

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

ROBERTO DA SILVA RUY

***DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO GEOMÉTRICA
DE UM SISTEMA PARA MAPEAMENTO COM
CÂMARAS DIGITAIS DE MÉDIO FORMATO***



Presidente Prudente

2008

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

ROBERTO DA SILVA RUY

***DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO GEOMÉTRICA
DE UM SISTEMA PARA MAPEAMENTO COM
CÂMARAS DIGITAIS DE MÉDIO FORMATO***



Tese 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 Doutor em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli

Presidente Prudente

2008

R947 Ruy, Roberto da Silva.
Desenvolvimento e validação geométrica de um sistema para mapeamento com câmaras digitais de médio formato / Roberto da Silva Ruy. - Presidente Prudente : [s.n.], 2008
xviii, 229 f. : il.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia
Orientador: Antonio Maria Garcia Tommaselli
Banca: Edson Aparecido Mitishita, Jorge Luis Nunes e Silva Brito, Julio Kiyoshi Hasegawa, Mauricio Galo
Inclui bibliografia

1. Fotogrametria. 2. Integração de sensores. 3. Calibração. I. Autor. II. Título. III. Presidente Prudente - Faculdade de Ciências e Tecnologia.

CDD(18.ed.) 621.71

**Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Presidente Prudente.**

BANCA EXAMINADORA



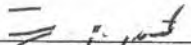
PROF. DR. ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI
(ORIENTADOR)



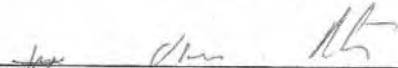
PROF. DR. MAURICIO GALO
(UNESP/FCT)




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



PROF. DR. EDSON APARECIDO MITSHITA
(UFPR/PR)



PROF. DR. JORGE LUIS NUNES E SILVA BRITO
(UERJ/RJ)



ROBERTO DA SILVA RUY

PRESIDENTE PRUDENTE (SP), 19 DE NOVEMBRO DE 2008.

RESULTADO: 

DADOS CURRICULARES

Roberto da Silva Ruy

Nascimento: 20/01/1980 – Rio de Janeiro – RJ

Filiação Claudinei Ruy
 Ana Maria Pimentel da Silva Ruy

1997-01 Curso de Graduação
 Bacharelado em Engenharia Cartográfica
 Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP

2002-04 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

2004-08 Curso de Pós-Graduação
 Doutorado 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

Á minha esposa Vivian, à meus pais, Claudinei e Ana Maria e ao meu irmão Eduardo, pelo amor, apoio e compreensão em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

O autor deseja externar os sinceros agradecimentos a todos que colaboraram ao desenvolvimento desta pesquisa, e em particular:

Ao professor Antonio Maria Garcia Tommaselli, que não tenho palavras para agradecer todos estes anos de convivência, com uma orientação acadêmica e pessoal sempre precisa e atenciosa e, acima de tudo, pela amizade, confiança e respeito.

Ao amigo e parceiro Thiago Tiedtke dos Reis, com sua fiel ajuda em todos os momentos desta pesquisa, compartilhando viagens, discussões e horas excessivas de trabalho e dedicação, sempre com foco na pesquisa e no desenvolvimento da tecnologia.

À todos da empresa Engemap Engenharia, Mapeamento e Aerolevantamento, em especial ao Cesar Antonio Francisco e ao Ricardo Cesar Menossi, que disponibilizaram toda a equipe e estrutura para o desenvolvimento da pesquisa, além de discussões e votos de confiança e amizade depositados.

Aos professores do Departamento de Cartografia da UNESP de Presidente Prudente, em especial aos professores Mauricio Galo, Julio K. Hasegawa e João Fernando C. da Silva, pelas conversas e discussões que contribuíram significativamente ao desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos José Marcato Jr., Wimerson S. Bazan e Rodrigo F. Lopes, pelos auxílios prestados nos desenvolvimentos, experimentos, estudos e análises, agregando o trabalho em equipe para o sucesso da pesquisa.

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC), pelas idéias compartilhadas e pelas conversas e confraternizações, que enriqueceram nossos trabalhos, nossas vidas particulares e o convívio em equipe.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, que por meio de um projeto de inovação tecnológica (PIPE), financiou bolsas de estudos, equipamentos e desenvolvimentos desta pesquisa, agregando formação de pessoal qualificado e o desenvolvimento científico e tecnológico.

À CAPES, pela concessão de uma bolsa de estudos durante o último ano de desenvolvimento do trabalho.

Aos funcionários da UNESP de Presidente Prudente, pelas ajudas prestadas durante todo o desenvolvimento do trabalho.

RESUMO

Nos últimos anos observa-se uma crescente utilização de câmaras digitais em Fotogrametria, especialmente os modelos profissionais de câmaras de pequeno e médio formato. Isso porque os sistemas digitais comerciais de grande formato possuem custos elevados e um complexo sistema de gerenciamento, armazenamento e processamento das imagens. Além disso, as câmaras digitais de pequeno e médio formato possuem algumas vantagens que as tornam altamente atrativas, como: grande disponibilidade no mercado; flexibilidade quanto ao intervalo de focalização; são pequenas, leves e de fácil manejo e; possuem custos substancialmente reduzidos quando comparadas aos sistemas digitais de grande formato. Por outro lado, algumas limitações ainda estão presentes nestes modelos de câmaras, no que se refere à confiabilidade da geometria interna e à resolução dos sensores. Contudo, estudos de caso têm mostrado que estes problemas podem ser contornados, podendo-se utilizar todo o potencial deste tipo de sensor para mapeamentos temáticos, topográficos e cadastrais em áreas de pequeno e médio porte, com grande flexibilidade em relação aos sensores aéreos e orbitais convencionais. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo a concepção, implementação física e testes reais de um sistema de aquisição de imagens digitais, formado por câmaras digitais de médio formato integradas a sensores de orientação direta, dispositivos eletrônicos e interfaces de hardware e software. Foram desenvolvidos também estudos, análises, algoritmos e programas computacionais de Fototriangulação com parâmetros adicionais (FPA), com dados de georreferenciamento direto, voltados ao sistema desenvolvido. Foram realizados cinco conjuntos de experimentos com dados simulados e dados reais, a partir dos quais se verificou que o uso adequado de parâmetros adicionais, que modelam os parâmetros de orientação interior e distorções das lentes, em conjunto com dados de georreferenciamento direto na fototriangulação das imagens, permitiu uma redução significativa da necessidade de informações de campo e um aumento da acurácia na reconstrução de pontos em cerca de 30-40%, quando comparado ao processo de fototriangulação convencional. Como resultado, verificou-se que o uso de câmaras digitais de médio formato em processos fotogramétricos permite grande flexibilidade e alta qualidade geométrica, desde que utilizados processos fotogramétricos rigorosos.

