sensores de aquisição de imagens (câmaras digitais), sensores de posição (GPS e GPS/INS) e um computador responsável por registrar em uma escala temporal, eventos referentes à tomada de uma imagem durante um voo. Estas técnicas de sincronização são sintetizadas pela Tabela 1.

As técnicas propostas na Tabela 1 mudam basicamente devido ao uso de diferentes tipos de receptores GPS (responsáveis pela coleta dos dados de posicionamento e pelo sinal de sincronismo), pelas interfaces utilizadas na comunicação e sincronismo de dados.

A técnica 1 apresenta um custo reduzido e acurácia compatível com várias aplicações; a técnica 2 apresenta um custo maior e proporcionalmente maior potencial de acurácia.

Este trabalho fez uso dos equipamentos do sistema SAAPI que é formado por uma plataforma de coleta, composta por sensores ópticos, de posição/orientação, uma unidade de controle e alimentação, computador de navegação, controle e armazenamento (Figura 15). Este sistema também prevê algoritmos de calibração e processamento de imagens e dados. O detalhamento completo do sistema SAAPI pode ser encontrado em Ruy (2008).

Tabela 1: Configurações propostas.

Componentes do sistema	Técnicas de sincronização e coleta a serem implementadas	
	1	2
GPS	-Simplex frequência com saída PPS	- Dupla frequência com saída PPS e registro de eventos no GPS
Técnica de sincronismo de tempo	-NTP -NMEA e PPS via serial	- NTP - NMEA e PPS via serial
CPU e Hardware	- <i>Desktop</i> ou <i>Notebook</i> -Porta Serial -Porta Paralela	- <i>Desktop</i> ou <i>Notebook</i> - Porta serial - Porta paralela
Sistema operacional	-Linux	- Linux
Registro de evento	-Porta Paralela	- Porta paralela - GPS
Erro de Sincronismo	0,001 a 0,01s	< 0,001s
Erro Posicional Esperado (sincronismo)*	0,06 a 0,6 m	-Menor que 0,06 m
Observações	-Pós-processamento dos dados GPS -Erro inserido pelo evento de disparo da câmara (~ 0,001 s)	-Pós-processamento dos dados GPS -Erro inserido pelo evento de disparo da câmara (~ 0,001s)

* velocidade da aeronave: 60 m/s

Além do sistema SAAPI já existente, todos os dispositivos desenvolvidos foram embarcados na mesma aeronave, funcionando de forma paralela durante a aquisição. Tornando-se possível obter no mesmo voo, dados para georreferenciamento direto das imagens adquiridas pelo sistema SAAPI, e também pelo sistema de sincronismo exposto neste trabalho (Figura 16).

Neste contexto, a técnica 2 da Tabela 1 (sistema SAAPI), será considerada como a referência para fins de comparações de instantes e posições dos CPs, visto que os sensores que o compõe (receptor GPS e sistema inercial) proporcionam posicionamentos de alta confiabilidade e acurácia (consultar especificações dos receptores no Anexo A).

Para permitir a execução e testes com as técnicas propostas, foram necessários desenvolvimentos de *hardware* que possibilitaram o compartilhamento de alguns dispositivos existentes no sistema SAAPI (uso da mesma antena GPS e o mesmo evento de disparo da câmara). A Figura 17 mostra os principais dispositivos utilizados neste trabalho, bem como algumas conexões existentes com o sistema SAAPI.

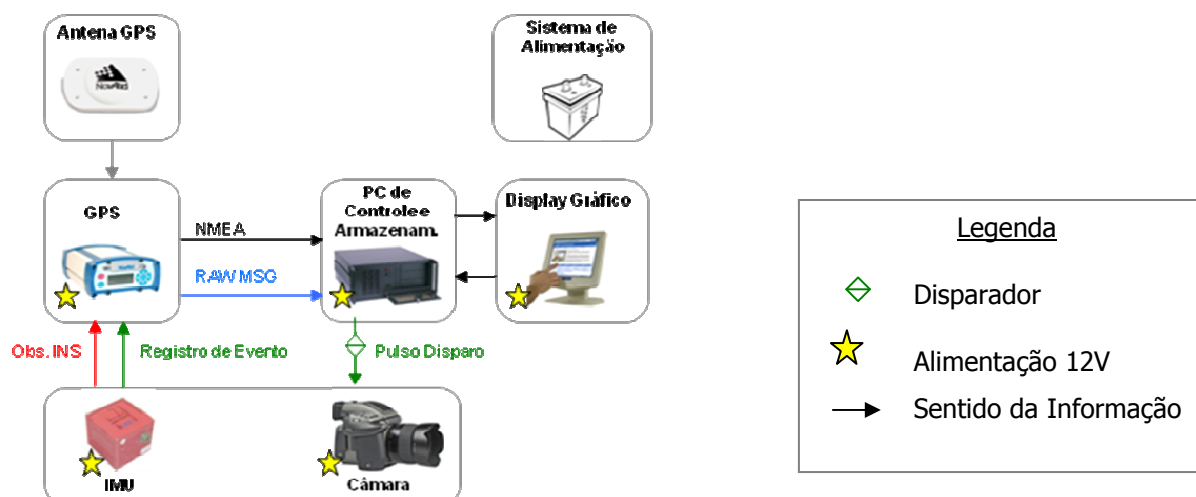


Figura 15: Componentes do Sistema Aerotransportado de Aquisição de Imagens digitais (SAAPI).

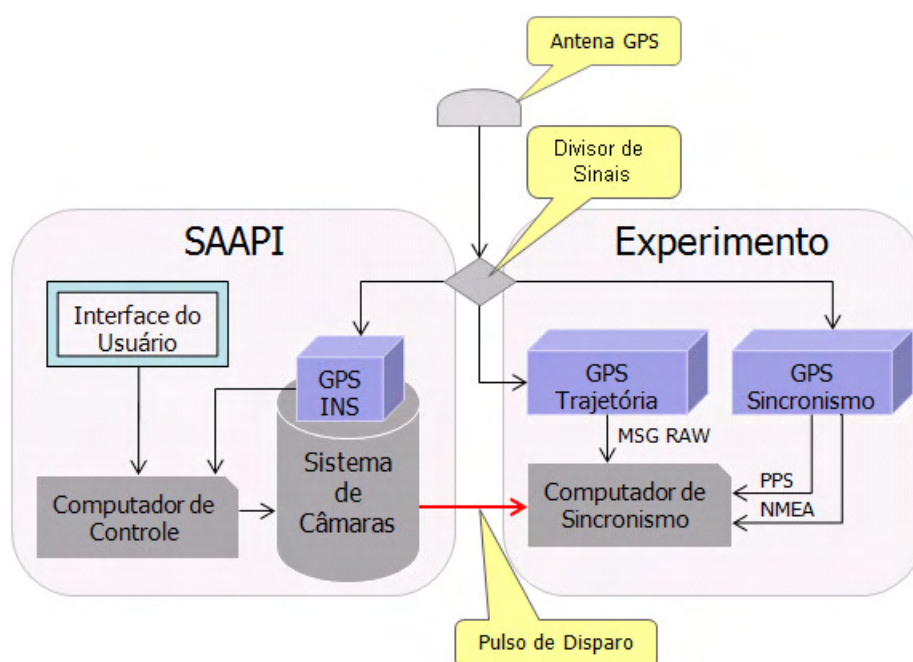


Figura 16: Adaptação do sistema SAAPI para funcionar paralelamente às técnicas de sincronismo propostas neste trabalho

É importante ressaltar que foram usadas duas placas GPS de simples frequência para a Técnica 1. Isto se deve ao fato de que estas placas somente possuem uma saída de dados, configuráveis entre dados brutos para pós-processamento, ou mensagens de navegação NMEA 0183.

Portanto uma placa ficou responsável por enviar ao computador as observáveis da portadora L1 referente à trajetória da aeronave, para pós-processamento, e

o outro receptor foi responsável por gerar as mensagens de navegação NMEA e pulso PPS, para servir de fonte de sincronismo do computador que registra os eventos de disparos.

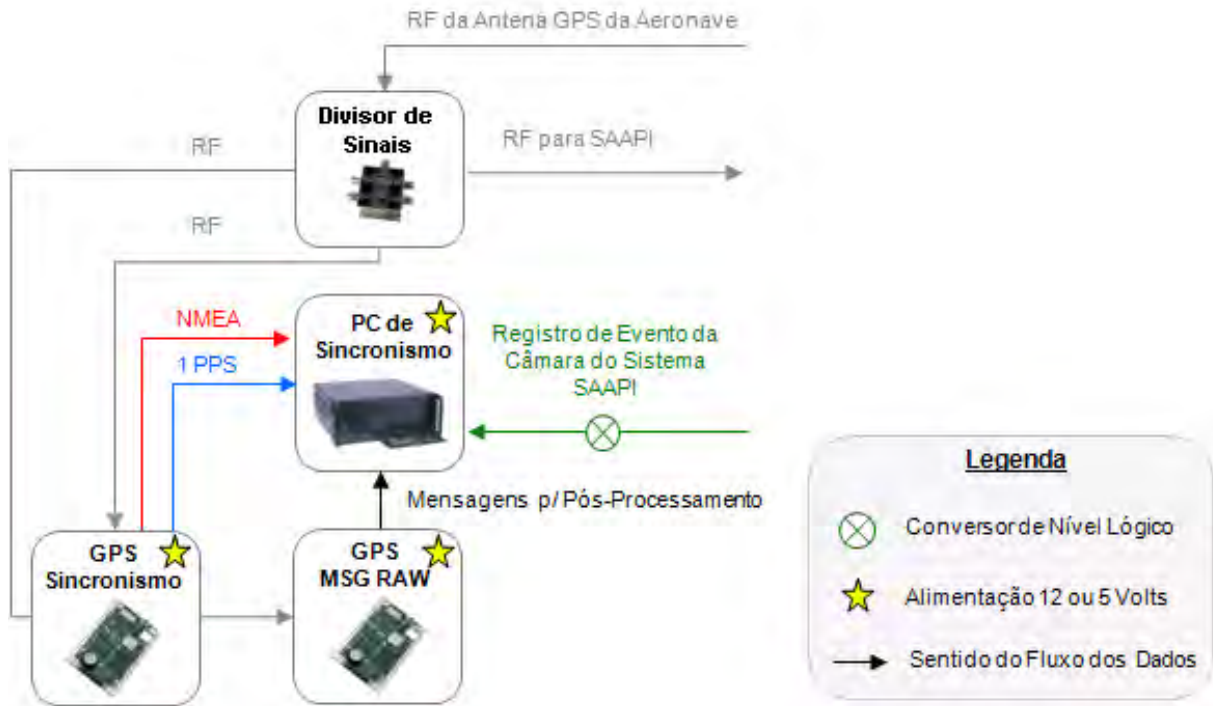


Figura 17: Componentes do sistema de sincronismo da Técnica 1.

Uma solução para tornar o sistema mais compacto e mais barato, é usar apenas um receptor, processando-se em tempo real as mensagens brutas (pseudodistâncias – código C/A) e gerando-se as mensagens NMEA necessárias, inserindo-as novamente no NTP para tarefas de sincronismo.

Outra solução seria o desenvolvimento de um *driver* para o NTP, fazendo com que o mesmo passe a reconhecer as mensagens brutas da placa, e então, usar essas informações juntamente com o pulso PPS, para a realização do sincronismo.

Estas duas soluções não foram implementadas devido à disponibilidade de dois receptores GPS e do divisor de sinal.

Além da ligação física apresentada, foram necessárias várias implementações de algoritmos para registro dos eventos de disparo, por meio da porta serial do computador, bem como para armazenamento dos dados brutos do GPS (usado para determinação da trajetória, no pós-processamento), e posteriormente, a interpolação das coordenadas dos instantes de disparos (CP) em função dos instantes registrados.

Uma parte destas implementações diz respeito à necessidade de manter todos os registros de eventos em uma escala de tempo única, no caso foi adotada a escala de tempo GPS. Desta forma, ao se comparar os instantes dos disparos vindos do sistema SAAPI (marca de evento do SPAN/CPT), e as marcas de tempo registradas pelo computador de sincronismo, não será necessária mais nenhuma conversão, visto que já possuem uma mesma origem (às 0 hora de 06 de janeiro de 1980).

É importante ressaltar a importância do *software* NTP juntamente com o sistema operacional Linux para a tarefa de sincronizar os tempos entre o Receptor GPS e o computador que registra os eventos de disparos.

Foram necessárias modificações nos sistemas operacionais utilizados (Linux e Windows), com o intuito de receber uma referência de tempo externa (Pino 1 PPS do receptor GPS), e então servir de referência de tempo para os demais dispositivos conectados ao sistema operacional.

Definidos os equipamentos, implementações e adaptações no sistema, tomou-se como base o fluxograma da Figura 18 para a realização de cada etapa envolvida no desenvolvimento dos experimentos.

4.4 ETAPAS PARA O DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES

O fluxograma (Figura 18) mostra as etapas do projeto, com relação aos equipamentos, interfaces e configuração de software, e experimentos realizados, que consistiram na aquisição de imagens usando o sistema, comparação com dados de orientação direta vindos de processamentos clássicos (fototriangulação), bem como comparações com dados de pós-processamentos dos dados GPS.

A primeira etapa do projeto é mostrada pela Tabela 1, onde foram especificadas quais as combinações necessárias de equipamentos e algoritmos para testar o sincronismo dos dispositivos do sistema.

Entre as etapas do projeto, apresentadas no fluxograma da Figura 18, ocorreram realimentações responsáveis por determinar quais equipamentos deveriam ser utilizados, visando melhores resultados no sincronismo e, conseqüentemente, no georreferenciamento direto, ou então para contornar problemas técnicos de implementação.

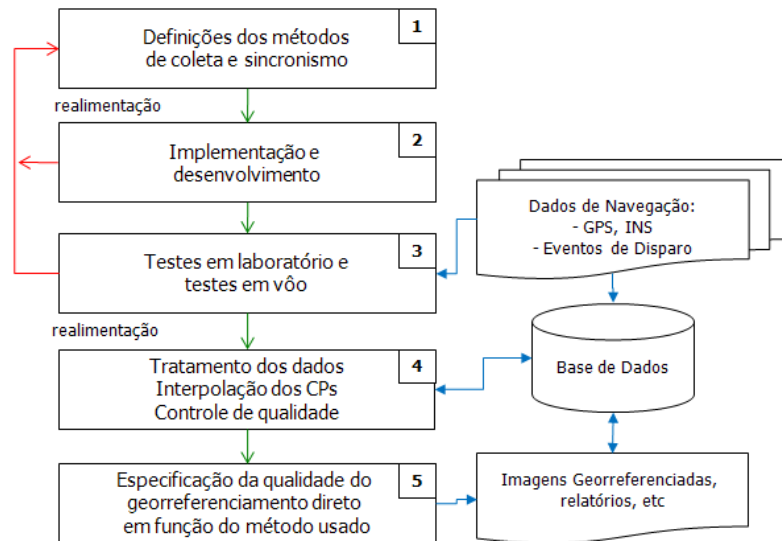


Figura 18: Etapas do Projeto.

Prosseguindo para a próxima etapa, todos os dados coletados são tratados de forma a tornar possível a determinação das posições dos CPs. Isto é feito usando-se interpolações baseadas na trajetória da aeronave e nos instantes de registros de eventos em uma base de tempo comum para os dados GPS e registros de disparo. A Figura 19 demonstra como isto é realizado.

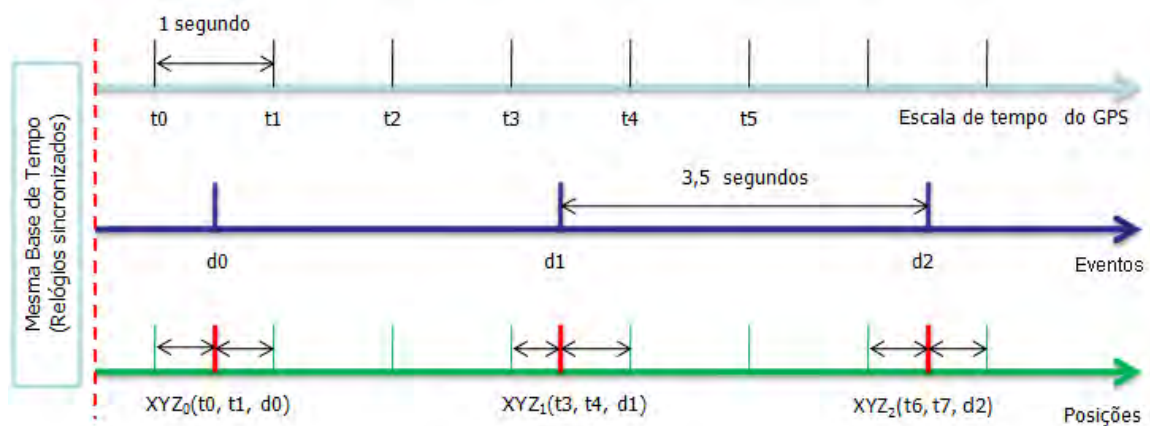


Figura 19: Determinação das posições dos eventos de disparo, usando bases de tempos sincronizadas.

Pela Figura 19 nota-se a escala de tempo do GPS e os registros de eventos referenciados também ao tempo GPS (mesma origem). A escala de tempo GPS é usada como referência de tempo para o sincronismo e para os dados coletados no voo. Os eventos referem-se aos pulsos registrados pelo computador sincronizado com o GPS. A partir de coordenadas de pontos (posições da antena) obtidos do processamento ($t_0, t_1, t_2, \dots$) e utilizando as marcas de tempo dos eventos ($d_0, d_1, d_2, \dots$), interpola-se as posições intermediárias ($XYZ_0, XYZ_1, XYZ_2, \dots$) em função destas marcas de tempo.

Antes de apresentar os procedimentos metodológicos responsáveis pelo sincronismo entre os dispositivos, serão mostrados os dispositivos mais relevantes, com o intuito de proporcionar um panorama geral do sistema.

4.4.1 O SISTEMA

As técnicas de sincronismo propostas são compostas pelos os seguintes equipamentos:

- Sistema de alimentação e distribuição de energia: Composto por uma bateria de 12V e 35A, exclusiva para alimentar os componentes do sistema. Permite que sistema de aquisição e sincronismo funcione de forma autônoma, não dependendo da alimentação da aeronave. Pode ou não ser recarregada durante o voo. Possui também um painel com chaves, fusíveis e LED, proporcionando uma forma segura e rápida de conectar e alimentar os dispositivos do sistema;
- Divisor de sinais para 4 receptores GPS: Possibilita que o sinal captado por uma única antena GPS possa ser usado por mais de um receptor, além de garantir que todas as observações possuam o mesmo centro de fase. A Figura 20 mostra o divisor de sinais instalado na aeronave.



Figura 20: Divisor de sinais para 4 receptores GPS.

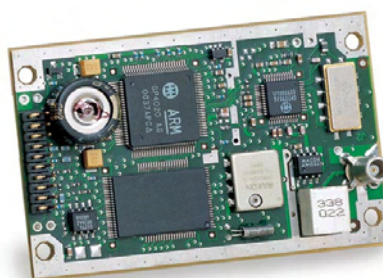
- Receptor GPS integrado com sistema de navegação Inercial – SPAN/CPT
- Novatel: Nos diversos experimentos propostos neste trabalho, a principal mudança nas configurações ocorre devido à introdução de um receptor GPS no sistema e ao modo como as observáveis geradas por este foram processadas. Este receptor foi utilizado como referência de tempo e posição e estará presente como base de comparação nos

experimentos deste trabalho. Na Figura 21 é exibido o receptor SPAN/CPT instalado sobre o sistema de câmaras.



Figura 21: Receptor Novatel SPAN/CPT montado sobre sistema de câmaras.

- Receptor GPS OEM Super Star II - Novatel: Um receptor de simples frequência, com saídas de 1 PPS para sincronização e duas portas seriais para comunicação e gravação de dados de navegação (Figura 22). Foi utilizado como referência de tempo para o computador de controle. É um dispositivo na forma OEM que não possui interfaces de controle, sendo necessária a criação destas interfaces. Por motivos de portabilidade, este receptor foi instalado dentro do computador de controle, conforme mostra a Figura 23. O uso deste receptor como referência de tempo para sincronismo (via NTP) se justifica, já que é um equipamento de baixo custo e fácil acesso se comparados aos modelos de dupla frequência e com sistema de navegação inercial integrado.