Palavras chave: Fotogrametria, câmaras digitais; integração de sensores, fototriangulação com parâmetros adicionais.

ABSTRACT

In the last years there is a growing use of digital cameras in Photogrammetry, mainly the small and medium format cameras, because of high cost and problems with the images management and post-processing in the high end digital cameras. Besides, if the small and medium format cameras are calibrated they can provide quality data, together with their advantages: variety in the market; focalization flexibility; are small, light, easy handling and; have low cost if compared with the high resolution cameras. Although, these models of digital cameras have some limitations, like the interior orientation reliability and the resolution of the sensor. Some case studies have showed that these problems can be solved and the digital sensors can be used with success in thematic, topographic and cadastral mapping of small and medium areas, with high flexibility if compared with conventional aerial and orbital sensors. In this context, the aim of this work is the conception, development and real tests performing of a digital image acquisition system composed by medium format digital cameras integrated to direct orientation systems, electronic devices and hardware and software developments. Studies, analysis and computational programs related to block triangulation with additional parameters with direct orientation data were performed for establishing the interior orientation of the cameras that compose the acquisition system. Five sets of tests with simulate and real data were performed. It was verified that the proper use of additional parameters related to inner orientation parameters and lens distortion, with direct orientation data, allowed the significative control point reducing and the increasing of the accuracy about 30-40% in the space intersection. As a result, it was verified that the use of medium format digital cameras for photogrammetric purposes allow high flexibility and geometric quality if rigorous photogrammetric process are used.

Keywords: Photogrammetry, digital cameras, sensor integration, block triangulation with additional parameters.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Representação de uma imagem digital.</i>	25
<i>Figura 2: Processo de formação de uma imagem digital (Adaptado de GALO, 1993).</i>	27
<i>Figura 3: Matriz de filtros RGB - Filtro de Bayer.</i>	28
<i>Figura 4: Câmara digital de pequeno formato - SONY DSCW5 (5.1 Megapixels).</i>	30
<i>Figura 5: Câmaras digitais de médio formato: (a) KODAK SLR/c (14 Megapixels), (b) HASSELBLAD H1D (22 Megapixels).</i>	30
<i>Figura 6: Câmaras digitais de grande formato: (a) Hasselblad H3D-50 (50 Megapixels), (b) Back digital Phase One 65+ (60 Megapixels).</i>	30
<i>Figura 7: Sistemas digitais de médio formato: (a) DIMAC, (b) DSS (Applanix), (c) DigiCam (IGI).</i>	32
<i>Figura 8: Geometria de aquisição de imagens em sensores tri-lineares (Adaptado de PETRIE, 2000).</i>	33
<i>Figura 9: Imagem adquirida pelo sensor tri-linear (visadas à frente e nadir): (a) imagens originais e (b) imagens retificadas (HAALA, 2001).</i>	34
<i>Figura 10: Câmara aérea digital HRSC-A (LEHMANN, 2000).</i>	35
<i>Figura 11: Câmara aérea digital HRSC-AX (POLI, 2003).</i>	36
<i>Figura 12: Câmara aérea digital ADS40 (Leica Geosystems).</i>	37
<i>Figura 13: Geometria de aquisição de imagens nas câmaras matriciais.</i>	39
<i>Figura 14: Sistema aéreo digital DMC – Z/I Imaging (CRAMER, 2004a).</i>	40
<i>Figura 15: Formação da imagem de alta resolução – imagem virtual (ZEITLER e DOERSTEL, 2002; TANG et al, 2000).</i>	41
<i>Figura 16: Geometria de formação da imagem virtual na câmara DMC (Baseado em HEIER et al, 2002).</i>	43
<i>Figura 17: TDI (Time Delay Integration) - Técnica de compensação de arraste em câmaras digitais (Adaptado de HINZ, 1999).</i>	44
<i>Figura 18: Sistema aéreo digital ULTRACAM_D – Vexcel/Microsoft (CRAMER, 2004b).</i>	44
<i>Figura 19: Formação da imagem pancromática de grande formato na ULTRACAM_D. (a) sub-imagens da câmara principal, (b) sub-imagens da câmara principal e da segunda câmara, (c) sub-imagens da câmara principal, com as da segunda e terceira câmaras, (d) imagem de grande formato formada pelas nove sub-imagens (KROPFL et al, 2004).</i>	45
<i>Figura 20: Pontos de enlace medidos nas áreas de superposição entre as sub-imagens, usados no processo de mosaicação (THURGOOD, 2004).</i>	46
<i>Figura 21: Seqüência de aquisição de imagens da ULTRACAM_D (THURGOOD, 2004).</i>	46
<i>Figura 22: Sistemas de Referência considerados no processo de formação da imagem.</i>	51
<i>Figura 23: Unidade de medida inercial Litton LN-200 e processador de navegação (COLOMINA, 2002).</i>	68
<i>Figura 24: Unidades de medida inercial: (a) gimballed, (b) strapdown (KING e FRIN, 1998; KOKAMAN, 2003).</i>	71
<i>Figura 25: Unidade de medida inercial.</i>	73
<i>Figura 26: Sistemas de Referência usados na navegação inercial (adaptado de SCHWARZ e EL-SHEIMY, 2000).</i>	75
<i>Figura 27: Vantagens da integração GPS/INS (SKALOUD, 1999).</i>	82
<i>Figura 28: Filtro de Kalman para a integração GPS/INS (Adaptado de Cramer, 1997).</i>	84
<i>Figura 29: Componentes do Sistema Aerotransportado de Aquisição de Imagens digitais (SAAPI).</i>	92
<i>Figura 30: Plataforma de coleta do sistema SAAPI.</i>	94
<i>Figura 31: Câmaras Digitais que compõem o sistema SAAPI: (a) Hasselblad H3D (39 Megapixels), (b) SONY F-828 (8 Megapixels).</i>	95
<i>Figura 32: Sistema de georreferenciamento direto SPAN-CPT/Novatel (Fonte: www.novatel.com).</i>	97
<i>Figura 33: Plataforma de coleta do sistema SAAPI com os exoesqueletos de alumínio para as câmaras Hasselblad; (b) plataforma na configuração dual.</i>	97
<i>Figura 34: Unidade de controle e alimentação de energia do SAAPI.</i>	99
<i>Figura 35: Computador de controle e unidades de armazenamento de imagens do sistema SAAPI.</i>	100
<i>Figura 36: Antena Novatel GPS-534c fixada à aeronave.</i>	101
<i>Figura 37: Diagrama do sistema de voo – SAAPI.</i>	102
<i>Figura 38: Hardware do sistema SAAPI.</i>	104
<i>Figura 39: Geometria das câmaras na plataforma de coleta.</i>	108
<i>Figura 40: Geometria de aquisição das imagens Hasselblad: opção de coleta ao longo da linha de voo.</i>	109
<i>Figura 41: Geometria de aquisição das imagens Hasselblad: opção de coleta perpendicular à linha de voo.</i>	109
<i>Figura 42: Aeronave da empresa Engemap – Minuano - EMBRAER.</i>	110

Figura 43: Furo na fuselagem da aeronave para a aquisição das imagens. _____	111
Figura 44: Sistema de escotilha desenvolvido para as operações com o sistema de coleta. _____	112
Figura 45: Calibração de câmaras: (a) coleta de imagens com a plataforma do sistema SAAPI, (b) campo de calibração da FCT/UNESP. _____	115
Figura 46: Parâmetros de orientação exterior corrigidos dos parâmetros shift e drift (Adaptado de DORSTEL et al, 2001). _____	119
Figura 47: Arranjo dual do sistema SAAPI: (a) vista lateral, (b) vista superior, (c) Geometria de aquisição das imagens (Bazan, 2008). _____	122
Figura 48: Medida de distância entre os centros perspectivos das câmaras na plataforma de coleta do sistema SAAPI. _____	125
Figura 49: Estrutura de funcionamento do programa CMC. _____	129
Figura 50: Sistema SAAPI instalado na aeronave para o voo teste sobre a rodovia Ayrton Senna, São José dos Campos - SP. _____	131
Figura 51: Sistema SAAPI instalado na aeronave para o voo em Presidente Prudente. _____	134
Figura 52: Fotoíndice do voo realizado na região de Presidente Prudente com o sistema SAAPI. _____	135
Figura 53: Curvas de distorção das lentes: (a) curvas da câmara 1 com e sem a correção de distorção do software Flexcolor, (b) curvas da câmara 2 com e sem a correção de distorção do software Flexcolor, (c) curva de distorção definida pelo fabricante da lente (Fonte: www.Hasselbladusa.com). _____	138
Figura 54: Distribuição dos pontos no campo de calibração da FCT/UNESP. Os pontos em destaque (circulados) correspondem aos pontos de verificação. _____	141
Figura 55: Distribuição dos pontos no campo de calibração da FCT/UNESP. (a) Catanduva; (b) Ribeirão Pires; (c) SP-270. _____	146
Figura 56: Resumos dos testes com os diversos grupos de parâmetros adicionais: EMQ da resultante planimétrica nos pontos de verificação para as abordagens definidas. _____	150
Figura 57: Resumos dos testes com os diversos grupos de parâmetros adicionais: EMQ da componente altimétrica nos pontos de verificação para as abordagens definidas. _____	151
Figura 58: Curvas de distorção das lentes geradas a partir dos coeficientes calculados nas abordagens A, B (determinadas a partir do programa CMC) e pelo LPS (modelo Lens Distortion) – Bloco de Catanduva. _____	156
Figura 59: Bloco BRVIAS: (a) bloco completo (86 imagens) com a distribuição dos pontos de apoio e verificação; (b) Sub-bloco de 32 imagens selecionado sobre o bloco completo, com a distribuição dos pontos de apoio e verificação _____	160
Figura 60: Discrepância entre os parâmetros de OE estimados e obtidos por GPS – Experimento A do bloco de 32 imagens com dados reais (BRVIAS). _____	174
Figura 61: Discrepância entre os parâmetros de OE estimados e verdadeiros – Experimento B do bloco com dados simulados (BRVIAS). _____	174
Figura 62: Bloco Resende: (a) bloco completo (184 imagens) com a distribuição dos pontos de apoio e verificação; (b) Sub-bloco de 50 imagens selecionado sobre o bloco completo, com a distribuição dos pontos de apoio e verificação. _____	186
Figura 63: Bloco Presidente Prudente coletado com o sistema dual. _____	202
Figura 64: Cobertura obtida a partir de uma aquisição com a plataforma de coleta dual do sistema SAAPI, com os novos alvos do campo de calibração da FCT/UNESP destacados na parte superior. _____	203
Figura 65: EMQ das discrepâncias nas coordenadas dos pontos de verificação nos experimentos de Fototriangulação convencional - parâmetros de OI pré-calibrados e sem georreferenciamento direto. _____	219
Figura 66: EMQ das discrepâncias nas coordenadas dos pontos de verificação nos Experimentos de FPA (f , x_0 , y_0 , k_1 , k_2) com georreferenciamento direto. _____	219