Fonte: <http://www.gpsatsys.com.au/img/SSII.jpg>

Figura 22: Receptor GPS Super Star II – Referência de tempo para o computador de controle.

- Computador para manutenção do tempo e registro de eventos de disparos: Sua função é fazer a manutenção do tempo através do *software* NTP em conjunto com o *patch* LinuxPPS aplicado ao núcleo do Linux Debian. Este computador recebe os pulsos do receptor de referência, e faz a sincronização de seu relógio interno baseado nestes pulsos sincronizados com o tempo do receptor GPS. Também é responsável por registrar os eventos provenientes do disparo da câmera do sistema SAAPI. A Figura 23 mostra o microcomputador, com as portas e interfaces desenvolvidas.



Figura 23: Computador de controle.

- Sistema de câmaras (SAAPI): O sistema pode ser composto por uma, duas ou três câmaras digitais. A configuração básica faz o uso de uma câmera digital H3D de 39 MPixel, da Hasselblad, instalada de forma vertical no suporte do sistema de câmaras. Pode-se também montar um arranjo convergente com duas câmaras H3D, de forma a obterem-se duas imagens simultaneamente, aumentando a área do terreno imageada. Pode-se ainda utilizar uma câmera Sony F-828, de 8 MPixels, para registrar imagens na banda do infravermelho. Todas as câmaras do sistema possuem conectores utilizados para acionamento de *flash* externo (usado para fazer o registro do instante de tomada da imagem). As câmaras possuem conectores para disparo externo, o que possibilitou a montagem de dispositivos para acionamento remoto, sem a necessidade de modificações ou intrusões no circuito original destas. Para os experimentos deste trabalho, utilizou-se somente uma câmera

H3D de 39 MPixel na posição vertical. As Figuras 24a e 24b exibem as câmaras que compõe o sistema SAAPÍ.



Figura 24: Hasselblad² de 39 MPixel e Sony F-828³ de 8 Mpixel infravermelha.

4.4.2 MODIFICAÇÕES NO SISTEMA OPERACIONAL LINUX

Com o intuito de reduzir o custo com aquisição de *hardware* e *software* proprietário para as operações de sincronismo/registro de eventos, como apresentado em Wis et al. (2004), optou-se em usar os próprios recursos de *hardware* existentes no PC (porta serial ou paralela), além do uso do sistema operacional de custo zero. Para este trabalho, o S.O. escolhido foi o Linux, em sua distribuição Debian.

Permite-se que qualquer pessoa obtenha o código fonte do Linux para estudá-lo, recompilá-lo, modificá-lo e usá-lo para qualquer finalidade, inclusive comerciais. A única restrição é manter referências e atribuições aos autores de cada *software*. Desenvolvedores apóiam-se em licenças denominadas “livres” para garantir esses direitos e alguns deveres a qualquer pessoa (GPLV3, 2009).

Para que o sistema operacional Linux responda aos eventos de disparos das câmaras, bem como aos pulsos vindos do receptor GPS usado como referência de tempo, serão necessárias modificações em seu núcleo, tornando-o apto reconhecer e a responder prontamente a esses eventos.

É certo que existirá um erro de sincronismo devido à atrasos e interrupções de hardware no processo de marcação do evento, porém em testes de laboratório, verificou-se que este erro é da ordem de um micro segundo, conforme será mostrado mais adiante neste trabalho.

² Fonte: <http://media.shinyplastic.com/prodimg/hasselblad-h1d.jpg>

³ Fonte: <http://a.img-dpreview.com/news/0308/sonydscf828.jpg>

Pela Tabela 1 verifica-se que em três técnicas de sincronismo propostas o Linux será utilizado como sistema operacional devido às características acima apresentadas, e, principalmente, devido ao acesso ao código fonte, podendo ser modificado para dar suporte a novos recursos. E de fato isso foi feito, adicionando suporte a eventos recebidos via porta serial ou paralela, usando a extensão LinuxPPS (LINUXPPS, 2009).

A extensão LinuxPPS aplicada ao núcleo do Linux será responsável por receber os pulsos de sincronismo da saída PPS do receptor usado como referência de tempo e enviá-lo ao NTP para a manutenção do tempo. O mesmo processo será usado para “capturar” os eventos de disparos das câmaras durante o voo.

O LinuxPPS é inserido no núcleo do Linux na forma de *patch* (remendo), possibilitando que o sinal de sincronismo, vindo de receptores GPS com saídas 1 PPS, possa “disciplinar” o relógio do microcomputador, corrigindo-o e mantendo-o alinhado com o sistema de tempo do receptor GPS por intermédio do NTP.

Desta forma, analisados os requisitos do sistema, passou-se então às adaptações do sistema e implementações de algoritmos computacionais para obter os eventos capturados pelo LinuxPPS via portas seriais. O diagrama abaixo (Figura 25) mostra como o LinuxPPS atua internamente no núcleo do Linux.

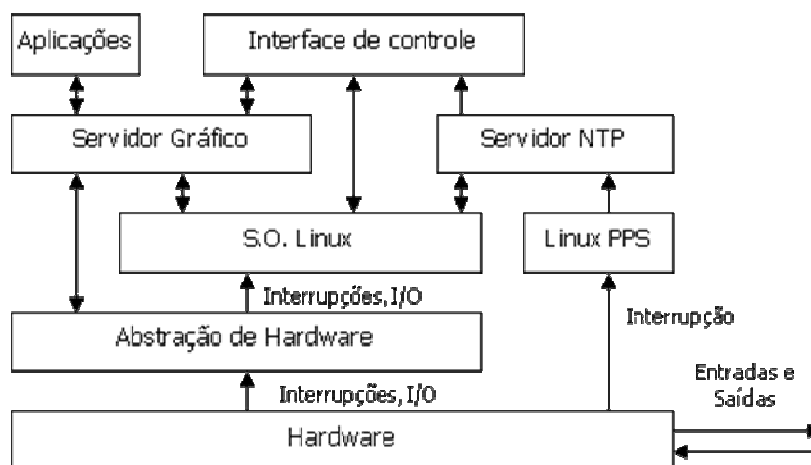


Figura 25: Primeira abordagem: *Patch* do LinuxPPS aplicado ao S.O. Linux.

Pode-se observar por este diagrama que o servidor de tempo NTP é alimentado diretamente com informações vindas da nova camada inserida pelo *patch* do LinuxPPS. Assim o NTP mantém a disciplina do relógio do sistema, alinhando-o ao tempo fornecido pelo GPS. Este alinhamento não é feito imediatamente. Internamente o NTP verifica a qualidade do sinal de sincronismo, e através do acúmulo de dados estatísticos sobre estes sinais, passa a reajustar relógio do microcomputador.

O tempo médio para alcançar um erro de sincronismo entre GPS e computador da ordem de 50 μ s é da ordem de 15 minutos, desde que observada uma boa recepção dos sinais dos satélites GPS.

Seguindo ainda o diagrama apresentado, pode-se perceber que a interface gráfica do usuário está na camada mais alta. Isto implica que qualquer requisição desta aos dispositivos de *hardware* do sistema, sofrerá um atraso, provocado pelo próprio escalonamento de tarefas do sistema operacional, até atingir de fato o controle esperado na camada de *hardware*.

Como a intenção deste trabalho não é testar a capacidade de multitarefa do Linux, desativou-se o ambiente gráfico (KDE, GNOME), sendo os comandos todos passados via linha de comando, ou através de scripts que executavam automaticamente na inicialização do Linux.

Mas para projetos onde em um sistema existam muitos processos rodando ao mesmo tempo, o atraso inserido no sincronismo pode ser significativo. Deve-se observar a possibilidade do uso de equipamento com maior capacidade de processamento (e conseqüentemente, com menor latência entre as requisições, escalonamento de processos e interrupções de hardware).

Mas, esta solução tem algumas ressalvas, visto que processadores de maior capacidade consomem mais energia, liberam maior quantidade de calor, necessitando de dissipadores e ventoinhas para fazer o arrefecimento do sistema, aumentando o peso e volume do equipamento, impossibilitando a sua instalação em ambientes instáveis, como os de uma aeronave. Por isso, deve-se verificar a relação custo/benefício no momento de definir os componentes do sistema.

Uma solução é fazer o uso de algoritmos responsáveis por tornar o sistema operacional Linux, um sistema em tempo real.

4.4.3 SINCRONIZAÇÃO ENTRE GPS E O COMPUTADOR

Para este procedimento foi usado o *software* NTP juntamente com o núcleo do Linux modificado para ter suporte a sinal PPS vindo do receptor GPS.

O LinuxPPS adiciona ao núcleo do Linux a capacidade de reconhecer mudanças de estados do nível lógico de pinos específicos do *hardware* serial e paralelo existentes em um computador.

Na ocorrência da mudança de estado no nível lógico (exemplo: de 0 volts para 5 volts) em um dos pinos, o núcleo do Linux, desvia o fluxo do processamento,

causando uma interrupção de hardware, que por sua vez aciona uma função interna e registra o instante desta mudança de estado. O instante é armazenado em uma estrutura e fica disponível para posterior uso por outra aplicação.

O suporte ao PPS vindo do receptor GPS é feito pela leitura de interrupções no pino 1 (DCD) de uma porta serial (ou pino 10 de uma porta paralela), onde o mesmo é transferido a uma estrutura interna do sistema operacional para tratamento pelo NTP.

É possível usar tanto a borda de subida quanto a de descida de um pulso. O tempo em que o sinal PPS fica no estado TTL (*Transistor-Transistor Logic*) verdadeiro (5 Volts) varia de receptor para receptor, mas normalmente esse valor é de 1 milissegundo. A Figura 26 mostra o formato de um sinal PPS.

Além do sinal PPS, é necessária também alguma informação referente ao instante a que esse pulso se refere, mesmo que essa informação não tenha tanta precisão quanto o próprio sinal PPS. Efetivamente é isso que ocorre.

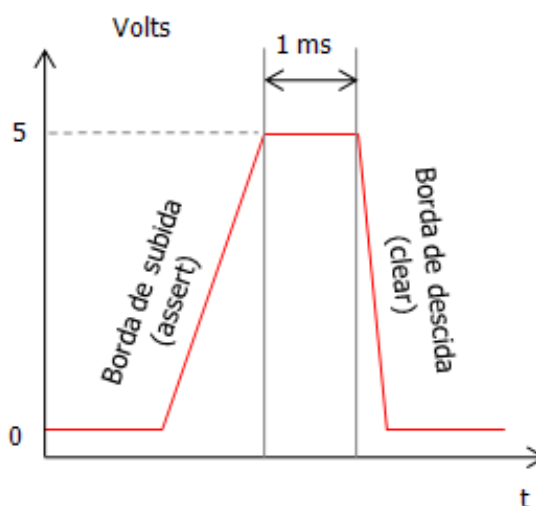


Figura 26: Formato de um sinal PPS.

O receptor GPS envia o sinal PPS, no instante da mudança de segundo em seu relógio interno, que está muito próximo do tempo GPS. Após o envio do pulso, são feitos os processamentos e cálculos internos para o posicionamento absoluto. Então o receptor GPS envia as mensagens pela porta serial para o computador de controle. A Figura 27 mostra como ocorre o alinhamento no tempo, entre o sinal PPS e mensagens no formato NMEA 183.

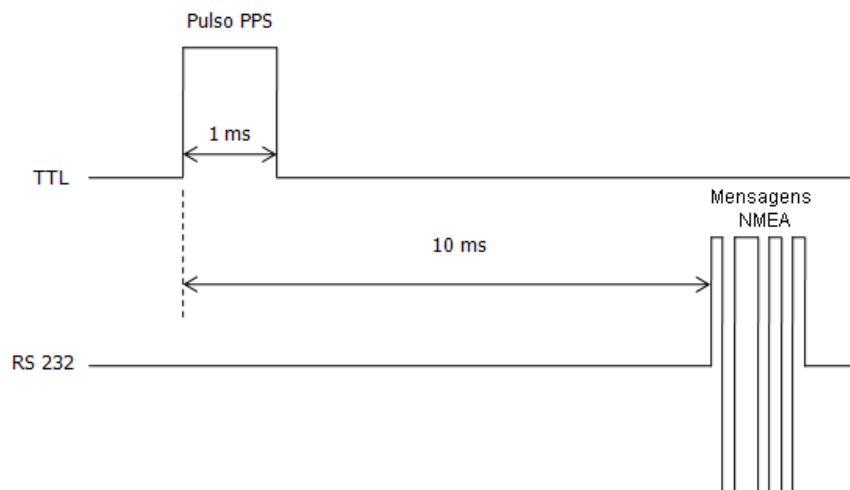


Figura 27: Alinhamento entre o sinal PPS e mensagens NMEA.

Normalmente, essas mensagens são transmitidas por portas RS-232, no formato NMEA, podendo ser facilmente decodificadas. Possuem informações como segundo da semana GPS, coordenadas geodésicas (latitude, longitude e altitude geométrica), informações da qualidade da recepção (PDOP), número de satélites rastreados, etc. Os campos são separados por vírgula. Um trecho contendo mensagens do tipo GPGGA do protocolo NMEA é mostrado a seguir (Figura 28).

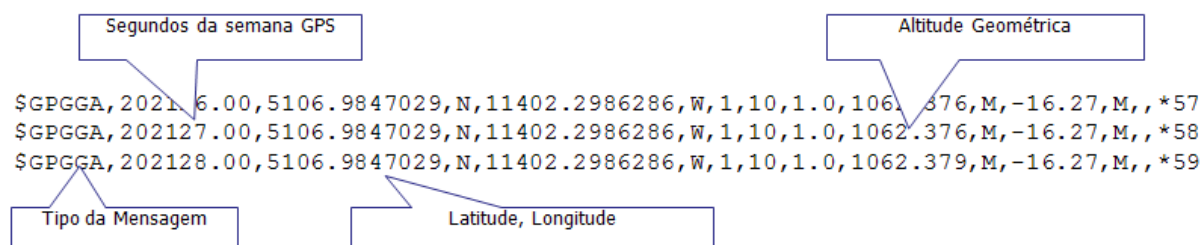


Figura 28: Formato da mensagem GPGGA do protocolo NMEA.

O esquema típico de conexão em uma porta serial (RS 232) para uso do LinuxPPS em conjunto com o NTP é exibido na Figura 29. Na mesma porta onde as mensagens NMEA são recebidas (Pinos 2 e 3) também se recebe o sinal PPS (pino 1).

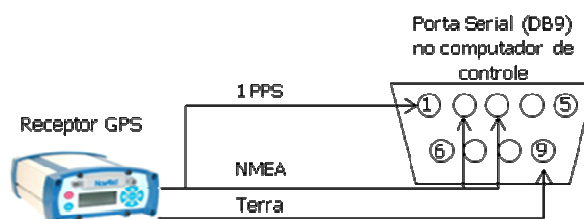


Figura 29: Ligações do GPS ao computador de controle.

Em receptores do tipo OEM, normalmente a interface RS232 funciona com tensões de nível LVTTTL, e devido a isto, faz-se necessário o uso de um conversor de níveis lógicos (LVTTTL $\leftrightarrow$ RS 232) entre o receptor GPS e a porta serial.

A sincronização é feita de forma automática pelo NTP logo que mensagens válidas no formato NMEA são recebidas pela porta serial do computador. Após um ajuste inicial do relógio do computador com uso de poucas amostras de mensagens NMEA, o NTP passa a considerar em seus cálculos estatísticos os pulsos recebidos pelo pino 1 da porta serial.

Com isso, em intervalos definidos na configuração do NTP, são feitos ajustes do relógio do computador considerando informações de *offset*, *drift*, e outras variáveis que influenciam na manutenção do tempo em um computador.

Através de leituras constantes ao relógio do computador de controle e amostragens das leituras dos sinais PPS e mensagens NMEA, o relógio vai sendo corrigido, e mantém o tempo do sistema sincronizado ao tempo fornecido pelo receptor GPS. A Figura 30 mostra um fluxograma básico deste processo realizado pelo NTP conforme descrito em Mills (2003).

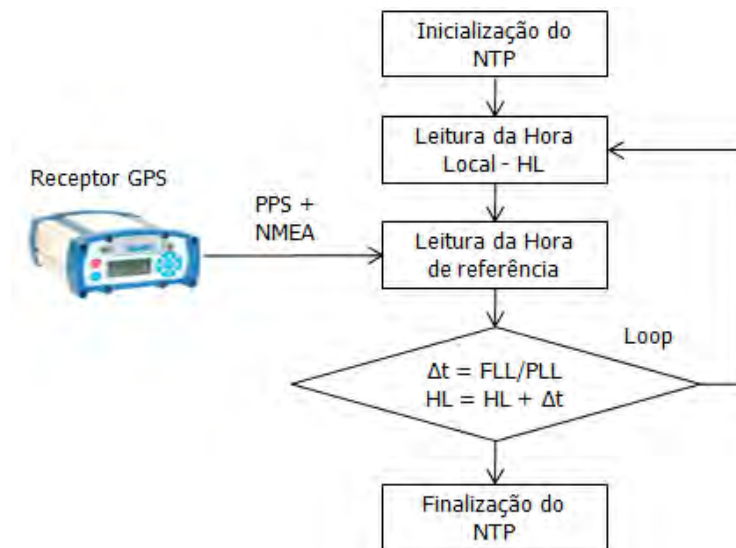


Figura 30: Fluxograma do funcionamento do NTP.

Após 15 minutos de sincronismo, com testes feitos em laboratório, o tempo do computador difere do tempo do receptor GPS por valores entre 10 a 15 μs . A partir de então, qualquer outro evento que se referir ao tempo do computador, também vai referir-se ao tempo GPS, a menos desse pequeno erro, que é fornecido estatisticamente por registros e *logs* do NTP.

4.4.4 COLETA DO INSTANTE DE DISPARO

O registro de eventos é feito usando interrupções geradas nas portas seriais ou paralelas do computador. Como já tratado, estas interrupções devem ser “despachadas” o mais rápido possível ao serem detectadas pelo *hardware*.

Processos de interrupção são interessantes, pois desviam o fluxo de processamento, e dependendo da prioridade em que são colocados para executar, são processados em um tempo muito pequeno. Este tipo de interrupção é implementado pelo LinuxPPS.

A impossibilidade de modificar o hardware original das câmaras, fez com que fossem utilizados outros artifícios para detectar e registrar o momento de disparo destas. Normalmente câmaras fotográficas profissionais ou semi-profissionais possuem saídas para *flash* externo. Estas saídas são muito bem sincronizadas com o obturador do sistema de lentes (Figura 31).



Figura 31: Pino para ligação de flash externo.

Desta forma, a solução para obter o pulso de disparo da câmara é monitorar este conector de *flash*, e registrar transições de estados que ocorrem, usando o mesmo advento da sincronização do relógio do computador com o GPS (LinuxPPS monitorando o pino 1 de uma porta serial, por exemplo). Desta forma, obtêm-se o instante em que o obturador da câmara se abre, registrando a imagem, e conseqüentemente marcando este instante referenciado à escala de tempo GPS.

O computador de sincronismo possui duas portas seriais que foram utilizadas com o intuito de receber tanto os eventos de sincronismo do receptor GPS, quanto os eventos de disparo das câmaras. O esquema desta implementação é mostrado na Figura 32. Como o LinuxPPS também trabalha com interrupções em portas paralelas, seria possível ainda registrar outro evento de disparo por esta porta.