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1: Dados técnicos da câmara HRSC-A (NEUKUM, 1999).</i>	36
<i>Tabela 2: Dados técnicos da câmara ADS40.</i>	38
<i>Tabela 3: Dados técnicos da câmara DMC.</i>	41
<i>Tabela 4: Dados técnicos da câmara ULTRACAM_D.</i>	47
<i>Tabela 5: Elementos da matriz das derivadas parciais em relação aos parâmetros – calibração de câmaras.</i>	59
<i>Tabela 6: Características de três sistemas inerciais.</i>	72
<i>Tabela 7: Erros no INS (OMERBASHICH, 2002).</i>	76
<i>Tabela 8: Erros nas observáveis GPS (FORTES, 2004; KOKAMAN, 2003; MONICO, 2000).</i>	81
<i>Tabela 9: Acurácia de alguns sistemas GPS/INS.</i>	88
<i>Tabela 10: Opções de coleta do sistema SAAPI.</i>	93
<i>Tabela 11: Ângulos de abertura da câmara digital Hasselblad.</i>	106
<i>Tabela 12: Parâmetros de orientação interior para as duas câmaras Hasselblad.</i>	137
<i>Tabela 13: Discrepâncias nos pontos de verificação para os testes de calibração.</i>	140
<i>Tabela 14: Discrepâncias nos pontos de verificação para os testes de Fototriangulação.</i>	142
<i>Tabela 15: Discrepâncias nos pontos de verificação para os testes de Fototriangulação com dados nominais.</i>	143
<i>Tabela 16: Informações dos blocos de imagens.</i>	145
<i>Tabela 17: Dados de calibração da câmara Hasselblad (Março/2007).</i>	148
<i>Tabela 18: EMQ dos resíduos das observações e a variância da observação de peso unitário ($\hat{\sigma}_0^2$) para os experimentos realizados. Valores expressos em função da dimensão do pixel na imagem.</i>	149
<i>Tabela 19: EMQ nos pontos de apoio (PA) e verificação (PV), e as precisões esperadas (σ_e) dos pontos no espaço objeto para os experimentos realizados.</i>	150
<i>Tabela 20: Parâmetros adicionais (orientação interior - OI) estimados nos testes de fototriangulação com o programa CMC para as abordagens definidas – Bloco de Catanduva.</i>	155
<i>Tabela 21: Discrepâncias nos pontos de verificação para os testes de fototriangulação com o programa CMC para as abordagens definidas – Bloco de Catanduva.</i>	155
<i>Tabela 22: Parâmetros adicionais (orientação interior - OI) estimados nos testes de fototriangulação com o programa CMC para as abordagens D e E – Bloco de Catanduva.</i>	157
<i>Tabela 23: Discrepâncias nos pontos de verificação para os testes de fototriangulação com o programa CMC para as abordagens D e E – Bloco de Catanduva.</i>	158
<i>Tabela 24: Descrição dos experimentos com dados simulados (BRVIAS).</i>	162
<i>Tabela 25: Discrepâncias (Erro verdadeiro) entre parâmetros de orientação interior estimados e verdadeiros para os testes com dados simulados (BRVIAS).</i>	164
<i>Tabela 26: Erro Médio Quadrático das discrepâncias entre parâmetros de orientação exterior estimados e verdadeiros para os testes com dados simulados (BRVIAS).</i>	164
<i>Tabela 27: Média e EMQ das discrepâncias nos pontos de verificação, e as precisões esperadas (σ_e) dos pontos no espaço objeto para os testes com dados simulados (BRVIAS).</i>	165
<i>Tabela 28: Descrição dos experimentos com dados reais – bloco de 32 imagens (BRVIAS).</i>	169
<i>Tabela 29: Parâmetros de OI estimados nos experimentos e discrepâncias entre parâmetros de OI estimados e os pré-calibrados para os testes com dados reais – bloco de 32 imagens (BRVIAS).</i>	170
<i>Tabela 30: Erro Médio Quadrático das discrepâncias entre as coordenadas dos CP's estimadas e as coletadas pelo GPS - testes com dados reais para o bloco de 32 imagens (BRVIAS).</i>	171
<i>Tabela 31: Média e EMQ das discrepâncias nos pontos de verificação, e as precisões esperadas (σ_e) dos pontos no espaço objeto para os testes com dados reais – bloco de 32 imagens (BRVIAS).</i>	172
<i>Tabela 32: Dados estatísticos relacionados aos testes Qui-Quadrado e T-Student – testes com dados reais do bloco de 32 imagens (BRVIAS).</i>	177
<i>Tabela 33: Descrição dos experimentos com dados reais – bloco de 86 imagens (BRVIAS).</i>	178
<i>Tabela 34: Parâmetros de OI estimados nos experimentos e discrepâncias entre parâmetros de OI estimados e os pré-calibrados para os testes com dados reais – bloco de 86 imagens (BRVIAS).</i>	180
<i>Tabela 35: Erro Médio Quadrático das discrepâncias entre as coordenadas dos CP's estimadas e as coletadas pelo GPS - testes com dados reais para o bloco de 86 imagens (BRVIAS).</i>	180

<i>Tabela 36: Média e EMQ das discrepâncias nos pontos de verificação, e as precisões esperadas (σ_e) dos pontos no espaço objeto para os testes com dados reais – bloco de 86 imagens (BRVIAS).</i>	181
<i>Tabela 37: Dados estatísticos relacionados aos testes Qui-Quadrado e T-Student – testes com o bloco de 86 imagens (BRVIAS).</i>	184
<i>Tabela 38: Descrição dos experimentos com dados do bloco de 50 imagens – Bloco Resende.</i>	187
<i>Tabela 39: Parâmetros de OI estimados nos experimentos e discrepâncias entre parâmetros de OI estimados e os pré-calibrados para os testes com dados do bloco de 50 imagens – Bloco Resende.</i>	188
<i>Tabela 40: Erro Médio Quadrático das discrepâncias entre as coordenadas dos CP's estimadas e as coletadas pelo GPS - testes com o bloco de 50 imagens (Resende).</i>	188
<i>Tabela 41: Média e EMQ das discrepâncias nos pontos de verificação, e as precisões esperadas (σ_e) dos pontos no espaço objeto para os testes com dados reais – bloco de 50 imagens (Resende).</i>	189
<i>Tabela 42: Dados estatísticos relacionados aos testes Qui-Quadrado e T-Student – testes com o bloco de 50 imagens (Resende).</i>	191
<i>Tabela 43: Descrição dos experimentos com dados do bloco de 184 imagens – Bloco Resende.</i>	192
<i>Tabela 44: Parâmetros de OI estimados nos experimentos e discrepâncias entre parâmetros de OI estimados e os pré-calibrados para os testes com dados do bloco de 184 imagens – Bloco Resende.</i>	193
<i>Tabela 45: Erro Médio Quadrático das discrepâncias entre as coordenadas dos CP's estimadas e as coletadas pelo GPS - testes com o bloco de 184 imagens (Resende).</i>	194
<i>Tabela 46: Média e EMQ das discrepâncias nos pontos de verificação, e as precisões esperadas (σ_e) dos pontos no espaço objeto para os testes com o bloco de 184 imagens (Resende).</i>	195
<i>Tabela 47: Dados estatísticos relacionados aos testes Qui-Quadrado e T-Student – testes com o bloco de 184 imagens (Resende).</i>	197
<i>Tabela 48: Descrição dos experimentos com os modelos de Brown e Ebner - dados do bloco de 184 imagens (Resende).</i>	198
<i>Tabela 49: Parâmetros de OI estimados nos experimentos e discrepâncias entre parâmetros de OI estimados e os pré-calibrados para os testes com dados do bloco de 184 imagens – Bloco Resende.</i>	199
<i>Tabela 50: Erro Médio Quadrático das discrepâncias entre as coordenadas dos CP's estimadas e as coletadas pelo GPS - testes com os modelos de Ebner e Brown - bloco de 184 imagens (Resende).</i>	200
<i>Tabela 51: Média e EMQ das discrepâncias nos pontos de verificação para os testes com o bloco de 184 imagens (Resende) - testes com os modelos de Ebner e Brown.</i>	200
<i>Tabela 52: Parâmetros de orientação interior para as duas câmaras Hasselblad obtidos nos testes de calibração com o sistema dual.</i>	205
<i>Tabela 53: Parâmetros de orientação relativa entre as câmaras Hasselblad na plataforma de coleta estimados no experimento com imagens adquiridas sobre o campo de calibração da FCT/UNESP.</i>	205
<i>Tabela 54: Descrição dos experimentos com dados do bloco de Presidente Prudente.</i>	206
<i>Tabela 55: Parâmetros de OI estimados nos experimentos para os testes com dados do bloco de Presidente Prudente – câmara 1.</i>	208
<i>Tabela 56: Discrepâncias entre parâmetros de OI estimados e os pré-calibrados para os testes com dados do bloco de Presidente Prudente – câmara 1.</i>	209
<i>Tabela 57: Parâmetros de OI estimados nos experimentos para os testes com dados do bloco de Presidente Prudente – câmara 2.</i>	210
<i>Tabela 58: Discrepâncias entre parâmetros de OI estimados e os pré-calibrados para os testes com dados do bloco de Presidente Prudente – câmara 2.</i>	211
<i>Tabela 59: Erro Médio Quadrático das discrepâncias entre as coordenadas dos CP's estimadas e as coletadas pelo GPS - testes com o bloco de Presidente Prudente.</i>	212
<i>Tabela 60: Média e EMQ das discrepâncias nos pontos de verificação para os testes com o bloco de P Prudente.</i>	213
<i>Tabela 61: Dados estatísticos relacionados aos testes Qui-Quadrado e T-Student – testes com o bloco de Presidente Prudente.</i>	217