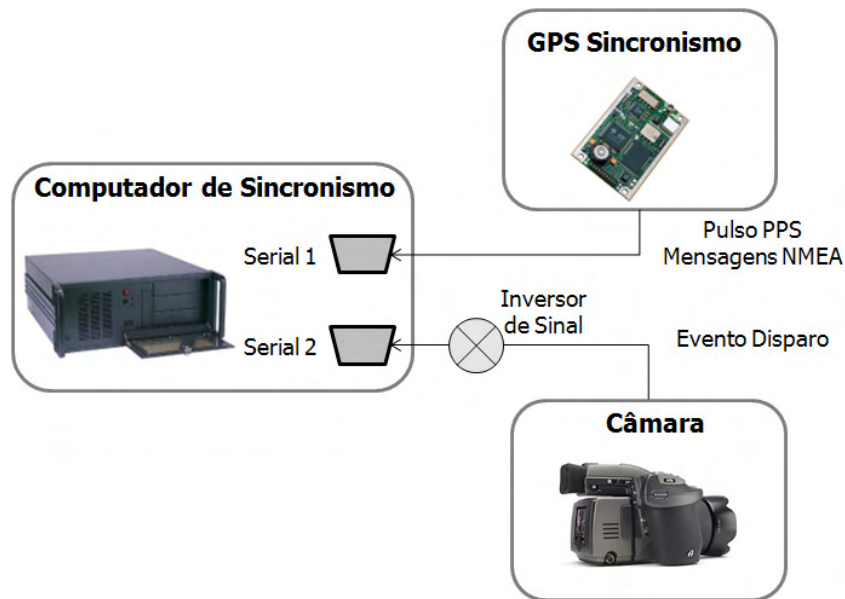


Figura 32: Configurações para sincronismo e registro de eventos.

A Figura 32 inclui um inversor de sinal, que se faz necessário devido à incompatibilidade entre o sinal obtido no pino de *flash* da câmara e o nível de tensão necessário para permitir o registro do disparo na porta serial padrão RS232. O padrão de comunicação RS232 considera que valores de tensão entre -25 a -3V serão representados como nível lógico 0. Valores de tensão entre 3 a 25V serão representados como nível lógico 1. O intervalo de -3 a 3V é considerado indefinido. A Figura 33 mostra as tensões e os níveis lógicos em uma porta serial, padrão RS232.

O inversor de sinal recebe o pulso vindo do disparo da câmara e inverte o nível lógico deste sinal. O *flash* da câmara funciona com um interruptor, causando um aterramento do pino central do pino deste quando é feito um disparo. Já o pino 1 da porta serial necessita que o seu nível lógico mude de 0 para 1. Isto só pode ocorrer se no momento do disparo for inserido um pulso de tensão entre 3 a 25V, proporcional à duração do tempo de exposição configurado na câmara.

O esquema eletrônico do inversor de sinal desenvolvido é mostrado na Figura 34a. Na Figura 34b é mostrado como se comporta o sinal através do inversor de sinal. Trata-se de um circuito que faz uso de lógica TTL usando componentes discretos e de fácil aquisição.

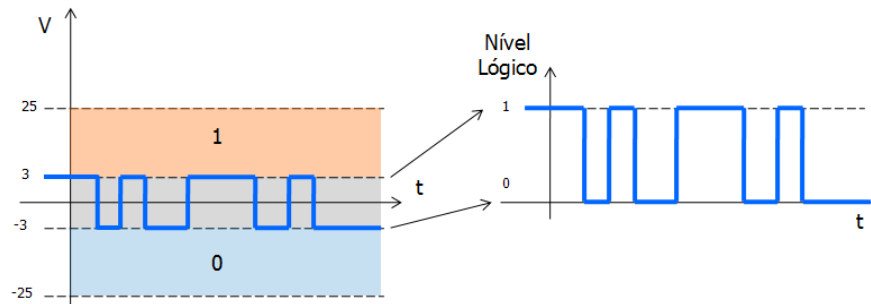


Figura 33: Tensões e Níveis Lógicos de uma Porta Serial – Padrão RS232.

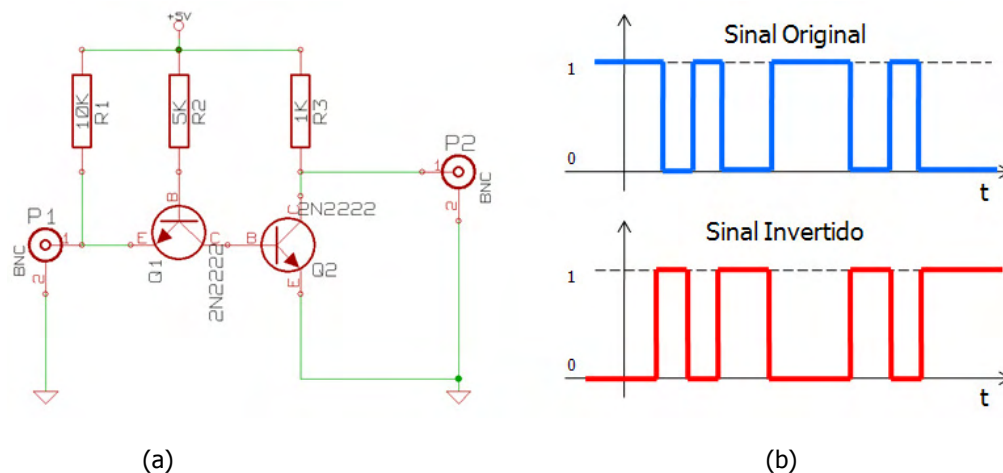


Figura 34: (a) Inversor de sinal desenvolvido. (b) Comportamento do sinal através do inversor.

O circuito apresentado na Figura 34a usa um resistor de *pull-up* (R1) em sua entrada (P1), fazendo com que esta receba uma referência de tensão de alimentação (5 Volts), e conseqüentemente, invertendo o sinal da saída (P2), mantendo-o em 0 V. Como esta entrada é conectada ao pino de *flash*, em um evento de disparo o pino central é aterrado, provocando a inversão do sinal de saída, elevando sua tensão para 5 V, que já é suficiente para provocar uma interrupção no pino 1 da porta serial, ao qual a saída do inversor está conectada.

A Figura 35 mostra como os componentes são conectados, e como se comporta o sinal de disparo desde a câmara, passando pelo inversor, até alcançar a porta serial. Como se pode perceber, sem o uso de um inversor de sinais, o evento de disparo da câmara não pode ser reconhecido pela porta serial (linha azul, sempre no nível lógico 0).

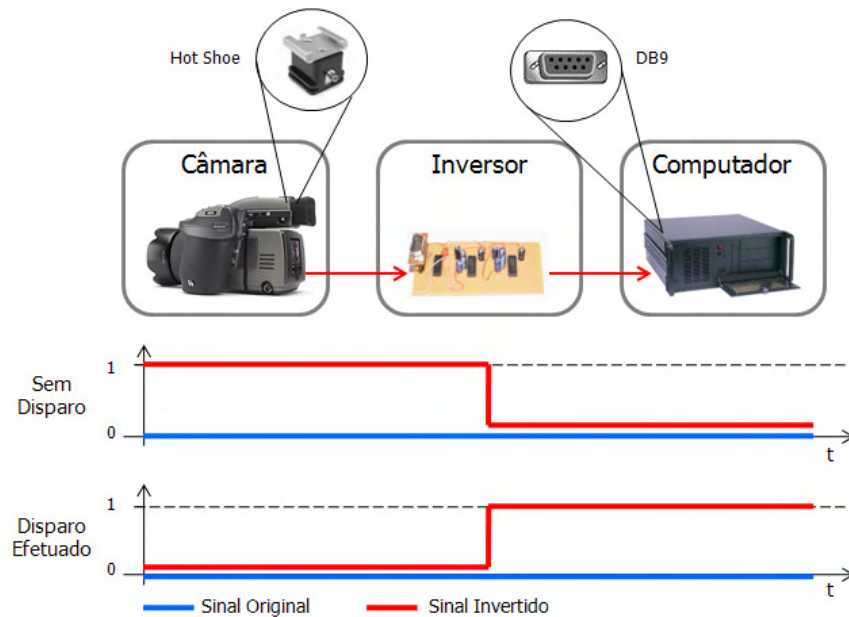


Figura 35: Comportamento do sinal de disparo da câmera.

Garantindo-se a correta interpretação dos disparos, passou-se então ao desenvolvimento do *software* para gravar os instantes em que ocorreram estes disparos. Durante o voo será gerado um arquivo que conterá informações necessárias para permitir a posterior interpolação das posições dos CPs de cada imagem usando-se os instantes de disparos registrados.

Um trecho do arquivo gerado é exibido na Figura 36, onde o mesmo contém uma numeração sequencial do número de disparos, números de segundos de quando ocorreu a borda de subida (Figura 26) desde o início da era UNIX (0 horas de 1º de janeiro de 1970) e o número de segundos quando ocorreu a borda de descida, além da representação em dia, mês, ano, hora, minuto, segundos do mesmo evento.

001	1238498128.9679828	1238498128.978265	30/03/2009	11:15:13.967982778
002	1238498132.654412	1238498132.6646936	30/03/2009	11:15:17.654412113
003	1238498650.2983043	1238498650.3084903	30/03/2009	11:23:55.298304365
004	1238498972.6321712	1238498972.6424551	30/03/2009	11:29:17.632171263
005	1238499703.3567932	1238499703.3672533	30/03/2009	11:41:28.356793235
006	1238499717.5019038	1238499717.5119903	30/03/2009	11:41:42.501903836
007	1238499748.8768122	1238499748.886898	30/03/2009	11:42:13.876812323
008	1238499752.8454061	1238499752.8554916	30/03/2009	11:42:17.845406055
009	1238499756.8394766	1238499756.8495731	30/03/2009	11:42:21.839476616
010	1238499760.8440206	1238499760.8541043	30/03/2009	11:42:25.844020545

Figura 36: Trecho do arquivo com eventos de disparos com origem na era UNIX.

Devido à contagem e representação do tempo no sistema operacional Linux, será necessário a conversão dos instantes de disparos para a época GPS (atualmente referenciados à época de origem do sistema UNIX). Com os instantes de disparo na mesma

escala de tempo que os dados da trajetória, passam-se então aos testes, comparações e interpolações dos CPs.

A Interpolação Linear foi usada neste trabalho para a determinação das coordenadas dos CPs das imagens nos instantes de eventos de disparo. Isto se deve ao fato da regularidade da trajetória, e devido à taxa de coleta dos receptores usados nos experimentos ($L1 = 1\text{Hz}$, $L1/L2 = 5\text{Hz}$).

Ruy (2008) comparou trajetórias com diferentes taxas de coletas para fins de interpolação das coordenadas dos CPs. Jubanski e Mitishita (2005) propõem o uso do filtro de Kalman para a determinação dos CF nos instantes das tomadas. Mas como o foco deste trabalho não é verificar qual o melhor método de interpolação, usou-se a interpolação linear que está implementada no software GrafNav, *software* utilizado em todos os processamentos GPS/INS.

CAPÍTULO V

5.1 EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão descritos os experimentos realizados com o intuito de testar as técnicas propostas, bem como, proporcionar informações suficientes para classificação dos sistemas de georreferenciamento direto baseado nas informações de tempo dos receptores GPS.

5.2 EXPERIMENTOS COM DADOS REAIS

Como tratado na metodologia, todos os equipamentos envolvidos foram embarcados no mesmo voo, compartilhando recursos comuns, para que a base de tempo fosse a mesma (centro de fase da antena GPS e evento de disparo da câmara).

Algumas informações e características relevantes a respeito do voo realizado são descritas abaixo:

- Data do voo: 31/03/2009, das 8 às 10 horas, horário local (11 às 13 horas do tempo GPS, aproximadamente);
- Área do voo: Cidade de Assis/SP – Altitude aproximada da Região: 450 m (Figura 37);
- Altitude aproximada do voo: 1500 m;
- GSD de aproximadamente 15 cm na posição nadir;
- Intervalo entre as tomadas de 4 segundos, de forma a garantir 60% de sobreposição média entre as imagens;
- Velocidade média da aeronave de 220 km/h;
- Equipamentos embarcados no voo (Figura 38 e Tabela 1):
 - Um computador com sistema operacional Linux para a realização da técnica 1, usando um receptor de simples frequência para sincronismo e outro para coleta dos dados de trajetória, com as seguintes conexões:

- Com a saída PPS do receptor GPS SuperStar II, para fins de sincronização;
- Com receptor GPS SuperStar II, de simples frequência para coleta das observáveis (dados) para pós-processamento;
- Registro dos pulsos de disparo da câmara via porta serial;
- Componentes do sistema SAAPI na aeronave, usando a técnica 2 de sincronismo. Nenhuma modificação foi necessária no sistema para permitir o compartilhamento dos eventos de disparo das câmaras;
- Todos os receptores GPS usados compartilharam a mesma antena já existente na aeronave por meio de um divisor de sinais, garantindo que as medidas das observáveis GPS fossem realizadas na mesma posição.

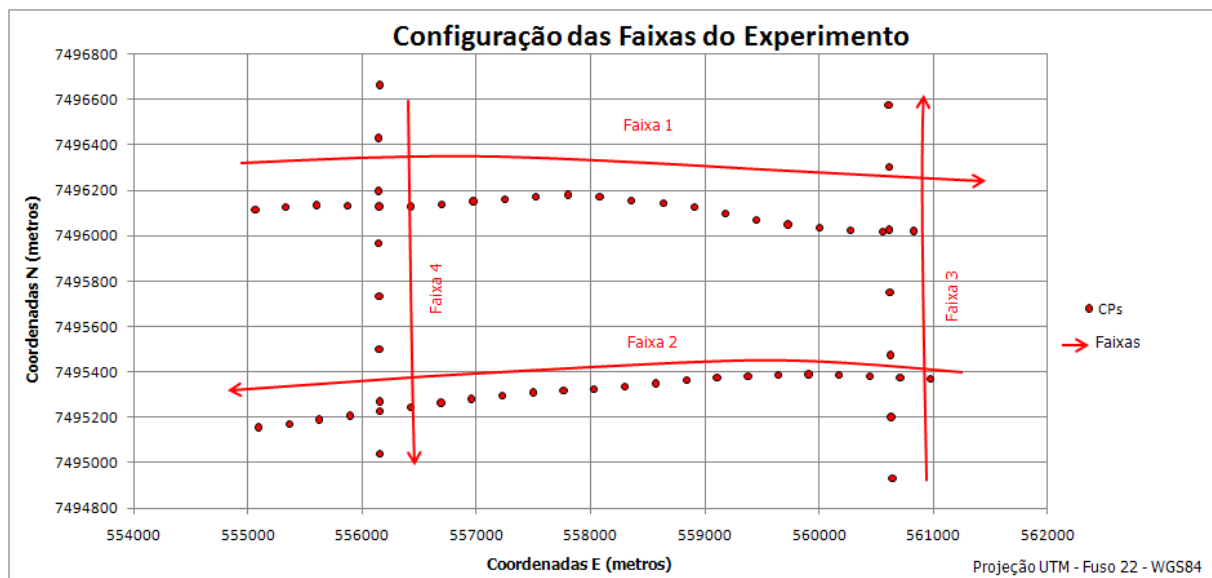


Figura 37: Área do experimento e disposição das faixas.

No experimento 60 imagens foram adquiridas, como segue:

- Faixa 1: Sentido Oeste->Leste – 22 imagens;
- Faixa 2: Sentido Leste->Oeste – 23 imagens;
- Faixa 3: Sentido Sul->Norte – 7 imagens;
- Faixa 4: Sentido Norte->Sul – 8 imagens;

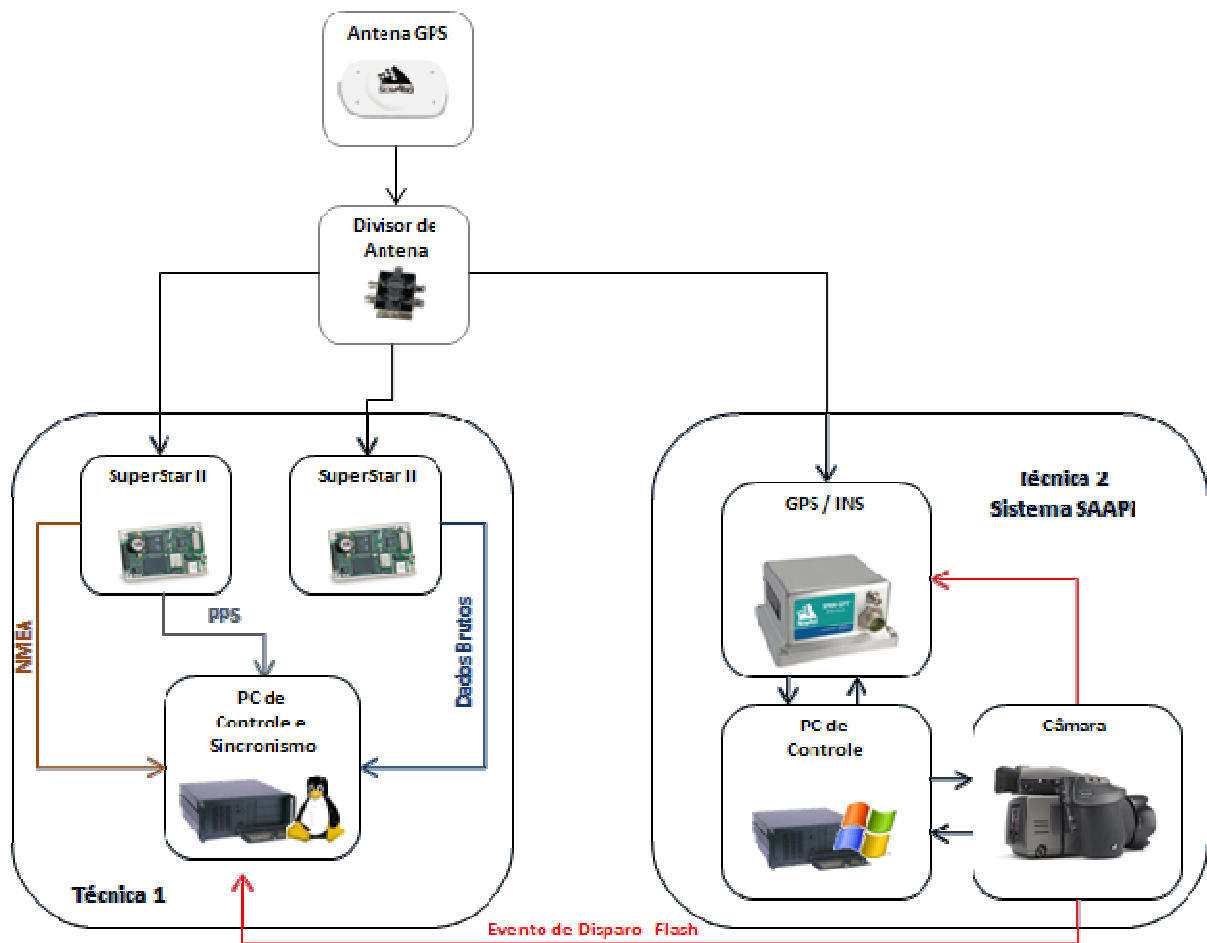


Figura 38: Equipamentos embarcados em voo.

A preparação da aeronave e montagem dos equipamentos deste experimento aconteceu um dia antes da realização do voo, permitindo a realização de testes e algumas correções necessárias detectadas somente no momento da instalação (conexões extras de alimentação, bateria extra isolada do sistema, cabeamento para compartilhamento da antena, etc).

Para o planejamento do voo, utilizou-se um módulo desenvolvido em forma de macro para o AutoCAD. Considerando-se parâmetros da câmara utilizada, informações da aeronave, informações de altitude do terreno, altura do voo, entre outros, gerou-se arquivos para serem exportados diretamente para o GPS do piloto, auxiliando na navegação e execução do voo (REIS et al., 2006).

5.3 DETERMINAÇÃO DO VETOR POSIÇÃO DA ANTENA GPS NO REFERENCIAL FOTOGRAMÉTRICO (*LEVER ARM*)

Para garantir que as coordenadas determinadas pelos eventos de disparo e a trajetória do receptor GPS estejam referidas ao sistema Fotogramétrico, foi necessário a determinação do vetor entre o CP da câmara e o CF (Centro de fase) da antena GPS.

Com ajuda de um fio de prumo e uma trena, foram medidas as três componentes do vetor que conecta a origem do sistema Fotogramétrico da câmara ao CF da antena GPS, com uma incerteza da ordem de 0,01 a 0,02 m, portanto, adotou-se como incerteza, um valor médio de 0,015 m.

A Figura 39 exibe o esquema do posicionamento da antena GPS em relação à câmara e o vetor que os conecta. Os valores dos vetores que relacionam os diversos sensores utilizados são exibidos na Tabela 2.

Tabela 2: Vetores que relacionam os diversos sensores embarcados (*Lever Arm*).

Offset	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
IMU -> Antena	$0,023 \pm 0,015$	$-0,076 \pm 0,015$	$0,716 \pm 0,015$
CAM -> IMU	$0,0 \pm 0,015$	$0,0 \pm 0,015$	$-0,316 \pm 0,015$

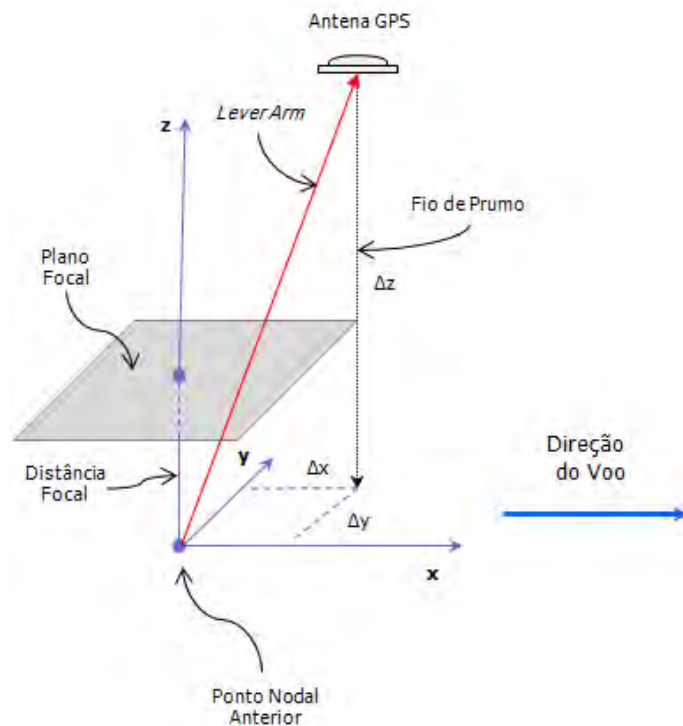


Figura 39: Vetor (*Lever Arm*) entre a origem do sistema Fotogramétrico da câmara e o Centro de Fase da antena GPS.

Jubanski (2005) propõe o uso de uma estação total com uma técnica de medição específica, mas devido às incertezas inerentes ao posicionamento cinemático relativo por GPS, esta abordagem não foi utilizada, já que os erros da trajetória GPS são bem maiores que as incertezas resultantes desta técnica.

É importante citar que tanto a aeronave quanto o berço que suporta o sistema de câmaras foram nivelados, de forma a garantir uma situação mais próxima possível da situação real antes de serem feitas as medições descritas acima.

Os efeitos das variações angulares da aeronave nas posições do CP serão menores do que 5 cm em X e Y, para rotações máximas de 3° , podendo ser desprezados para o caso estudado, pois a precisão de posicionamento é da ordem de 15 cm. Existe a possibilidade de inserir os ângulos de rotação, desde que previamente conhecidos, no software GrafNav para a correção prévia destes efeitos, opção esta que não foi utilizada neste trabalho.

O software para pós-processamento dos dados GPS (Novatel WayPoint - GrafNav) aceita estes valores informados como parâmetros de entrada, e automaticamente realiza a correção das coordenadas do centro de fase da antena GPS para o centro perspectivo da câmara.

5.4 DETERMINAÇÃO DOS INSTANTES DOS DISPAROS DA CÂMARA EM RELAÇÃO AO TEMPO GPS

Conforme descrito na metodologia, todos os eventos de disparos registrados no computador de sincronismo e registro de eventos estão referenciados ao tempo UNIX. Desta forma antes de iniciar as comparações entre os instantes dos eventos de disparo, torna-se necessário reduzir todos estes eventos em uma base única de tempo, a qual, por questões de facilidade posteriores nos cálculos, foi o tempo GPS.

O fluxograma da Figura 40 apresenta a seqüência usada para as conversões entre os sistemas de tempo Unix e GPS.

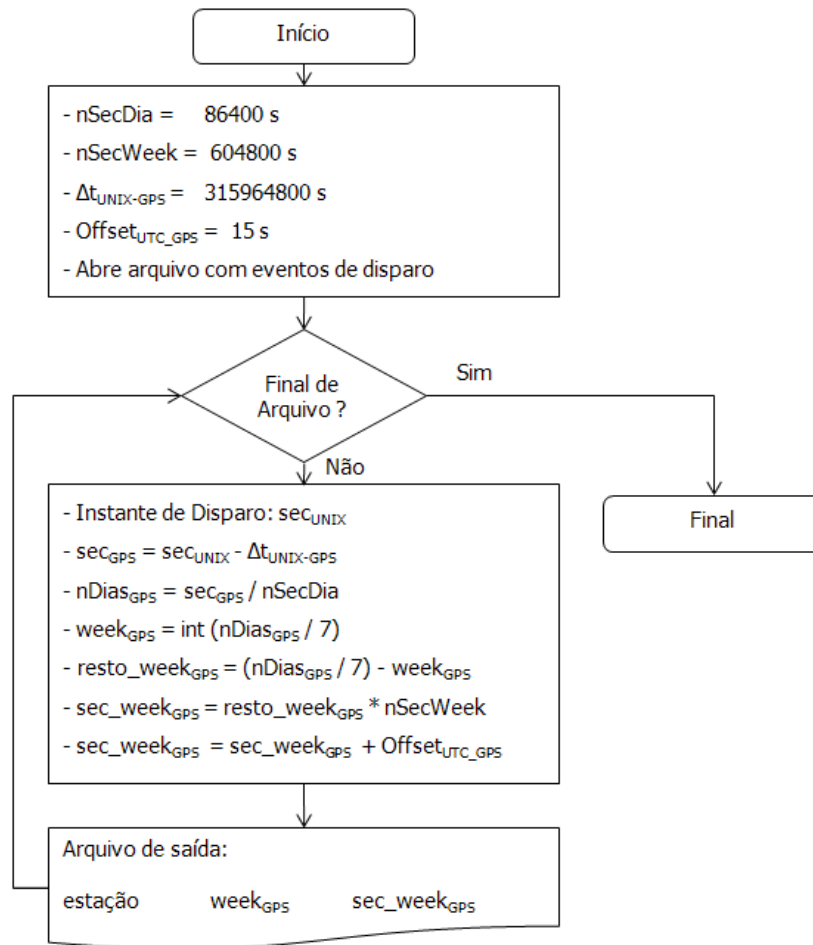


Figura 40: Fluxograma para conversão dos eventos registrados na época UNIX (01/01/1970).

Após esta conversão, os instantes registrados já estão referenciados ao tempo GPS. O próximo passo é a compensação de *offset* entre os relógios do computador de sincronismo e o relógio da fonte mais precisa de tempo, que neste caso foi o receptor GPS, conectado à porta serial, via pino PPS.

Desta forma, durante a execução do voo, o NTP registrou e manteve as estatísticas atualizadas a respeito do erro de sincronismo entre o pulso do pino PPS (relógio do GPS) e o relógio do computador. Estes registros estatísticos feitos pelo NTP serão usados então para compensar estas diferenças entre os dois relógios com o passar do tempo e são gravados no arquivo chamando *loopstats* (NTP, 2008).

Fazendo uso do arquivo *loopstats* juntamente com os instantes de disparos registrados pelo computador, faz-se a compensação do erro de sincronismo nos instantes de disparo. O fluxograma da Figura 41 demonstra como este processo é realizado, lembrando que tanto os instantes registrados quando os dados do arquivo *loopstats* devem estar referenciados à mesma base de tempo.

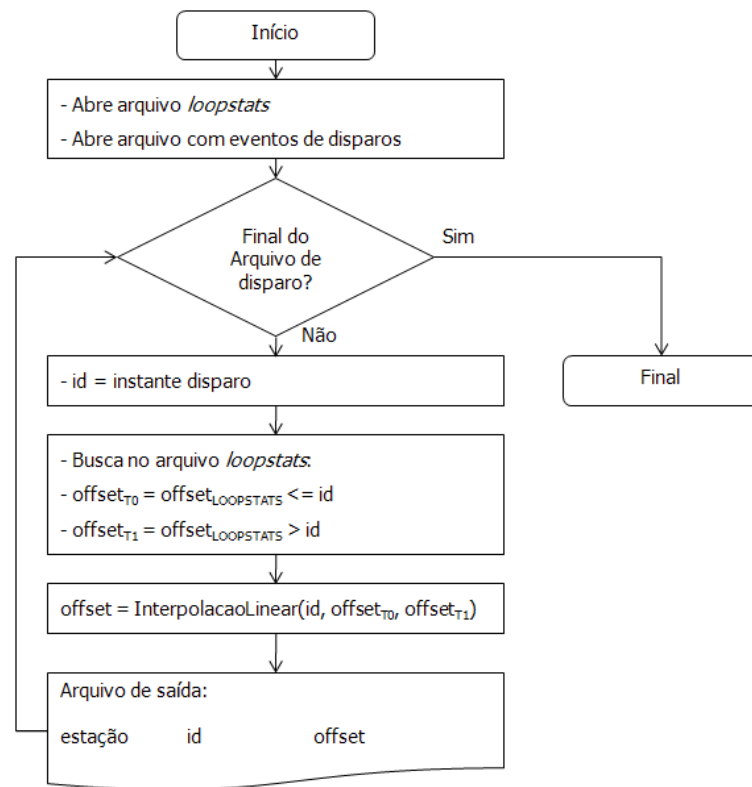


Figura 41: Fluxograma para correção dos valores de *offset* fornecido pelo NTP.

Este processo de interpolação se faz importante, visto que os instantes de disparos podem não coincidir com os instantes em que o NTP grava o arquivo de estatísticas. Decidiu-se pelo uso da interpolação linear pelo comportamento do *offset* por pequenos períodos de tempo (por exemplo, entre os instantes de tomadas das imagens). Para longos períodos, a interpolação linear não seria a mais apropriada. O gráfico da Figura 42 demonstra isto.

Observa-se pelo gráfico da Figura 42 que o NTP necessita de aproximadamente 1000 segundos (16,67 minutos) de sincronização para que os erros caiam para menos de 0,01 segundos (módulo), sendo que ao final do experimento, a diferença entre os relógios do receptor GPS e o relógio do computador é menor que 0,003 segundos. Este valor é muito próximo à incerteza atribuída ao registro de disparo da câmara usando o pino de *flash* (que segundo o fabricante da câmara utilizada, é menor ou igual a 0,001 segundo).

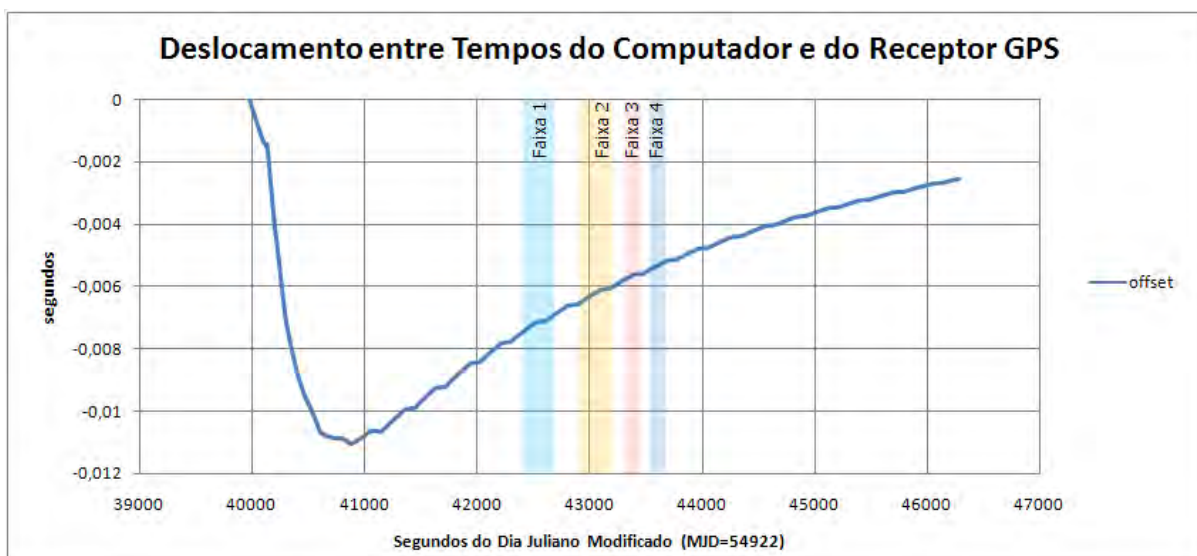


Figura 42: Comportamento do *offset* entre relógio do computador e de sincronismo.

Durante o voo do experimento, um arquivo de dados foi gerado a partir da marca de evento do receptor SPAN/CPT, contendo informações dos instantes de disparo da câmara. Este arquivo será usado para comparação com os instantes de disparo registrados pela técnica 1.

O gráfico da Figura 43 exibe as discrepâncias entre os instantes de disparo registrados pelas técnicas 1 e 2, sem considerar a correção do *offset* registrado pelo NTP. Já o gráfico da Figura 44 exibe as mesmas discrepâncias entre os dois registros de eventos, porém considerando a correção do *offset* fornecida pelo NTP.

Pode-se observar que mesmo com alguns picos (valores residuais) no gráfico da Figura 44 (linha azul), as discrepâncias tornam-se muito pequenas, com valores máximos em módulo, próximos de 0,00004 segundos, proporcionando uma melhora de, no mínimo, 200 vezes em relação aos valores de discrepâncias do gráfico da Figura 43, onde não foi aplicada a correção de *offset*. A Tabela 3 sintetiza os valores demonstrados nas Figuras 43 e 44.

Pode-se notar, baseando-se nas Tabelas e gráficos apresentados que a técnica de sincronismo 1 alcança a magnitude de erro esperada e especificada na Tabela 1, mesmo sem fazer a compensação dos valores de *offset* fornecidos pelo NTP. Um incremento drástico na qualidade da marca de tempo é feito quando se aplicam estas correções, tornando as discrepâncias entre as duas técnicas, menores que 40 μ s (0,00004 s).

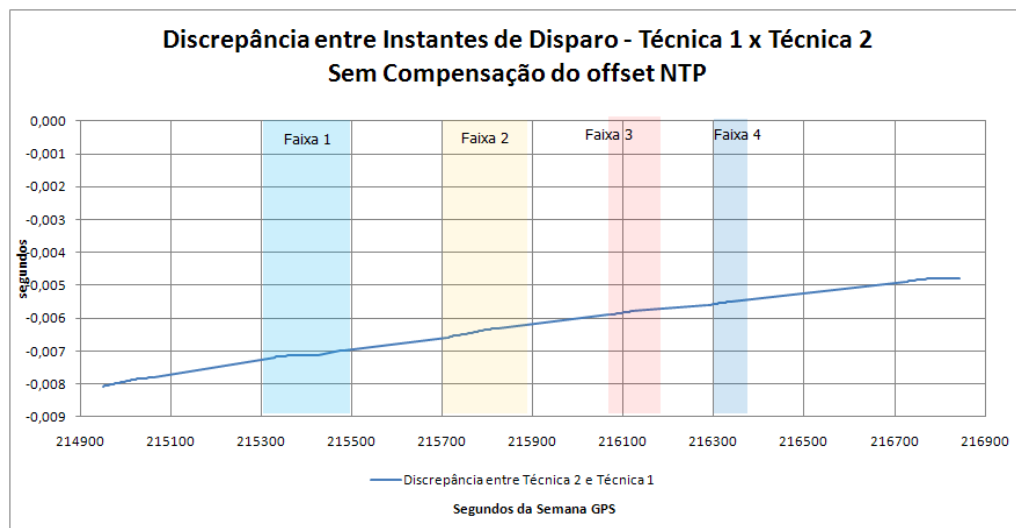


Figura 43: Discrepâncias entre instantes de disparos registrados pelo receptor SPAN/CPT (técnica 2) e pela técnica 1, sem a correção do *offset* do NTP.

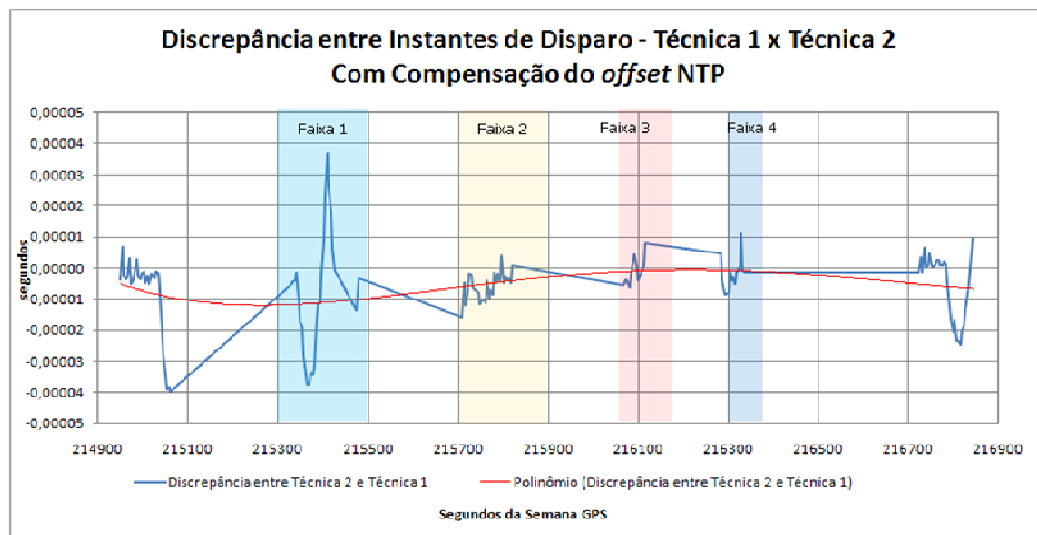


Figura 44: Discrepâncias entre instantes de disparos registrados pelo receptor SPAN/CPT (técnica 2) e pela técnica 1, usando a correção do *offset* do NTP.

Tabela 3: Discrepâncias entre instantes de disparos registrados pelas técnicas 1 e 2.

	Discrepâncias entre os instantes de disparos		Erro em posição (mm)*	
	Sem correção (s)	Com correção (s)	Sem correção	Com correção
Média	-0,006364	-0,000006	406,5664	-0,3861
Desvio Padrão	0,001103	0,000012	70,46959	0,7711

* Considerando a velocidade média da aeronave de 60 m/s

Verifica-se, portanto, que a determinação dos instantes de disparo da técnica 1 apresenta incerteza com magnitude compatível com o registro de eventos da técnica 2.

5.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS GPS

Os processamentos dos dados GPS foram todos realizados no *software* da Novatel denominado GrafNav, mantendo-se as configurações usadas para todos os processamentos (salvo estilos de processamentos devido ao tipo de observável de cada receptor), para que estas opções não interferissem no resultado final de cada processamento.

Para o processamento dos dados da técnica 2, foram consideradas as seguintes configurações:

- GPS L1/L2 com registro de eventos interno;
- Processamento Relativo - Estações de Referência:
 - PTE (RBMC) – Aprox. 113 km da área do voo;
 - LINS (Rede Ativa de SP) – Aprox. 130 km da área do voo;
 - OURI (Rede Ativa de SP) – Aprox. 67 km da área do voo;
- Efemérides Precisas e correções do relógio dos satélites do IGS;
- Correção das velocidades das estações pelo VelInter;
- Taxa de coleta do receptor de 5Hz;
- Interpolação da Taxa de coleta das estações de referência para 5Hz;
- Máscara de elevação de 5 graus para os dados coletados pelo receptor da aeronave;
- Interpolação Linear das coordenadas dos CPs baseando-se em informações dos instantes de disparo das câmaras registrado pelo receptor GPS da técnica 2.
- Considerado o vetor Câmara->Centro de Fase da antena GPS – Valores das posições nos CPs das imagens.

O gráfico da Figura 45 exibe a desvio padrão estimado (1σ) obtido no processamento dos dados do receptor GPS da técnica 2 (SPAN/CPT), no sistema local definido. Os valores de desvio padrão (1σ) do resultado do processamento foram de 0,035 m (componente horizontal) e 0,070 m (componente vertical).

As componentes E, N e U são representações de coordenadas em um sistema plano, tangente à superfície, fixas a uma localização específica, normalmente na região de onde se deseja representar estas coordenadas, ou os desvios padrão do processamento dos dados. Se trata de uma forma mais intuitiva e prática para visualizar

coordenadas (ao contrário de se representar as incertezas em um referencial cartesiano geocêntrico, por exemplo).