LISTA DE SIGLAS

A/D	Analógico/Digital
ADS	<i>Airborne Digital Sensors</i> – Sensor Aéreo Digital da empresa <i>Leica Geosystems</i>
ARMOD	Automação dos processos de Reconstrução e orientação de Modelos usando imagens digitais
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i> – Dispositivo de carga acoplada
CMC	Calibração Multi-Câmaras – software desenvolvido nesta pesquisa
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i> – Semicondutor de metal-óxido
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CP	Centro perspectivo
CTA	Centro Técnico Aeroespacial
DAC	Departamento de Aviação Civil
DGPS	<i>Differential GPS</i> – Posicionamento diferencial GPS
DIMAC	<i>Digital Modular Aerial Camera</i>
DLR	Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt – Centro Aeroespacial da Alemanha
DMC	<i>Digital Mapping Camera</i> – Sistema Aéreo Digital da empresa <i>Z/I Imaging</i>
DoD	<i>Department of Defense</i> – Departamento de Defesa
DPI	<i>Dots per inch</i> – pontos por polegada (ppp)
DSM	<i>Digital Surface Model</i> – Modelo digital de superfície
DSS	Digital Sensor System – empresa <i>Applanix</i>
EMQ	Erro Médio Quadrático
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FMC	<i>Forward Motion Compensation</i> – Dispositivo de compensação de arraste
FPA	Fototriangulação com Parâmetros Adicionais
GPS	<i>Global positioning System</i> – Sistema de Posicionamento Global
GSD	<i>Ground Sample Distance</i> – elemento de resolução no terreno
HRSC-A	High Resolution Stereo Camera Airborne – Estereocâmara Aérea de Alta Resolução
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> - Unidade de Medida Inercial
INS	<i>Inertial Navigation System</i> – Sistema de Navegação Inercial
JPEG	<i>Joint Photographic Experts Group</i> – Formato de compressão de imagens

LMFS	<i>Lockheed Martin FairChild Systems</i> – Câmara digital de grande formato
LPS	<i>Leica Photogrammetry Suite</i> – Sistema Fotogramétrico Digital da empresa <i>Leica Geosystems</i>
MDT	Modelo Digital de Terreno
MID	Monocomparador de Imagens Digitais – software desenvolvido por Mário L. L. Reiss
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> – Agência Nacional Aeronáutica e Espacial
NMEA	<i>National Marine Electronics Association</i> – protocolo de transferência de dados
OI	Orientação interior
OE	Orientação exterior
PIPE	Programa de Inovação Tecnológica em Pequenas Empresas - FAPESP
PN	Processador de navegação
POS-AV	<i>Positioning Orientation System for Airborne Vehicles</i> – Sistema de posicionamento e orientação para veículos aéreos - <i>Applanix</i>
PPGCC	Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
PPS	Pulso por segundo
Raw	Formato bruto de imagens
SAAPI	Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-processamento de Imagens digitais
SPAN	<i>Synchronized Position Attitude Navigation</i> – Sistema de navegação inercial da empresa <i>Novatel</i>
SRTM	<i>Satellite Radar Topographic Mission</i> – Modelo digital de Terreno Global
SSD	<i>Solid State Disk</i> – Disco de Estado Sólido
TDI	<i>Time Delay Integration</i> - Dispositivo digital de compensação de arraste
ULTRACAM	Sistema aéreo de câmaras digitais da Vexcel
UNESP	Universidade Estadual Paulista
USB	<i>Universal serial bus</i> – conexão de dispositivos periféricos
WGS-84	<i>World Geodetic System 1984</i> – Sistema Geodésico Global de 1984

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO	17
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
1.2 PROPOSTA DO TRABALHO	20
1.3 OBJETIVOS	20
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	21