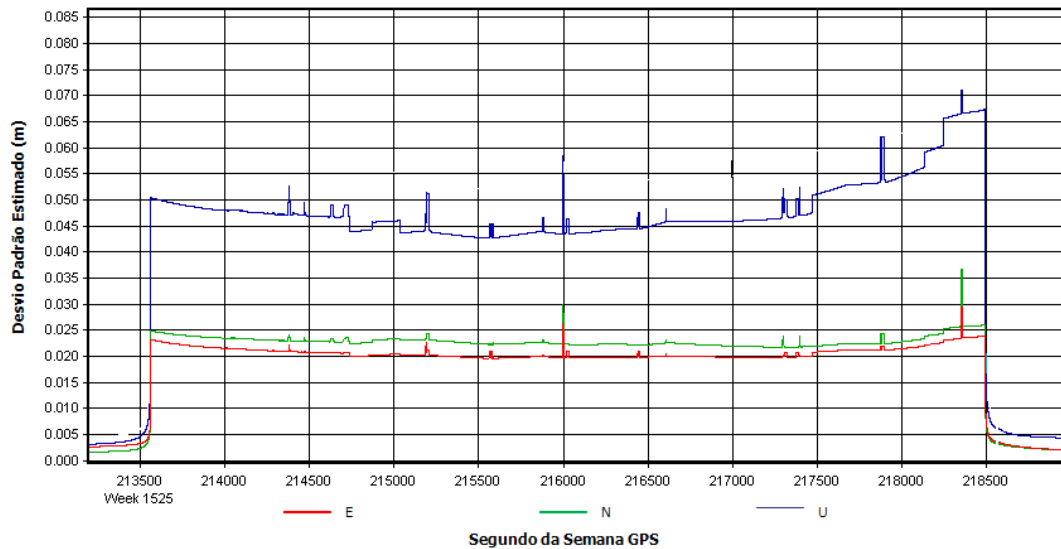


Figura 45: Desvio padrão estimado do processamento dos dados do receptor da técnica 2 (L1/L2).

O processamento dos dados coletados pelo receptor da técnica 1 (GPS L1), foi realizado considerando as seguintes configurações:

- GPS SuperStart II L1;
- Processamento Relativo - Estações de Referência:
 - PPTE (RBMC);
 - LINS (Rede Ativa de SP);
 - OURI (Rede Ativa de SP);
- Efemérides Precisas e correções dos relógios dos satélites do IGS;
- Uso do arquivo IONEX do IGS, para compensações de efeitos atmosféricos;
- Correção das velocidades das estações pelo VelInter;
- Taxa de coleta do receptor de 1Hz;
- Interpolação da Taxa de coleta das estações de referência para 1Hz (Estação PPTE – arquivo com coletas a cada 15 segundos); máscara de elevação de 5 graus para os dados coletados pelo receptor da aeronave;
- Interpolação Linear das coordenadas dos CPs baseando-se nos instantes registrados pela técnica 1. Os instantes de disparos foram interpolados através de um programa desenvolvido para esse fim,

usando como entrada, os arquivos de disparo e de dados da trajetória processada. O fluxograma da Figura 46 demonstra como é feita a interpolação das posições em função do tempo;

- Considerado o vetor Câmara->Centro de Fase da antena GPS – Valores das posições nos CPs das imagens.

O gráfico da Figura 47 exhibe o desvio padrão estimado obtido no processamento dos dados do receptor GPS da técnica 1. Os valores médios de desvio padrão (1σ) foram de 0,10 m e 0,20 m para a componente horizontal e vertical, respectivamente.

De posse das coordenadas dos CPs processados usando os diferentes arquivos de dados dos receptores da técnica 1 e 2 (L1 e L1/L2 respectivamente), gerou-se um gráfico com as discrepâncias (DX, DY e DZ em um sistema local) entre as coordenadas dos CPs obtidos em cada técnica (Figura 50).

Pode-se observar pelo gráfico da Figura 48 que as discrepâncias na primeira faixa (três componentes) possuem uma magnitude maior em relação às outras faixas. Isto pode estar relacionado ao sincronismo realizado pelo NTP, que necessita de um tempo mínimo para iniciar a convergência (aproximadamente 17 minutos), ocasionando um deslocamento significativo entre o relógio do computador e o relógio do GPS L1 usado como referência de tempo.

Porém, observando-se a Figura 42, pode-se notar que o NTP estava em processo de convergência para um valor muito próximo do horário do GPS, indicando que a discrepância maior na faixa 1 pode estar relacionada a outros fatores que influenciam o posicionamento, como por exemplo, efeitos ionosféricos, mudança de temperatura na placa eletrônica do receptor, etc.

Deve-se levar em consideração que receptores GPS possuem internamente algoritmos para manutenção e estabilização do tempo, o que acarreta a melhora no posicionamento com o passar do tempo, da mesma forma que ocorre com o sincronismo realizado pelo NTP. No caso de um receptor GPS, os deslocamentos de tempo ocorrem entre os relógios dos satélites da constelação GPS e o relógio interno do receptor.

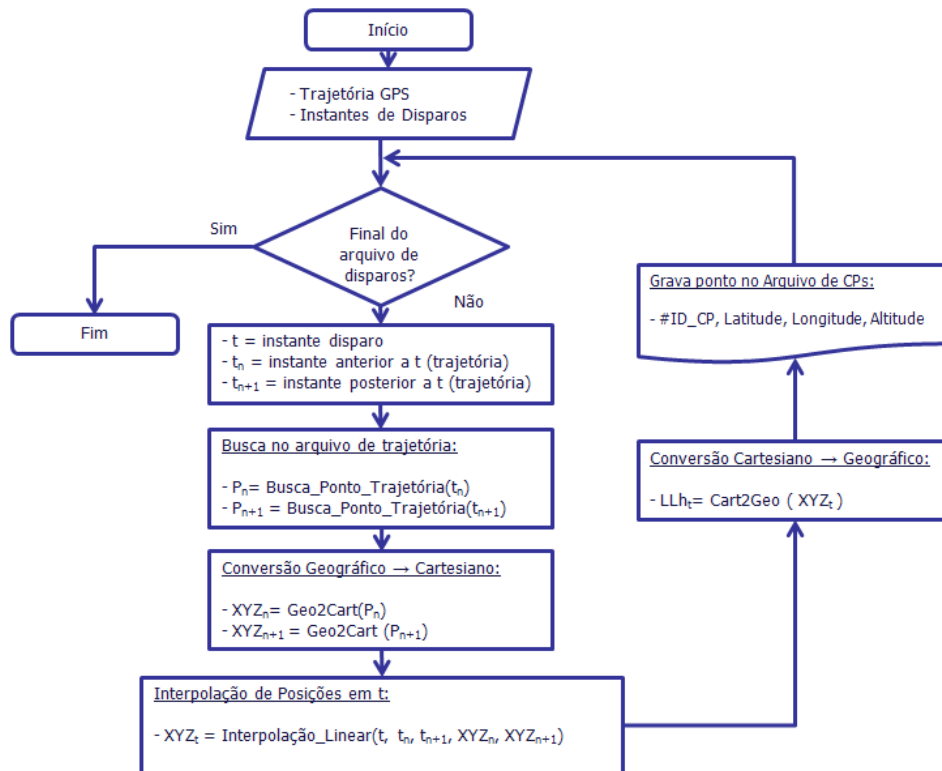


Figura 46: Interpolação das coordenadas dos CPs em função dos instantes de disparo – somente para técnica 1.

Analisando ainda o gráfico da Figura 48, especificamente nas faixas 2, 3 e 4, percebe-se que comparece um comportamento de convergência dos valores de discrepâncias para o valor próximo de 0,15 m a partir da segunda faixa, ajudando a confirmar ainda mais o que foi comentado nos dois últimos parágrafos.

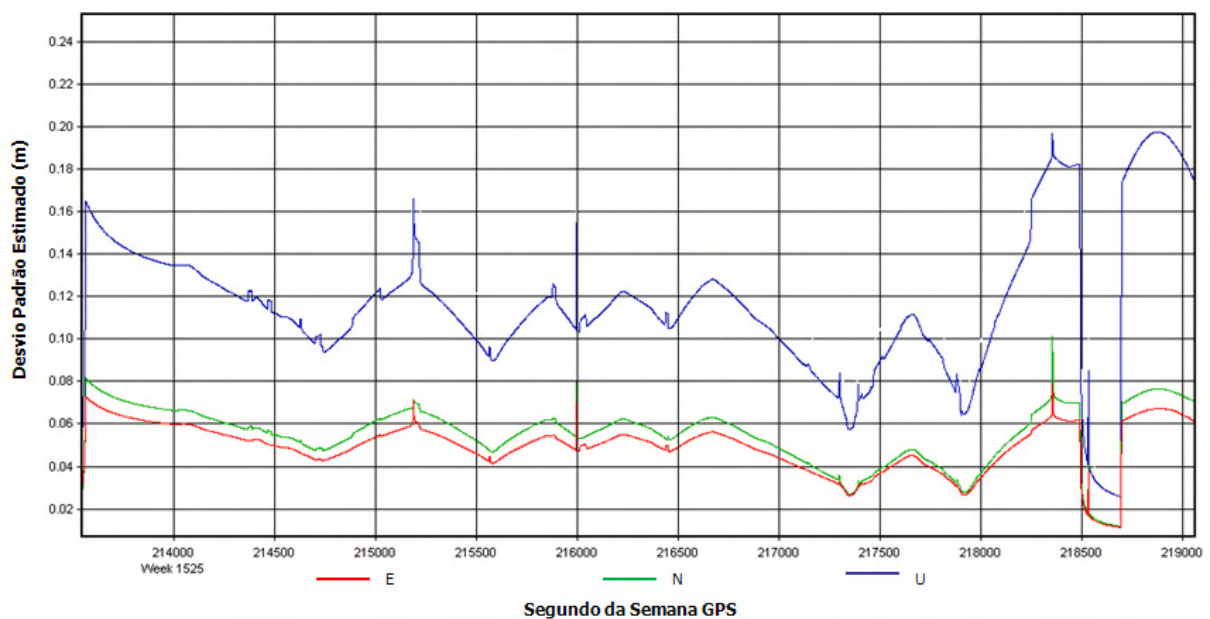


Figura 47: Desvio padrão estimado do processamento dos dados do receptor da técnica 1 (L1).

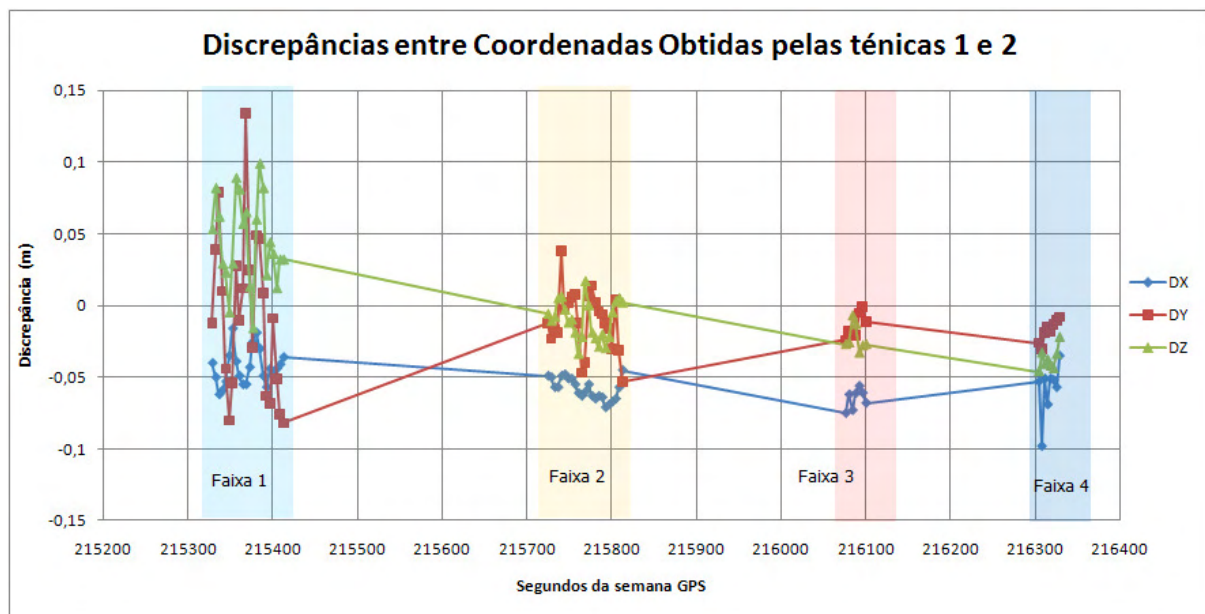


Figura 48: Discrepâncias entre coordenadas dos CPs obtidas pelas técnicas 1 e 2.

Cabe ressaltar que mesmo com algumas aparentes tendências, os valores são muito bons, ou no mínimo otimistas, já que se trata de posicionamento relativo com linha de base de aproximadamente 70 km, coleta em modo cinemático e uso de um receptor de simples frequência (Técnica 1). O processamento dos dados coletados por este receptor da técnica 1 foi feito utilizando correções IONEX, ajudando a reduzir erros sistemáticos inseridos pela ionosfera.

Além do processamento dos dados coletados em modo cinemático, fez-se necessário o processamento de dados de coletas estáticas. Estes pontos referem-se a pontos de apoio e verificação usados na autocalibração da câmara e posteriormente nos testes de fototriangulação.

5.6 TESTES DE FOTOTRIANGULAÇÃO COM INJUNÇÕES DE CPS

Para permitir a comparação e a validação das posições dos CPs com as técnicas de georreferenciamento propostas, realizou-se a fototriangulação do bloco com as imagens adquiridas durante o voo de experimento. Foram necessárias algumas edições e pré-processamentos dos dados antes de iniciar as comparações. Estes pré-processamentos podem ser sintetizados pelo fluxograma da Figura 49 e cada etapa do mesmo será detalhada a seguir.

5.6.1 CONVERSÕES ENTRE FORMATOS RAW E TIFF

A câmara Hasselblad H3D II de 39 MPixel, componente principal do sistema de aquisição do sistema SAAPI (técnica 2), quando conectada ao computador de controle, descarrega suas imagens em formato bruto (3fr) diretamente em um diretório que o usuário previamente define. Este formato é um formato proprietário, e contém informações e sinalizadores internos mantidos pela própria Hasselblad, além da própria informação da cena.

Para ser possível usar as imagens adquiridas com este sistema, faz-se necessário converter o formato de imagem 3fr para um formato aceito pelo sistema de Fotogramétrico digital (tiff, por exemplo) usado neste trabalho.

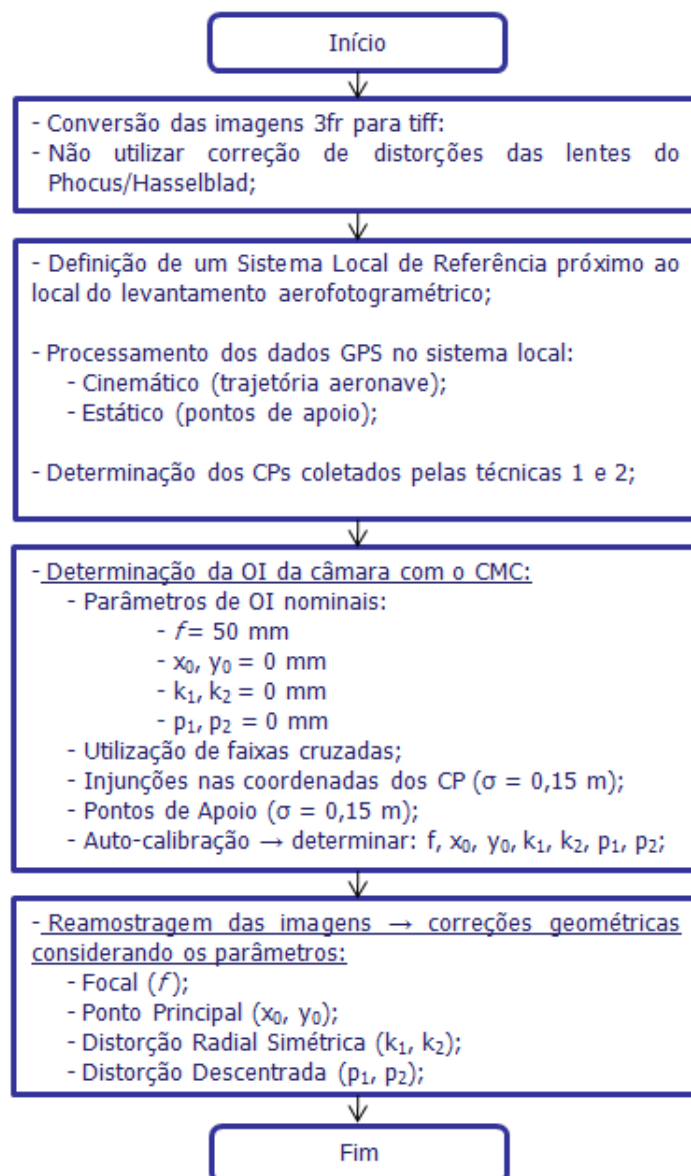


Figura 49: Fluxograma do pré-processamento dos dados coletados.

A Hasselblad produz o software Phocus (anteriormente denominado FlexColor) para realizar esta conversão de formatos de imagens digitais suportados por diversos programas de edição. Além da conversão, o Phocus fornece ao usuário diversas ferramentas para manipulação e tratamento das imagens, como ajuste de brilho, contraste, ajuste do histograma da imagem, etc. Uma destas funcionalidades diz respeito à correção da distorção das lentes da câmara conforme descreve Ruy et al. (2008).

A correção de distorção de lentes, implementada pelo Phocus, baseia-se em informações relativas à lente utilizada durante a tomada da imagem, fornecidas pelo fabricante. O programa possui internamente um banco de dados com aproximadamente 3000 lentes e seus parâmetros de distorção radial. Quando uma imagem é aberta para edição ou conversão, o Phocus detecta automaticamente o modelo da lente e disponibiliza a opção para ativar ou não esta correção no momento da conversão entre os formatos.

Neste trabalho, decidiu-se não utilizar esta opção de correção da distorção, já que, segundo Ruy et al. (2008), o software Phocus corrige a distorção em relação ao centro da imagem, e não em relação ao ponto principal definido pelas coordenadas (x_0 e y_0), como esperado em processos mais rigorosos como os utilizados neste trabalho.

Sendo assim, as imagens no formato bruto foram convertidas para o formato tiff sem qualquer tipo de correção geométrica. Todas as etapas necessárias para correção geométrica das imagens serão discutidas nas próximas seções.

5.6.2 MÓDULOS DE PROCESSAMENTO DOS DADOS GPS/INS

Os processamentos dos dados GPS foram feitos através de três módulos de software da família Waypoint (Novatel). São eles:

GrafNav: Módulo que permite realizar processamentos de dados GNSS de diversos tipos de receptores. Permite o processamento em modo relativo e PPP usando somente efemérides precisas para correção dos parâmetros das órbitas dos satélites. Este módulo destina-se exclusivamente ao processamento de dados GNSS coletados em plataformas cinemáticas e foi usado para fazer o processamento de todos os dados dos receptores embarcados neste trabalho.

(JACOBSEN, 2003). Desta forma, todos os pontos de apoio, verificação e cada posição da trajetória estão referenciadas a uma origem arbitrária definida próximo à área do voo.

O local para a origem foi escolhido de modo a sempre proporcionar valores positivos para as três componentes de coordenadas, tornando mais fácil a visualização dos valores de comparação. Porém esta origem não possui nenhum significado físico (como o nível médio dos mares).

5.6.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR DA CÂMARA

Os parâmetros de orientação interior são valores físicos que definem a geometria interna de uma câmara, como a distância focal (f), a posição do ponto principal (x_0, y_0) num dado referencial, os parâmetros de distorções das lentes, entre outros.

É importante se conhecer estes parâmetros, de forma a poder utilizá-los em sistemas Fotogramétricos digitais, permitindo que estes sistemas realizem as correções necessárias (pré-refinamento dos erros sistemáticos), melhorando a qualidade da fototriangulação, e conseqüentemente, os produtos gerados a partir dela.