CAPÍTULO II

SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS	23
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	23
2.2 IMAGENS DIGITAIS	25
2.3 PROCESSO DE FORMAÇÃO DAS IMAGENS DIGITAIS	27
2.4 SISTEMAS DIGITAIS COMERCIAIS	28
2.4.1 Câmaras digitais convencionais	28
2.4.1.1 Classificação quanto à resolução	29
2.4.1.2 Sistemas com câmaras digitais de pequeno e médio formato	31
2.4.2 Sistemas digitais de grande formato	32
2.4.2.1 Sistema Tri-linear	32
2.4.2.2 Configuração modular de câmaras matriciais	38
2.4.2.3 Tri-linear x Arranjo matricial	47

CAPÍTULO III

CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS E FOTOTRIANGULAÇÃO COM PARÂMETROS ADICIONAIS	49
3.1 DEFINIÇÕES E MODELOS	49
3.2 CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS	56
3.2.1 Métodos de Laboratório	56
3.2.2 Métodos de campo	57
3.3 FOTOTRIANGULAÇÃO COM PARÂMETROS ADICIONAIS	61

CAPÍTULO IV

GEORREFERENCIAMENTO DIRETO	66
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	66

4.2 SISTEMA DE NAVEGAÇÃO INERCIAL	68
4.2.1 Considerações iniciais	68
4.2.2 Breve histórico	69
4.2.3 Classificação	70
4.2.4 Equações de Observação	72
4.2.5 Referenciais e transformações usados na navegação inercial	74
4.2.6 Erros do INS	76
4.3 SISTEMA DE POSICIONAMENTO POR SATÉLITES - GPS	77
4.3.1 Considerações iniciais	77
4.3.2 Equações básicas de observação GPS	79
4.3.3 Erros nas observáveis GPS	80
4.4 INTEGRAÇÃO GPS/INS	81
4.4.1 Considerações iniciais	81
4.4.2 Aplicações	82
4.4.3 Integração das observações	83
4.4.3.1 Sincronismo e amostragem de dados	83
4.4.3.2 Processamento dos dados	84
4.5 GEORREFERENCIAMENTO DIRETO DE IMAGENS AÉREAS	86
4.5.1 Modelo matemático	86
4.5.2 Acurácia em levantamentos aerofotogramétricos	88

CAPÍTULO V

MATERIAIS E MÉTODOS	89
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	89
5.2 MATERIAIS	89
5.3 O DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA	91
5.3.1 Contexto histórico	91
5.3.2 Características gerais do sistema	92
5.3.3 Sistema de aquisição	94
5.3.3.1 Plataforma de coleta	94
5.3.3.2 Unidade de controle e alimentação	98
5.3.4 Arquitetura do sistema de voo	102
5.3.5 Disparo e sincronismo do sistema	104
5.3.6 Configuração dual da plataforma de coleta	106
5.3.7 Homologação do sistema	110
5.4 CALIBRAÇÃO	113
5.4.1 Calibração de câmaras	113

CAPÍTULO VI

EXPERIMENTOS E RESULTADOS	130
6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	130
6.2 TESTES COM O SISTEMA DE COLETA	131
6.2.1 Teste preliminar sobre a rodovia Ayrton Senna	131

6.2.2 Projeto Presidente Prudente	133
6.3 ANÁLISES DE CALIBRAÇÃO COM O MODELO DE CORREÇÃO DAS LENTES DO SOFTWARE HASSELBLAD FLEXCOLOR	135
6.4 ESTUDOS E ANÁLISES DE FOTOTRIANGULAÇÃO COM PARÂMETROS ADICIONAIS (FPA)	144
6.4.1 Testes de FPA com distintos grupos de parâmetros	145
6.4.2 Bloco Catanduva	153
6.4.3 Bloco BRVias	158
6.4.3.1 Experimentos com dados simulados – bloco de 32 imagens	161
6.4.3.2 Experimentos com dados reais – bloco de 32 imagens	168
6.4.3.3 Experimentos com dados reais – bloco de 86 imagens	177
6.4.4 Bloco Resende	185
6.4.4.1 Experimentos com dados do sub-bloco de 50 imagens	186
6.4.4.2 Experimentos com dados do bloco completo – 184 imagens	191
6.4.4.2.1 Testes com os modelos de Brown e Ebner – Bloco de 184 imagens (Resende)	197
6.4.5 Bloco Presidente Prudente – Arranjo dual	201
6.4.6 Síntese dos Resultados	218

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES	223
7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	223
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	227
REFERÊNCIAS	229
APÊNDICE A	239
MÉTODO COMBINADO DE AJUSTAMENTO	239
ANEXO A	244
ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DAS CÂMARAS DIGITAIS QUE COMPÕEM O SISTEMA SAAPI	244
ANEXO B	246
ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO SISTEMA GPS/INS SPAN - CPT NOVATEL	246

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Tendo em vista o alto custo e o complexo gerenciamento e processamento de dados dos sistemas digitais de grande formato, e o elevado tempo de resposta inerente às câmaras baseadas em filme, uma vez que as etapas de revelação do filme e digitalização das imagens tornam-se necessárias, a utilização de câmaras digitais de pequeno e médio formato emergiu como uma alternativa consideravelmente atrativa para as aplicações fotogramétricas. Além disso, destaca-se a obsolescência das câmaras analógicas no mercado de Fotogrametria, visto que os principais fabricantes já estão anunciando o encerramento da produção de filmes.

Diante destes fatos, diversas pesquisas vêm sendo realizadas com câmaras digitais de pequeno e médio formato, a fim de avaliar as potencialidades no uso desta tecnologia em trabalhos fotogramétricos (CRAMER, 2004b; WACKROW et al., 2007; SANTOS et al, 2000; HABIB e MORGAN, 2003).

Estes modelos de câmaras de menor porte permitem o desenvolvimento de sistemas de aquisição leves e de baixo custo, quando comparados aos sistemas digitais de grande formato, com as vantagens da tecnologia digital, que possibilita o acesso rápido e direto aos dados digitais, a reutilização da mídia de gravação e controle da qualidade da imagem durante o vôo, além de alta qualidade radiométrica e espacial, proporcionada pelos modelos de câmaras mais modernas.

A diferença fundamental entre as câmaras de pequeno e médio formato de filme e digitais é que nestas últimas o elemento sensor é plano e considerado sem deformações, ou seja, não há trabalho do filme e pode-se adotar um referencial de imagem

com confiabilidade, como mostram alguns estudos recentes (MACHADO et al, 2003; TELLES e TOMMASELLI, 2002).

A utilização dos sistemas digitais de grande formato se torna, em muitos casos, antieconômica, uma vez que possuem custos elevados e complexos sistemas de armazenamento, gerenciamento e processamento de dados, conforme discutido no Capítulo II. Como resultado, tem-se o crescente uso das câmaras de pequeno e médio formato em Fotogrametria. Este tipo de câmara não foi inicialmente projetado para propósitos fotogramétricos, devido ao pequeno formato e à possíveis instabilidades de seus parâmetros de orientação interior (OI). Em alguns estudos, entretanto, como os apresentados por Habib e Morgan (2003) e Machado et al (2003a), verificou-se que a instabilidade temporal dos parâmetros de orientação interior não é estatisticamente significativa em certos modelos de câmaras profissionais, sendo que, se forem devidamente calibradas podem proporcionar informações de boa qualidade métrica.

No que se refere ao aumento da área de cobertura no terreno obtida pelas câmaras digitais, há algumas abordagens disponíveis no mercado que proporcionam coberturas de grande dimensão no terreno, como os sistemas digitais de grande formato, baseados principalmente na abordagem tri-linear e na configuração modular de câmaras matriciais. Estes sistemas utilizam sensores de linha e matriciais integrados a plataformas de orientação direta GPS/INS (GPS – Sistema de Posicionamento Global e INS – Sistema de Navegação Inercial) de alta precisão. Contudo, como se tratam de sistemas com custos elevados, que ultrapassam a um milhão e meio de dólares (referência ano de 2008), se tornam de difícil acesso às empresas de pequeno e médio porte, principalmente em países como o Brasil onde as taxas de importação são significativamente altas. Além disto, deve-se destacar que a geometria de aquisição, aliada a qualidade dos componentes de posição e orientação, pode prejudicar a qualidade dos produtos resultantes destes sistemas (Capítulo II).

Dentro do contexto apresentado, o aspecto fundamental tratado neste trabalho foi a análise da exequibilidade do uso de câmaras digitais de médio formato integradas à sistema de georreferenciamento direto para aplicações em Aerofotogrametria, com a modelagem da orientação interior das câmaras por calibração em serviço. Para isso, um sistema de aquisição de imagens digitais georreferenciadas foi desenvolvido. Neste

sistema, a plataforma de coleta foi projetada de modo que se possa ter uma câmara disposta de modo vertical, ou duas câmaras adotando-se uma geometria convergente. Uma câmara que capta a banda do infravermelho próximo pode ser também integrada na plataforma de coleta. Este sistema foi denominado SAAPI (Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-processamento de Imagens digitais).

Para garantir a confiabilidade métrica do sistema, foram estudados e desenvolvidos algoritmos de calibração em serviço do sistema (fototriangulação com parâmetros adicionais), apesar de alguns autores mostrarem experimentalmente a estabilidade da geometria interna de alguns modelos de câmaras digitais. Isto porque, verificou-se experimentalmente que as diferenças das condições ambientais (pressão e temperatura) nos instantes de calibração da câmara e de aquisição das imagens, a refração atmosférica e as operações com as câmaras, podem alterar os valores de alguns parâmetros de orientação interior, prejudicando a precisa reconstrução tridimensional dos pontos no espaço objeto.

Estes estudos de técnicas de calibração foram desenvolvidos a partir da disponibilidade de dados de georreferenciamento direto, de forma que os parâmetros de orientação interior possam ser estimados com maior confiabilidade, uma vez que as correlações entre os parâmetros de orientação interior e exterior podem ser minimizadas com as injunções aplicadas sobre os parâmetros de orientação exterior.

Considerando o desenvolvimento do sistema SAAPI, algumas aplicações se destacam com grande potencialidade, como nas áreas de análise ambiental e monitoramento de desastres naturais e antrópicos; mapeamentos temáticos, topográficos e cadastrais; projetos de estradas e ferrovias, monitoramento de linhas de transmissão e dutos; e em atualizações cartográficas, constantemente requeridas por prefeituras de médio e pequeno porte.

1.2 PROPOSTA DO TRABALHO

Considerando a crescente utilização de sensores digitais em trabalhos fotogramétricos, particularmente o uso de câmaras de pequeno e médio formato, e o alto custo e a complexidade no gerenciamento e processamento dos dados inerentes aos sistemas digitais de grande formato disponíveis no mercado, o presente trabalho propôs:

- O desenvolvimento de um sistema de coleta de imagens com câmaras digitais de médio formato, integradas a sistemas eletrônicos de disparo e sincronismo de dados e sensores de georreferenciamento direto;
- A modelagem dos parâmetros de OI mediante um modelo de calibração com parâmetros adicionais, a partir dos dados de posição e orientação fornecidos pelos sensores de orientação direta, uma vez que a geometria interna das câmaras digitais não pode ser considerada estável;
- Que o sistema tenha as características de máxima automação, flexibilidade, custo acessível e, com aplicações nas seguintes áreas:
 - Mapeamentos temático, topográfico e cadastral;
 - Atualizações cartográficas;
 - Projetos de corredores, como rodovias, ferrovias, dutos e linhas de transmissão de energia elétrica;
 - Análises ambientais;
 - Desastres naturais e antrópicos e;
 - Monitoramento urbano.

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo geral verificar a exequibilidade do uso de câmaras digitais de médio formato em aplicações de Aerofotogrametria, com o

desenvolvimento de um sistema de aquisição de imagens digitais georreferenciadas e os estudos e análises de calibração em serviço. Dentro do contexto geral do projeto, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver uma plataforma de coleta de imagens digitais, formada por câmaras digitais (uma ou duas câmaras dispostas em geometria convergente - Câmara infravermelha opcional) e sensores de orientação direta, além de componentes mecânicos e eletrônicos que garantem a estabilidade geométrica e o sincronismo entre os sensores;
- Definir uma metodologia, com modelos matemáticos, algoritmos e programas computacionais, para a modelagem da orientação interior em serviço das câmaras digitais, por meio de um processo de fototriangulação por feixes de raios com parâmetros adicionais;
- Desenvolver uma metodologia para a integração dos componentes e calibração do sistema de coleta, considerando o sistema dual de câmaras;
- Realizar experimentos práticos para avaliar a qualidade dos resultados obtidos com as técnicas desenvolvidas, e suas aplicações no mercado.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em sete capítulos. No primeiro capítulo é apresentado um panorama do problema envolvido, procurando-se apresentar as justificativas e a aplicabilidade das técnicas propostas.