Neste trabalho optou-se pelo uso da autocalibração (calibração em serviço) da câmara antes de iniciar de fato a fototriangulação de todo o bloco de imagens. Para isto algumas observações foram consideradas durante a aquisição (WOLF e DEWIT, 2000):

- Determinação com grande precisão das coordenadas dos CPs de cada imagem. Os desvios padrão obtidos do processamento dados GPS (relativo cinemático) foram menores que 0,15 m;
- Execução de faixas cruzadas, de forma a reduzir correlações entre parâmetros de OI.

Desta forma selecionou-se um pequeno bloco contendo 22 imagens compondo 3 faixas cruzadas e 9 pontos de apoio espalhados sob esta área. As coordenadas dos CPs obtidas pela técnica 2 foram usadas como injunções na autocalibração. Os pontos de passagem (Figura 52) foram medidos automaticamente pelo *software* LPS com precisão subpixel, e antes de serem usados na autocalibração, realizou-se um controle de qualidade visando remover pontos com resíduos elevados ou pontos medidos de forma equivocada pelo LPS. O bloco para autocalibração teve 469 pontos de passagens medidos nas imagens, gerando 3488 equações.

A Figura 51 mostra a configuração do bloco usado para a determinação dos parâmetros de OI por autocalibração, bem como a disposição dos pontos de apoio. A Figura 52 exibe a disposição dos pontos de passagem deste mesmo bloco. Algumas informações sobre a autocalibração podem ser encontradas na Tabela 4.

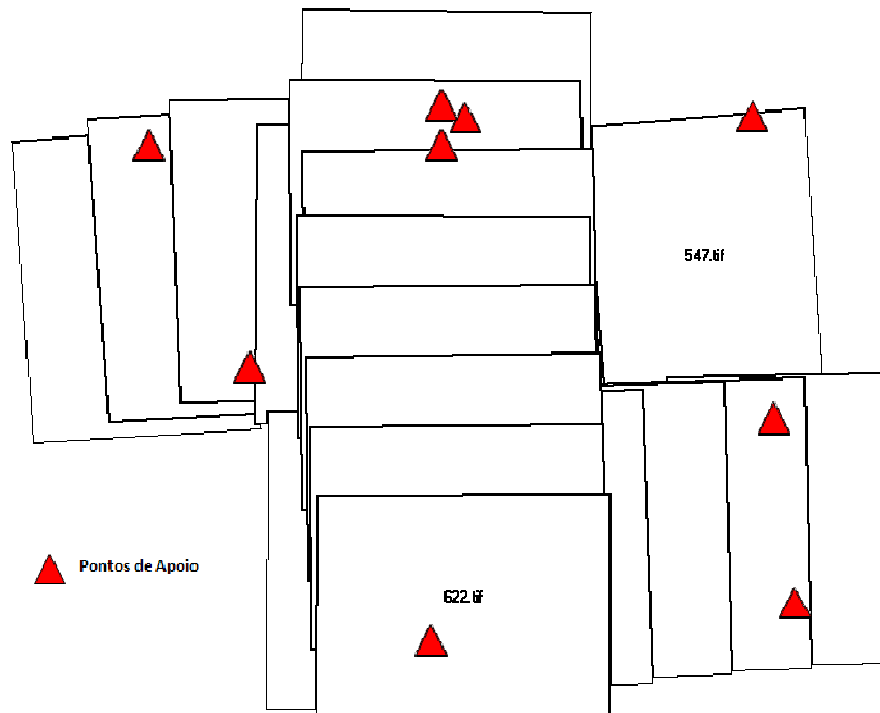


Figura 51: Bloco de imagens usadas para autocalibração da câmara, com a disposição dos pontos de apoio.

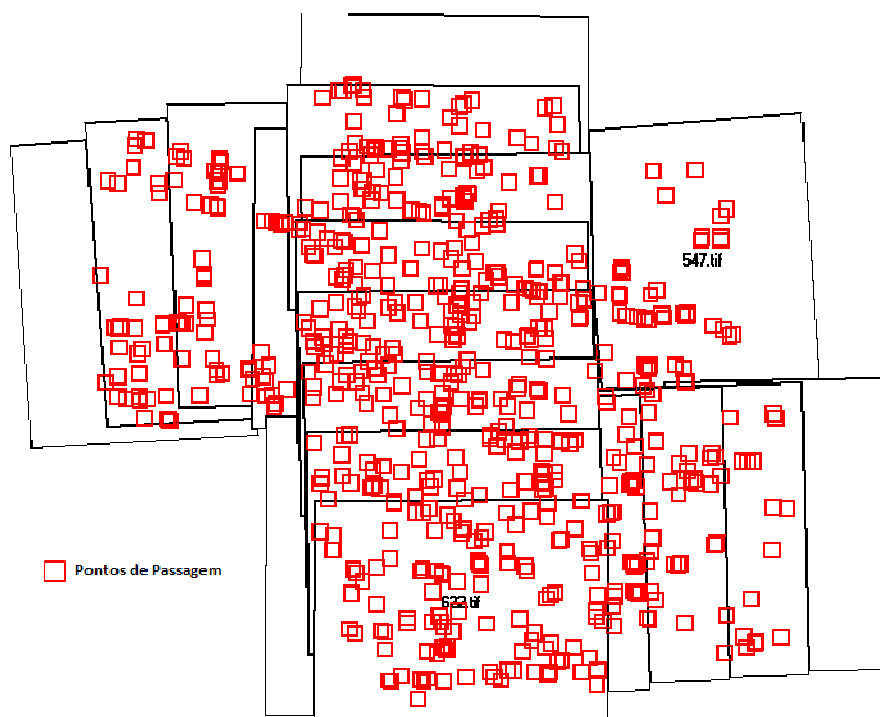


Figura 52: Distribuição dos Pontos de Passagem no bloco de autocalibração.

Tabela 4: Informações sobre a autocalibração da câmara.

Total de imagens	21
Pontos medidos nas imagens	1744
Pontos de apoio	9
Pontos fotogramétricos	469
Pontos de verificação	0
Pontos no espaço objeto	478
Número de observações	3488
Número de equações	3488
Número de parâmetros	1568
Número de injunções	90
Graus de liberdade	2010

Tabela 5: Parâmetros de OI estimados na autocalibração pelo CMC.

f (mm)	50,1810 mm $\pm$ 0,0031 mm
x₀ (mm)	-0,1689 mm $\pm$ 0,0046 mm
y₀ (mm)	0,2485 mm $\pm$ 0,0037 mm
k1 (mm⁻²)	-2,8658 ⁻⁵ mm ⁻² $\pm$ 2,5590 ⁻⁷ mm ⁻²
k2 (mm⁻⁴)	1,3452 ⁻⁸ mm ⁻⁴ $\pm$ 8,0296 ⁻¹⁰ mm ⁻⁴
k3 (mm⁻⁶)	3,1593 ⁻¹² mm ⁻⁶ $\pm$ 7,5986 ⁻¹³ mm ⁻⁶
p1 (mm⁻¹)	2,2393 ⁻⁶ mm ⁻¹ $\pm$ 5,9257 ⁻⁷ mm ⁻¹
p2 (mm⁻¹)	1,3584 ⁻⁷ mm ⁻¹ $\pm$ 5,5005 ⁻⁷ mm ⁻¹

Tabela 6: Resíduos nos pontos de apoio do bloco de autocalibração.

Ponto	dX (m)	dY (m)	dZ (m)
1013	-0,106	-0,087	-0,050
1015	-0,091	0,172	-0,024
1010	-0,143	0,014	-0,057
1012	0,142	-0,024	0,120
1017	0,179	0,012	0,003
1101	-0,064	0,001	0,022
1102	-0,080	0,046	0,025
1103	0,473	-0,107	-0,004
1106	-0,161	0,034	-0,022
Média (m)	0,017	0,007	0,001
EMQ (m)	0,198	0,077	0,050

Através da execução do software CMC, estimaram-se os parâmetros de orientação interior da câmara. O software gerou um relatório detalhado ao final do processamento contendo informações estatísticas sobre a autocalibração realizada, além dos parâmetros estimados e suas respectivas variâncias. A Tabela 5 exibe os valores estimados nesta autocalibração. A Tabela 6 exibe os resíduos nos pontos de apoio usados neste bloco.

5.6.4 REAMOSTRAGEM E CORREÇÕES GEOMÉTRICAS DAS IMAGENS

De posse dos parâmetros de OI da câmara estimados na autocalibração, passou-se à reamostragem das imagens originais para correção geométricas através de um *software* desenvolvido pelo grupo de pesquisa em Fotogrametria da Unesp, específico para esta finalidade.

O *software* tem como entrada, os parâmetros de OI estimados na autocalibração (para a reamostragem das imagens deste experimento, usaram-se os seguintes parâmetros: f , x_0 , y_0 , k_1 , k_2 , p_1 , p_2), os parâmetros de OE estimados pelo processamento dos dados GPS embarcado (X_0 , Y_0 , Z_0), coordenadas (x , y) de imagem dos pontos de passagem e dos pontos de apoio, e coordenadas de terreno dos pontos de apoio (X , Y , Z).

Após o processamento de todas as imagens criou-se um projeto do LPS, onde todas as imagens foram inseridas e o projeto configurado para uma triangulação clássica, além de outros experimentos de triangulação com injeção das coordenadas dos CPs das imagens.

É importante citar que a reamostragem das imagens permite usar o modelo de correções de distorções de lentes do LPS com valores nulos. Ou seja, informa-se somente o valor da focal (f) estimada na autocalibração, e todos os demais parâmetros de OI são informados como nulos, já que estes foram compensados na reamostragem.

Experimentos realizados por integrantes do grupo de pesquisa na Unesp, puderam detectar que os modelos de distorções implementados pelo LPS não se comportam da forma esperada em projetos envolvendo câmaras com lentes não projetadas para fins fotogramétricos. .

Como a correção deste problema interno do *software* LPS demandaria muito tempo, optou-se pelo procedimento de reamostragem, com o objetivo principal de corrigir as imagens para que o LPS se comporte da forma esperada, como se o mesmo estivesse sendo usado com uma câmara fotogramétrica, com lentes com distorções muito pequenas. A Figura 53 exibe um detalhe da imagem original e o mesmo detalhe na imagem reamostrada, onde se pode perceber o deslocamento devido às diversas correções geométricas realizadas na imagem.

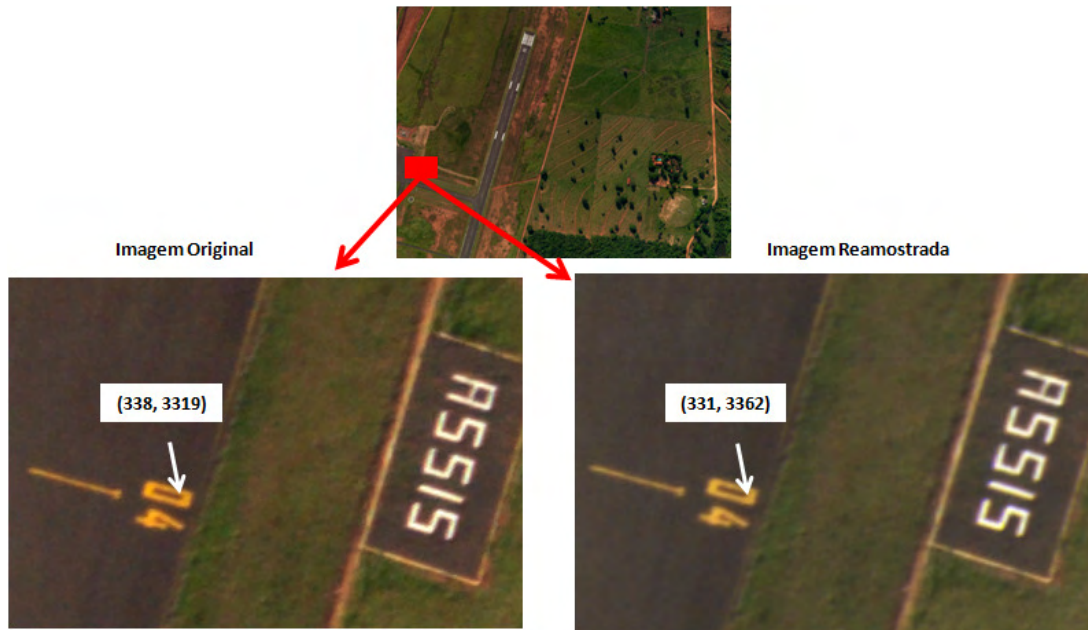


Figura 53: Deslocamento da feição devido à reamostragem da imagem usando os parâmetros da câmara.

5.6.5 FOTOTRIANGULAÇÃO DO BLOCO EXPERIMENTAL SOBRE A CIDADE DE ASSIS

Com a intenção de verificar as discrepâncias entre os valores de OE determinados por uma fototriangulação clássica e os valores obtidos com as técnicas de sincronismo 1 e 2, utilizou-se o sistema Fotogramétrico LPS para criação do projeto e a realização da fototriangulação do bloco de imagens coletadas. As configurações do projeto criado no LPS têm as seguintes opções:

- Sistema Local de Referência;
- Z médio de voo: 1150 m (em relação à origem Local);
- Z médio da região: 150 m (em relação à origem Local);
- Escala aproximada do voo: 1:19000;
- 4 faixas;
- 24 pontos de apoio;
- 7 pontos de verificação;
- 844 pontos de passagem;
- Parâmetros de OI da câmara considerados fixos;
- Incerteza nas observações feitas nas imagens: 0,5 pixel;
- Incerteza na posição dos pontos de apoio e verificação: 0,15 m;
- Coordenadas dos CPs livres: $\sigma_{x0} = \sigma_{y0} = \sigma_{z0} = 30$ m;

- Ângulos de atitudes dos CPs livres: $\sigma_k = \sigma_\phi = \sigma_\omega = 180$ graus;

A Figura 54 mostra a configuração do bloco, bem como a distribuição dos pontos de apoio e verificação utilizados, bem como o número de raios em cada ponto. A disposição de todos os pontos de passagem neste mesmo bloco é exibida na Figura 55.

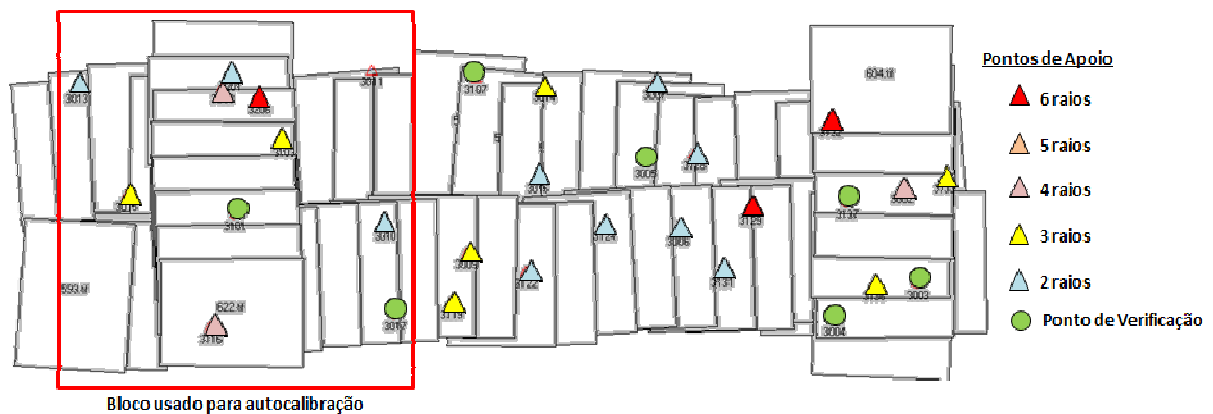


Figura 54: Configuração do bloco de e disposição dos pontos de Apoio.

O resultado da fototriangulação é exibido na Tabela 7, com valores dos resíduos e do EMQ nos pontos de verificação e de apoio usados no bloco.

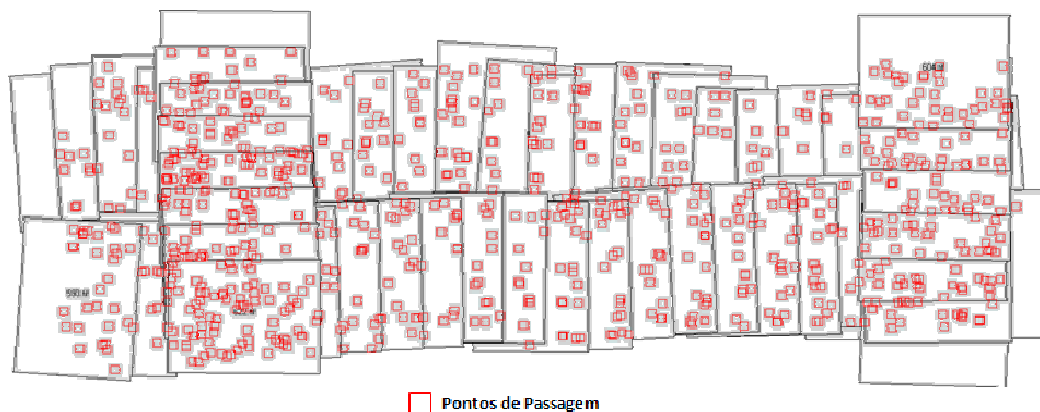


Figura 55: Disposição dos pontos de passagem.

Após a fototriangulação exportou-se os parâmetros de OE gerados pelo LPS para a verificação das discrepâncias com os parâmetros de OE obtidos pelos GPS com as técnicas de sincronismo 1 e 2. A Tabela 8 as estatísticas dos valores de discrepâncias entre coordenadas dos CPs obtidas com as duas técnicas utilizadas e os valores estimados na fototriangulação. As Figuras 56 e 57 exibem os gráficos destas discrepâncias para a técnica 1 e a técnica 2, respectivamente.

Tabela 7: Resíduos nos pontos de apoio e verificação para o experimento com a configuração apresentada na Figura 54.

Pontos de Apoio				Pontos de Verificação			
Ponto	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	Ponto	dX (m)	dY (m)	dZ (m)
3002	-0,048	0,075	-0,028	3003	-0,018	-0,074	0,080
3006	0,003	0,155	0,082	3107	-0,030	-0,084	-0,270
3007	0,051	0,079	0,016	3004	0,037	0,170	0,034
3009	0,060	0,081	0,009	3005	-0,191	0,173	-0,005
3010	0,053	0,005	0,000	3017	-0,338	0,069	0,249
3011	0,007	-0,005	-0,001	3101	-0,233	-0,111	0,144
3013	0,063	0,007	-0,017	3137	0,111	-0,024	0,122
3014	0,037	-0,005	-0,001	3003	-0,018	-0,074	0,080
3015	0,006	-0,112	0,019	3107	-0,030	-0,084	-0,270
3016	0,041	-0,099	-0,026	3004	0,037	0,170	0,034
3103	-0,013	-0,074	-0,049				
3116	-0,071	0,059	-0,004				
3119	0,068	-0,022	-0,014				
3122	-0,146	-0,079	-0,008				
3124	-0,172	0,013	-0,030				
3128	0,003	0,084	0,043				
3129	-0,074	0,029	-0,012				
3131	0,118	-0,058	-0,019				
3132	-0,084	-0,229	-0,061				
3133	0,096	-0,030	0,037				
3136	0,037	0,033	0,007				
3201	0,117	0,006	-0,007				
3203	-0,360	0,100	-0,012				
3206	0,204	-0,012	0,079				
Média	0,000	0,000	0,000	Média	-0,094	0,016	0,050
Desvio	0,114	0,082	0,034	Desvio	0,162	0,120	0,163
EMQ	0,112	0,081	0,033	EMQ	0,177	0,113	0,159

Tabela 8: Discrepâncias entre as coordenadas dos CPs: Fototriangulação x técnica 1 e 2.

	Fototriangulação x Técnica 1			Fototriangulação x Técnica 2		
	DX	DY	DZ	DX	DY	DZ
Média (m)	0,0385	0,0180	0,0140	0,0317	0,0144	0,0141
EMQ (m)	0,1963	0,1343	0,1207	0,1781	0,1201	0,1186
EMQ (GSD*)	1,3	0,9	0,8	1,2	0,8	0,8

Como era de se esperar, os gráficos são praticamente os mesmos, visto que, as discrepâncias nas coordenadas obtidas pelas duas técnicas (Figura 50) não ultrapassaram 0,15 m. Além disso, o comportamento pode ser considerado bastante aleatório, não implicando tendência em nenhum dos dois processamentos.

Pela Tabela 8 pode-se observar uma pequena redução nas discrepâncias entre os CPs obtidos pela técnica 2 e os CPs obtidos por fototriangulação, o que pode estar relacionado com a maior acurácia obtida pelo receptor desta técnica 2 (receptor de dupla frequência). Erros referentes ao sincronismo poderiam ser absorvidos usando-se parâmetros

de *shift* e *drift* na fototriangulação, porém o LPS não dá suporte à determinação destes parâmetros que, portanto não foram considerados nos processamentos.

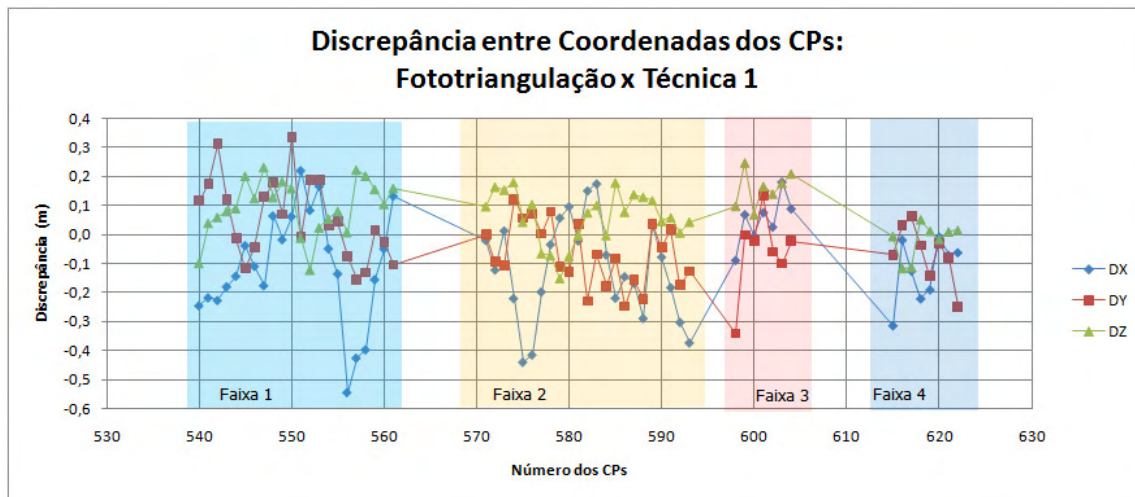


Figura 56: Discrepâncias entre os parâmetros de OE da fototriangulação e a técnica 1.

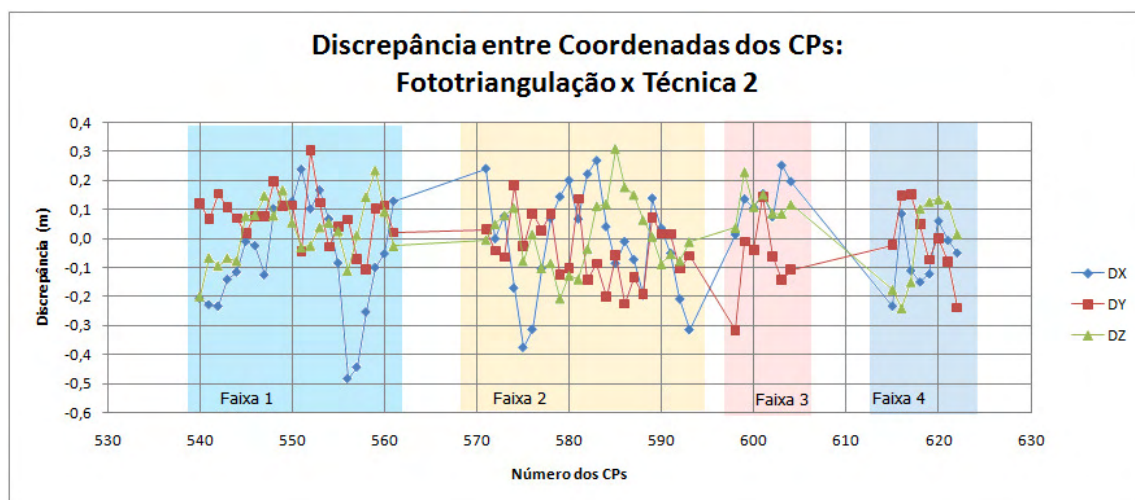


Figura 57: Discrepâncias entre os parâmetros de OE da fototriangulação e a técnica 2.

Observando as Figuras 56 e 57, bem como a Tabela 8, pode-se concluir que a técnica 1 e a técnica 2 são compatíveis, já que as coordenadas obtidas de uma fototriangulação clássica e as coordenadas dos CPs determinados por essas técnicas divergem no máximo em 0,6 m (módulo).

5.6.6 FOTOTRIANGULAÇÃO COM INJUNÇÕES NAS COORDENADAS DOS CPS OBTIDOS PELA TÉCNICA 1

Esta seção trata do uso dos CPs determinados pela técnica 1 como injunções na fototriangulação, e a posterior análise dos resíduos nos pontos de verificação. Somente a técnica 1 foi utilizada neste caso, por se tratar do desenvolvimento propriamente dito, através da combinação de *hardware* e *software* com a finalidade de registrar eventos a uma base de tempo conhecida.

Devido aos resultados dos experimentos anteriores, pode-se concluir que as técnicas 1 e 2 proporcionaram resultados semelhantes no caso estudado, não justificando a realização deste experimento com os dados das duas técnicas. Desta forma, somente as coordenadas determinadas pela técnica 1 serão usadas como injunções na fototriangulação do bloco.

No caso do experimento proposto a seguir é importante fazer o uso das mesmas configurações no software LPS para a execução da fototriangulação e comparação das discrepâncias nos pontos de verificação.

De forma a manter a configuração dos pontos de verificação constante, definiu-se dois conjuntos com pontos de verificação. Um conjunto de pontos será o mesmo para todos os experimentos (conjunto 1), e o que variará em cada teste será o número de pontos de apoio. Estes por sua vez, serão retirados da categoria apoio a cada experimento, e passarão a fazer parte de outro conjunto de pontos de verificação, o conjunto 2.

Esta configuração foi definida de forma a permitir que os valores estimados em cada experimento de fototriangulação possam ser comparados a uma referência comum (conjunto de pontos de verificação). Em cada experimento, serão analisados os resíduos nos pontos de verificação, e estes valores serão exibidos na Tabela 10, e em gráficos para facilitar comparação.

A Figura 58 mostra a disposição dos pontos de apoio e de verificação para o primeiro experimento. A disposição dos pontos de apoio e verificação nos demais experimentos pode ser encontrada no Apêndice A deste trabalho. A disposição dos pontos de passagem é a mesma da Figura 58. Deve-se considerar que os pontos de verificação exibidos nesta Figura serão os do conjunto 1.



Figura 58: Disposição dos Pontos de apoio e verificação no bloco de imagens.

As injunções nas coordenadas dos CPs foram feitas considerando uma variância de 0,20 m para as componentes horizontais e verticais, no caso do GPS de simples frequência (técnica 1).

Tabela 9: Configurações dos experimentos realizados.

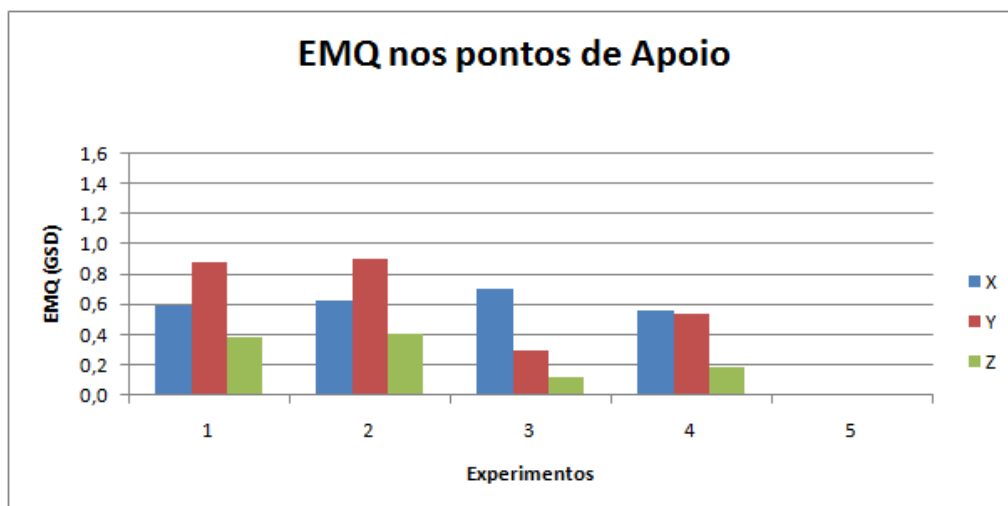
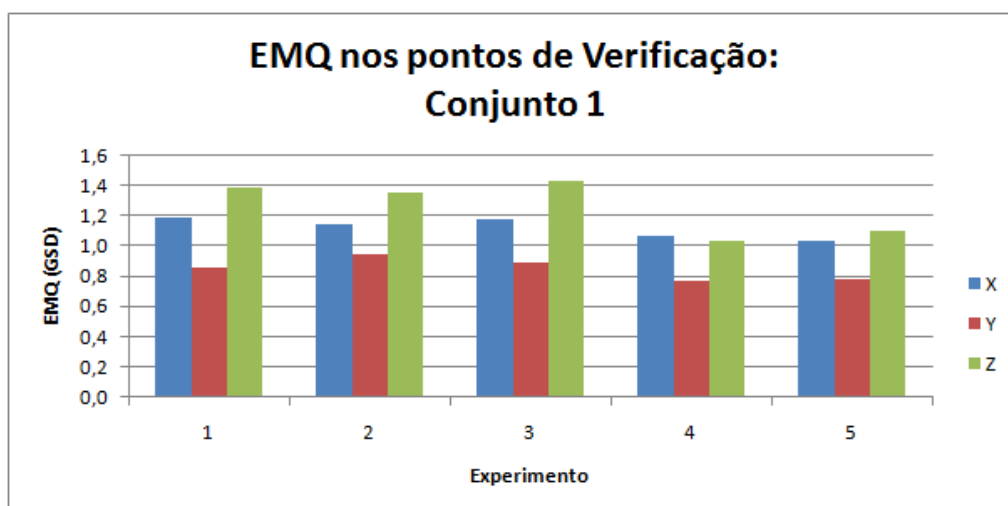
Experimento	GPS	Apoio	Verificação: Conjunto 1	Verificação: Conjunto 2	Parâmetros de OE Fixados	Parâmetros de OI Fixados
1	L1	8	22	0	X_0, Y_0, Z_0	f, x_0, y_0, k_1, k_2
2	L1	5	22	3	X_0, Y_0, Z_0	f, x_0, y_0, k_1, k_2
3	L1	3	22	5	X_0, Y_0, Z_0	f, x_0, y_0, k_1, k_2
4	L1	1	22	7	X_0, Y_0, Z_0	f, x_0, y_0, k_1, k_2
5	L1	0	22	8	X_0, Y_0, Z_0	f, x_0, y_0, k_1, k_2

Estes valores de variância englobam incertezas do processamento relativo em modo cinemático, erros de medidas do vetor (*Lever Arm*) entre antena GPS e a câmara, além de pequenas variações no nivelamento do berço da aeronave. Os resultados dos processamentos são exibidos na Tabela 10. As Figuras 59, 60 e 61 sintetizam os valores desta tabela.

Pode-se observar pela Figura 59 (conjunto 1 de pontos de verificação) que mesmo reduzindo-se o número de pontos de apoio em cada experimento, as discrepâncias mantiveram-se com valores bem similares. O mesmo pode ser observado pelo gráfico da Figura 60.

Tabela 10: EMQ nos pontos de apoio e verificação – Conjuntos 1 e 2.

Experimentos		Apoios			Verificação Conjunto 1			Verificação Conjunto 2		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	Média	-0,008	0,015	-0,025	0,095	0,011	-0,076	-	-	-
	EMQ	0,088	0,131	0,058	0,179	0,129	0,207	-	-	-
	EMQ(GSD)	0,6	0,9	0,4	1,2	0,9	1,4	-	-	-
2	Média	0,009	0,018	0,004	0,085	0,019	-0,081	-0,072	0,042	0,009
	EMQ	0,093	0,135	0,061	0,172	0,141	0,203	0,093	0,136	0,102
	EMQ-GSD	0,6	0,9	0,4	1,1	0,9	1,4	0,6	0,9	0,7
3	Média	0,007	0,040	-0,001	0,081	-0,027	-0,074			
	EMQ	0,105	0,044	0,018	0,176	0,133	0,215	-0,034	-0,020	-0,017
	EMQ(GSD)	0,7	0,3	0,1	1,2	0,9	1,4	0,073	0,199	0,147
4	Média	0,084	0,080	0,027	0,082	-0,011	0,021	-0,047	0,015	0,084
	EMQ	0,084	0,080	0,027	0,160	0,116	0,155	0,136	0,158	0,165
	EMQ(GSD)	0,6	0,5	0,2	1,1	0,8	1,0	0,9	1,1	1,1
5	Média	-	-	-	0,087	0,019	-0,075	-0,025	0,049	-0,022
	EMQ	-	-	-	0,155	0,117	0,165	0,136	0,158	0,128
	EMQ(GSD)	-	-	-	1,0	0,8	1,1	0,9	1,1	0,9

**Figura 59:** Erro Médio Quadrático nos pontos de apoio nos experimentos realizados.**Figura 60:** Erro Médio Quadrático nos pontos de verificação – conjunto 1.

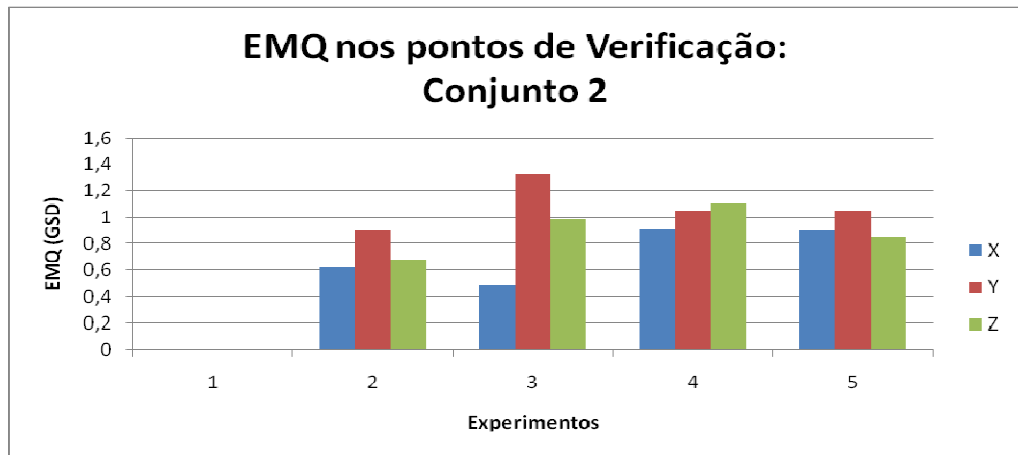


Figura 61: Erro Médio Quadrático nos pontos de verificação – conjunto 2.

Observando os gráficos das figuras 59, 60 e 61 conjuntamente, pode-se notar que:

- À medida que os pontos de apoio são usados como pontos de verificação o EMQ dos pontos do conjunto 1 diminui. Este fato pode estar associado ao erro introduzido por medições dos pontos de apoio na imagem, que foi feita de forma manual, e monoscopicamente, introduzindo um erro de medida que é propagado para todo o bloco;
- No caso estudado, os resultados mostram que a determinação das coordenadas do CP por georreferenciamento direto (tanto com o receptor de simples frequência e a técnica de sincronização desenvolvida, quanto pelo receptor de dupla frequência SPAN-CPT) e o processo automático de medição de pontos por correlação permitem uma exatidão final que não é aumentada com a introdução de mais pontos de apoio;
- Pode-se notar que a reamostragem das imagens do bloco de fato compensou os erros sistemáticos na imagem, como a translação do ponto principal e distorções das lente da câmara, cujos parâmetros foram estimados na calibração, visto que os parâmetros se comportaram muito bem com todo o bloco, proporcionando os resultados observados;
- Mesmo com a redução ou a eliminação total dos pontos de apoio, o erro médio quadrático se manteve na casa do 1 GSD, o que implica que os CPs determinados pela técnica 1 foram estimados de forma

satisfatória, permitindo seu uso em aplicações de aquisição de imagens aéreas para mapeamento;

- A extrapolação destas conclusões para outros blocos de maiores dimensões e com outras configurações depende de validação experimental, o que está fora do escopo deste trabalho, deixando-se como sugestão para trabalhos futuros.

CAPÍTULO VI

6.1 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho, apresentaram-se estudos, análises e desenvolvimentos necessários para permitir a obtenção de informações para o georreferenciamento direto de imagens digitais, tomadas com uma câmara digital de médio formato por uma plataforma aérea. Como embasamentos foram realizadas pesquisas e consultas bibliográficas a respeito deste tipo de abordagem de sincronismo de dispositivos e processos para obtenção a respeito dos CPs das imagens nos instantes em que estas foram tomadas.

Desta forma, tornou-se importante o estudo de sistemas de navegação e posicionamento, que são peça-chaves neste trabalho. Grande ênfase foi dada ao sistema GPS, por ter sido utilizado neste trabalho como referência de tempo e posição nos instantes de aquisição das imagens.

Um dos objetivos deste trabalho consistiu na implementação e validação de sistemas de sincronismo propostos, tendo suas diferenças mais evidentes em função da referência de tempo usadas em cada técnica proposta, bem como a qualidade posicional proporcionada pelos receptores GPS.

Antes das fases de validação e testes, fez-se necessário o desenvolvimento de *hardware* necessário para permitir o correto sincronismo entre todos os dispositivos envolvidos no processo de aquisição. Além disso, modificações no sistema operacional Linux, além de implementações de *software* foram necessárias para permitir registrar os instantes de disparo das câmaras.

Como se tratou de sincronismo foi necessário também estudar as escalas de tempos envolvidas e fatores que influenciam a manutenção do tempo em computadores de uso pessoais, como os usados neste trabalho para fins de registro de eventos e sincronismos de dados e escalas de tempo. Deve-se citar a importância do NTP em conjunto com a extensão LinuxPPS para o núcleo do Linux, que juntos proporcionaram ótimos resultados no que diz respeito ao sincronismo entre o tempo do receptor GPS e o tempo do computador.

Esta mesma extensão usada pelo NTP foi usada para fazer o registro dos instantes das tomadas das imagens em uma escala temporal, para posteriormente, tornar possível a interpolação das coordenadas dos CPs, em função destas marcas de tempo.

Interfaces eletrônicas e modificações simples no hardware do computador de sincronismo e registro de eventos foram necessárias para permitir os corretos registros dos instantes de disparo da câmara.

O sistema de sincronismo proposto foi desenvolvido, testado em laboratório, e instalado na aeronave usada nos experimentos, de forma a permitir obter concomitantemente o sincronismo dos dispositivos e o registro dos eventos de disparos da câmara.

A técnica 1 estudada usa um sistema operacional Linux modificado, com o NTP responsável pelo sincronismo dos relógios do GPS (simples frequência, com saída 1 PPS) e computador, e registros de eventos via porta serial. A técnica 2 fez uso de um sistema comercial SPAN/CPT (GPS de dupla frequência, sistema inercial acoplado, e registros de eventos interno) que foi considerado referência de tempo e posição nas verificações e comparações das técnicas de sincronismo.

A realização dos experimentos se deu em um vôo sobre a cidade de Assis/SP, de forma a permitir a realização de uma fototriangulação das imagens adquiridas. Desta forma, com os resultados da fototriangulação pode-se verificar a influência de erros de sincronismo sobre os CPs e como estes erros são propagados para o terreno, sendo detectados através de pontos de verificação.

A primeira análise foi feita pela comparação dos instantes de disparos registrados pela técnica 1 e 2. Notou-se que a combinação Linux+NTP+LinuxPPS proporcionou ótimos resultados no sincronismo entre os relógios do GPS e do computador, fornecendo diferenças máximas de 0,00004 s (40 μ s), quando corrigidos de valores registrados durante as amostragens realizadas pelo NTP, para ajuste do relógio do computador (16,67 minutos de sincronismo).

Este erro no sincronismo entre o receptor GPS e o computador, insere uma discrepância inferior a 0,005 m nos valores de coordenadas determinadas por interpolação dos CPs em função do tempo, sendo totalmente desprezível.

É importante citar que o LinuxPPS em conjunto com o NTP foi usado para ajustar o horário do computador via pulso 1 PPS e mensagens NMEA vindas do GPS. Assim, os disparos da câmara foram registrados diretamente no computador já sincronizado com o tempo GPS, usando o pino 1 da porta serial.

De posse dos instantes referentes ao disparo da câmara, passou-se aos processamentos dos dados GPS coletados em vôo. Interpolações das posições dos CPs pelas duas técnicas, em função da trajetória e dos instantes de disparos, foram feitas usando o software de processamento dos dados GPS (WayPoint/GrafNav). Comparações entre as

coordenadas dos CP das duas técnicas proporcionaram discrepâncias menores que 0,5 m em todo o levantamento, mesmo considerando o uso de um receptor de simples frequência como origem de coordenadas a serem interpoladas.

É importante destacar que foram feitas as compensações referentes ao vetor que liga a câmara ao centro de fase da antena, proporcionando valores referentes ao CP de cada imagem (*Lever Arm*).

Para permitir a realização da fototriangulação do bloco, além da calibração da câmara utilizada, considerou-se um sistema local, de maneira a evitar distorções de escalas inseridas por projeções cartográficas, como a UTM. A realização da autocalibração foi feita em um bloco reduzido de imagens, considerando faixas cruzadas, posições dos CPs com precisões proporcionadas pelo sistema SPAN/CPT – GPS L1/L2 e 9 pontos de apoio. A estimação dos parâmetros foi feita através de uma fototriangulação com parâmetros adicionais, usando-se o software CMC.

Como forma de testar a influência dos erros de sincronismo e registro de eventos, 5 experimentos foram realizados considerando o uso dos CPs obtidos pelas técnicas 1 na fototriangulação das imagens adquiridas. Para estes experimentos, consideraram-se fixos os parâmetros da câmara (OI) e as coordenadas dos CPs.

Variou-se o número de pontos de apoio e de verificação, além do uso de dois conjuntos de pontos de verificação: um conjunto com 22 pontos e outro conjunto composto pelos pontos de apoio, que foram reduzidos em cada experimento, até não se fazer uso de pontos de apoio, no experimento 5.

Apesar de se considerar uma variância maior para as posições vindas do receptor de simples frequência ($\sigma = 0,20$ m), os valores das discrepâncias nos pontos de verificação em todos os experimentos permaneceram muito similares, possibilitando concluir que a técnica 1 foi suficiente para a obtenção das informações de georreferenciamento de imagens digitais, no caso estudado.

6.2 RECOMENDAÇÕES

No decorrer do desenvolvimento deste trabalho, deparou-se com outras possibilidades para o sistema, principalmente no que diz respeito à implementação, mas que não foram consideradas no projeto.

Desta forma, como sugestões para trabalhos futuros recomendam-se:

- Uso de um receptor com duas portas seriais, onde uma delas fornece mensagens NMEA, e a outra os dados para pós-processamento (o sinal 1 PPS é indispensável);
- Implementação de um *driver* para o NTP, que permita usar o GPS SuperStar II, coletando suas mensagens para pós-processamento, e internamente ao *driver*, obter-se os dados de sincronismo, como segundo e semana GPS;
- Realizar testes e implementações com micro-controladores (por exemplo, da família PIC16F), com o intuito de realizar o registro de evento em computadores mais modernos, que não possuam porta serial ou paralela;
- Realizar testes usando o registro de eventos via porta paralela com computadores mais antigos. Atualmente computadores não são fabricados com portas seriais ou paralelas (substituídas por portas USB). As portas USB inserem um atraso na comunicação, influenciando diretamente no resultado do sincronismo, como o proposto neste trabalho;
- Estudos sobre o uso do RTAI em conjunto com o NTP e LinuxPPS para operações críticas de sincronismo, considerando inclusive novas extensões do núcleo do Linux com suporte ao *NANO Kernel*;
- Estudo sobre a taxa máxima de registros usando a abordagem da técnica 1, para aplicações de contadores de eventos com grandes taxas de ocorrências no tempo (vídeo, laser, odômetros, etc);
- Uso de receptores GPS de navegação sem sinal 1PPS para sincronismo de dispositivos (técnica 1 e 2);
- Testes com o dispositivo implementado em blocos de maiores dimensões, para verificar se o comportamento é similar ao caso estudado neste trabalho.

REFERÊNCIAS

BRIDI, M. M.; GALO, M.; TOMMASELLI, A. M. G.; HASEGAWA, J. K. Avaliação do efeito da variação da temperatura em câmaras digitais: resultados preliminares. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA E V COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS**, 2007, Presidente Prudente. Anais... Presidente Prudente: Universidade Estadual Paulista, 2007, v. 1, p. 989-995.

COLOMINA, I. **Modern Sensor Orientation Technologies and Procedures**. OEEPE – Integrated Sensor Orientation: Test Report and Workshop Proceedings. Frankfurt, Kartographie und Geodasie, 2002.

COMPASS. Beidou/Compass. Disponível em: <<http://www.globalsecurity.org/space/world/china/beidou.htm>>. Acesso em: 18 de abr. 2009.

CRAMER, M.; STALLMANN, D.; HAALA, N. Using GPS/Inertial Exterior Orientation Measurements for Photogrammetric Point Determination. In: **ISPRS Workshop Com III.1: "Direct Versus Indirect Methods of Sensor Orientation"**, 1999, Barcelona, Proceedings of ISPRS Workshop Barcelona: ISPRS, nov. 1999.

FREIBERG J. J.; KRUEGER, C. P. Precisão e Confiabilidade do posicionamento RTK com o emprego do programa GNRT. In: **III COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODESICAS- Novos Desenvolvimento em Ciências Geodésicas**, 2003, Curitiba. Anais... III COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODESICAS- Novos Desenvolvimento em Ciências Geodésicas, 2003. v. 1.

GPLV3. **GNU General Public License**. Disponível em <<http://www.gnu.org/copyleft/gpl.html>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2009.

GRAHAM, R. W.; READ, R. E. Practical Experiences with Films, Cameras and Navigation System, **Photogrammetric Record**, v.16, n. 91, p. 19-36, April 1998.

HABIB, A. F.; MORGAN, M. F. Small format digital cameras for mapping applications: Calibration and Stability Analysis. In: **Série em Ciências Geodésicas**. v. 3, Curitiba, 2003.

JACOBSEN K. **System Calibration for Direct and Integrated Sensor Orientation, Theory, Technology and Realities of Inertial/GPS Sensor Orientation**, ISPRS WG I/5, Barcelona 2003, on CD ROM, 6 p.

JUBANSKI, J.J.; MITISHITA, E.A. Algoritmo para Interpolação de Centros de Fase para Voo Apoiado Através do Filtro De Kalman. **Revista Brasileira de Cartografia**, Presidente Prudente, v. 57, n. 3, p. 204-212, 2005.

JEKELI, C. **Inertial Navigation Systems With Geodetic Applications**. New York: Walter de Gruyter, 2001.

KING, A. D.; FRIN, B. Sc. Inertial Navigations – Forty years of evolution. **GEC Review**, v. 13, n. 3, p. 140-149, 1998.

KOCAMAN, S. **GPS and INS integration with Kalman Filtering for Direct Georeferencing of Airborne Imagery**. Geodetic Seminar Report. Institute of Geodesy and Photogrammetry, 2003.

LIMA, S. R. S. **Integração GPS/INS Utilizando Sensores Inerciais Baseados em Sistemas Microeletromecânicos (MEMS)**. 2005. 136 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LINUXPPS. **Implementation of the Pulse Per Second API for GNU/Linux version 2.6**. Disponível em <http://wiki.enneenne.com/index.php/LinuxPPS_support>. Acesso em: 18 de Janeiro de 2009.

MARINHA-BR. **Sistemas Hiperbólicos de Navegação**. Disponível em <www.mar.mil.br/dhn/bhmn/download/cap-36.pdf>. Acesso em: 12 de ago. de 2008.

MILLS, D. L. On the Accuracy and Stabillity of Clocks Synchronized by the Network Time Protocol in Internet System. University of Delaware, **Computer Communication Review**, v. 20, n. 1, p. 65-75, 1990.

MILLS, D. L. **RFC-1305 – Network Time Protocol – Specification, Implementation and Analysis**. University of Delaware, Newark, March 1992. Disponível em: <<http://www.faqs.org/rfcs/rfc1305.html>> Acesso em abr. de 2008.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2ª ed., São Paulo: Editora UNESP, 2008, 476p.

NAVY, U. S. **Eletronic Technician: Navigation Systems**, v. 5, April 1994.

NTP. **Official NTP Documentation**, Disponível em: <<http://www.eecis.udel.edu/~mills/ntp/html/index.html>>. Acesso em abr. de 2008.

REIS, T. T. ; TOMMASELLI, A. M. G. ; RUY, R. S. . Módulo Computacional para Geração Semi-Automática de Planos de Vôos Fotogramétricos. In: Cobrac 2006 - Congresso Brasileiro

de Cadastro Técnico Multifinalitário, 2006, Florianópolis. **Anais do Cobrac**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

RUY, R. S. **Desenvolvimento e Validação Geométrica de um Sistema para Mapeamento com Câmaras Digitais de Médio Formato e Georreferenciamento Direto**. 2008. 261 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia: Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

RUY, R. S. **Geração Automática de Estereomodelos a partir de Imagens Digitais Georreferenciadas**. 2004. 133 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

RUY, R. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M.; HASEGAWA, J. K.; REIS, T. T. Testes de calibração com o modelo de correção das lentes do software Flexcolor - Hasselblad, 2008, Recife. Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. **Anais do II SIMGEO**. Recife, 2008. p. 1-1.

SCHERZINGER, B. M. History of Inertial Navigation Systems in Survey Applications. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. p. 1225-1226, nov. 2001.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, methods, and applications**. 2.ed. New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

SKALLOUD, J. **Optimizing Georeferencing of Airborne Survey Systems by INS/DGPS**. 1999. Ph.D Thesis. Dept of Geomatics Engineering. The University of Calgary, Calgary.

TOMMASELLI, A. M. G. Mapeamento com Câmaras Digitais: Análise de Requisitos e Experimentos. XX Congresso Brasileiro de Cartografia. 2001, Porto Alegre. **Anais eletrônicos – CD-ROM**. Rio de Janeiro: SBC, 2001.

WIS, M.; SAMSÓ, L.; AIGNER, E. COLOMINA I. Current Status and Capabilities of Experimental System TAG. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, vol. 34, 2004.

WOLF, P.R., DEWITT, B.A. **Elements of Photogrammetry: with Applications in GIS**. 3rd ed. McGRAW-HILL, 2000.

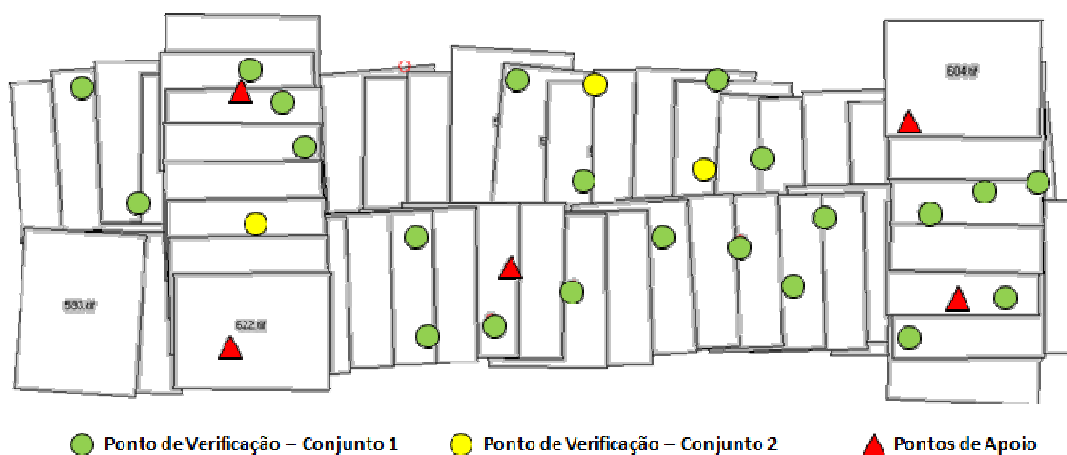
APÊNDICE A

PONTOS DE APOIO E VERIFICAÇÃO DOS EXPERIMENTOS DA SEÇÃO 5.6.6

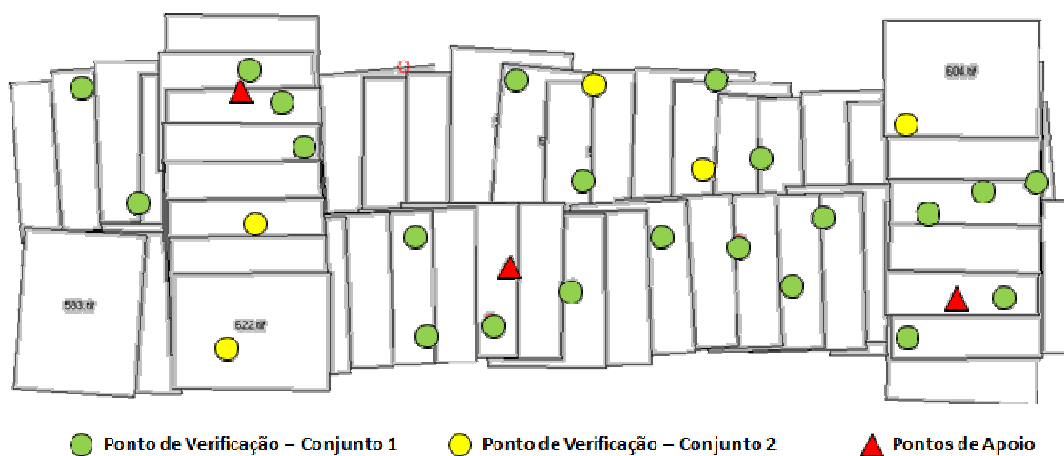
Experimento 1:



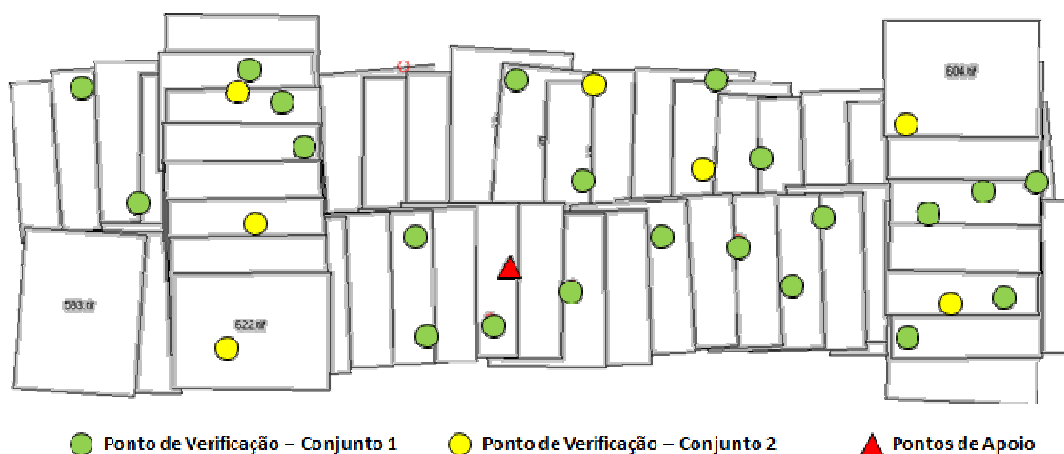
Experimento 2:



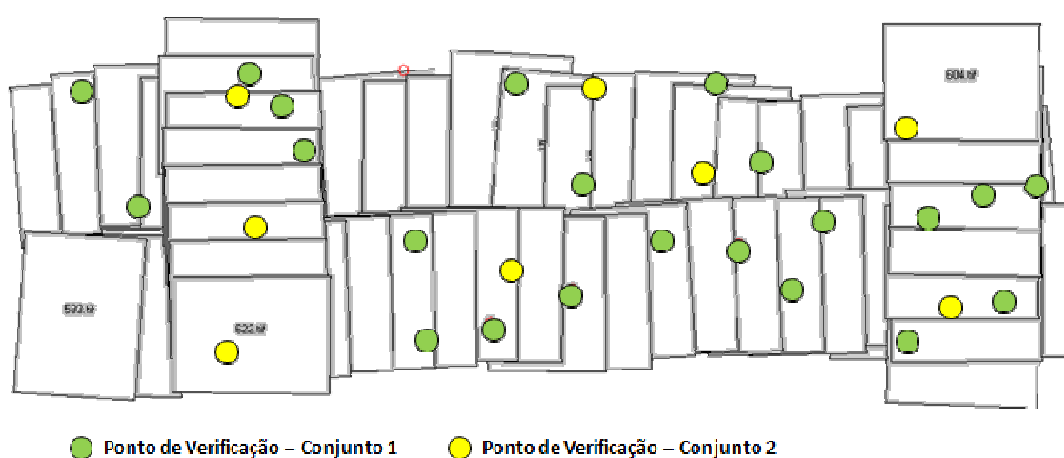
Experimento 3:



Experimento 4:



Experimento 5:



ANEXO A

Especificações técnicas do sistema SPAN/CPT da Novatel

Formato dos dados de Saída	Dados da IMU (Acelerações e razões angulares) Dados GPS (Medidas Brutas, posições e Velocidades)
Taxa de coleta	IMU - 100 Hz, GPS – 5 Hz Somente GPS: 20Hz
Soluções em Tempo Real	Correções OmniStar (VBS, HP, XP) Por Ponto Simples (L1 ou L1/L2) DGPS, SBAS, CDGPS RTK
Solução Pós-Processada	Waypoint Inertial Explorer
Bias	Acelerômetros: ± 50 mg Giroscópios: $\pm 20^\circ/\text{h}$
Range	Acelerômetros: ± 10 g Giroscópios: $\pm 375^\circ/\text{s}$
Fator de Escala	Acelerômetros: 4000 ppm Giroscópios: 1500 ppm
Consumo	15W Máximo (Voltagem: 9 a 18 Vdc)
Temperatura de operação	-40°C a 65°C
Velocidade Máxima de Operação	515 m/s
Peso	2,4 kg
Dimensões (L x A x P)	152 x 168 x 89 mm
Acurácia (RMS)	Posição: 0,1 a 0,7 m (Omnistar) Ponto Simples L1: 1,8 m Ponto Simples L1/L2: 1,5 m DGPS: 0,45 m RTK: 1 cm + 1pp a 0,20 m Velocidade: 0,02 m/s Atitude: 0,05° (roll, pitch) e 0,1° (heading) Tempo: 20ns

Fonte: <http://www.novatel.com/Documents/Papers/SPAN-CPT.pdf>

Especificações técnicas do receptor SuperStar II

Formato dos dados de Saída	Medidas Brutas GPS, posições e Velocidades ou Mensagens NMEA
Taxa de coleta	GPS – 1 Hz
Soluções em Tempo Real	Por Ponto Simples WAAS DGPS
Solução Pós-Processada	Waypoint Inertial Explorer
Consumo	0,5 ou 0,8 W Máximo (Voltagem: 3,3 ou 5 Vdc)
Temperatura de operação	-35°C a 75°C
Velocidade Máxima de Operação	514 m/s
Peso	22 g
Dimensões (L x A x P)	47 x 71 x 13 mm
Acurácia (RMS)	Ponto Simples: < 5 m (CEP) WAAS: < 1,5 m (CEP) DGPS: < 1 m (CEP) ± 50 ns

Fonte: <http://www.novatel.com/Documents/Papers/SUPERSTAR.pdf>