O Capítulo II mostra uma revisão sobre sistemas de aquisição de imagens digitais, com os princípios básicos de aquisição e formação de imagens, sistemas digitais disponíveis e processos de calibração.

No Capítulo III é apresentada uma revisão sobre orientação direta de imagens (GPS+INS), contemplando definições, referenciais, modelos matemáticos e aplicações.

O Capítulo IV trata da calibração de câmaras e da fototriangulação de imagens com parâmetros adicionais, enfatizando a modelagem da geometria interna das câmaras digitais.

O Capítulo V traz os materiais, métodos e desenvolvimentos do trabalho. No Capítulo VI são apresentados os experimentos realizados com o sistema desenvolvido, assim como os estudos e análises de fototriangulação com parâmetros adicionais.

Por fim, o Capítulo VII traz as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros neste ramo da pesquisa.

CAPÍTULO II

SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE IMAGENS DIGITAIS

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em geral, a captura de imagens para Aerofotogrametria no Brasil ainda é feita com filmes, com posterior digitalização em *scanners* fotogramétricos. Isto porque as câmaras digitais que equivalem em formato e resolução a uma câmara analógica, ainda apresentam custos elevados. Além disto, o gerenciamento dos dados e as unidades de pós-processamento tornam estes sistemas ainda complexos do ponto de vista produtivo.

Contudo, nos Estados Unidos, Canadá e Europa há uma crescente utilização de sensores digitais para a coleta de imagens, decorrente principalmente pela evolução das câmaras digitais de pequeno e médio formato. Isto possibilitou o surgimento de sistemas de coleta digitais, que integrados a sensores de posição e orientação, constituem uma importante ferramenta nas tarefas de mapeamento e análises ambientais.

Além disso, ressalta-se o fato relativo à obsolescência das câmaras analógicas, impulsionada pela crescente evolução das câmaras digitais, tendo em vista as vantagens da tecnologia digital, proporcionando maior agilidade na obtenção dos dados digitais. Devido à limitação de resolução dos sensores de coleta, a área de cobertura no terreno obtida pelas câmaras digitais convencionais é ainda inferior às câmaras analógicas¹. Com isso, há um aumento significativo no número de faixas de vôo, fotos e pontos de apoio necessários para cobrir a mesma região amostrada pelas câmaras analógicas. Em contrapartida, os processos de revelação e digitalização das fotografias não estão presentes quando se trata de captura por sensor digital.

¹ Contudo, os últimos lançamentos do mercado das empresas Hasselblad e PhaseOne apresentam câmaras digitais com 60 Megapixels de resolução (6730 x 8980 pixels). Com esta resolução, estes modelos de câmaras apresentam uma cobertura lateral equivalente a uma fotografia tomada com uma câmara analógica (230 x 230 mm) digitalizada com 25 microns.

Destaca-se também que se um sistema de georreferenciamento direto for interado à estes sensores digitais tem-se uma minimização deste impacto econômico, uma vez que a densidade de pontos de apoio é significativamente reduzida e o controle da navegação em vôo torna-se mais preciso.

Mesmo com as limitações de dimensões do quadro das imagens, as câmaras digitais oferecem algumas vantagens sobre as câmaras de filme (Tommaselli, 2001):

- Acesso rápido e direto aos dados digitais, uma vez que as etapas de revelação e digitalização do filme são descartadas;
- Possuem poucas partes móveis e o sensor de coleta, de estado sólido, sofre deformações desprezíveis;
- Reutilização da mídia de gravação;
- Possibilidade de melhoramento das imagens durante a coleta, uma vez que o display das imagens é disponibilizado em tempo real;
- Maior resolução radiométrica, pois conseguem registrar intensidades com até 12 bits por pixel, ou seja, é possível distinguir até 4096 níveis de cinza, contra os atuais 256 em uma imagem pancromática convencional.

Além disto, Cramer (2004b) descreve a partir de experimentos práticos realizados com a câmara digital KODAK 14n, que mosaicos coloridos têm mais informações semânticas e maior resolução que imagens sensoriadas em nível orbital, por exemplo, *Ikonos* e *Quick Bird*. Os mosaicos de imagens digitais são produzidos em menor escala de tempo e custo que as imagens orbitais, especialmente quando é necessário cobrir uma área consideravelmente menor que a região amostrada pela imagem de satélite. Há que considerar ainda, que as imagens orbitais podem registrar a presença de nuvens, uma vez que a logística de coleta de dados dos satélites é pré-estabelecida, prejudicando a interpretação dos dados. No caso aéreo há a possibilidade de realizar o vôo somente em condições meteorológicas ideais.

Por fim, as câmaras digitais possibilitam ainda a cobertura estereoscópica da região, que no caso das imagens de satélites só é obtida com uma cena adicional da área, o que incrementa consideravelmente o custo do processo.

2.2 IMAGENS DIGITAIS

Uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional de intensidade de luz $f(x,y)$, onde x e y denotam as coordenadas espaciais e o valor de f em qualquer ponto (x, y) é proporcional ao brilho (ou nível de cinza) da imagem naquele ponto. Uma imagem digital (Figura 1) é uma função $f(x, y)$, discretizada nas coordenadas espaciais e em valores de brilho (GONZALEZ e WOODS, 2000).

As imagens digitais podem ser armazenadas no formato vetorial (*vector*) ou matricial (*raster*). As imagens vetoriais são armazenadas como uma lista que descreve coordenadas e atributos de entidades que a compõem (pontos, linhas, etc). Uma imagem digital matricial (*raster*), apresentada na Figura 1, consiste de um conjunto de elementos de imagem (pixel - “*picture elements*”) espacialmente ordenados (linha e coluna) em uma matriz bidimensional, sendo que a cada pixel da imagem é associado um tom de cinza (valor de brilho) ou cor.



Figura 1: Representação de uma imagem digital.

Há quatro componentes que definem a qualidade de uma imagem matricial: *resolução espacial*, relacionada à dimensão do pixel, sendo freqüentemente expressa em pontos por polegada (ppp ou dpi – “*dots per inch*”); *resolução radiométrica*, que depende dos níveis de quantização adotados (2^n , sendo n o número de bits a ser

armazenado); *resolução espectral*, definida pelo número de bandas e pela largura do intervalo de comprimento de onda coberto para cada banda e; *resolução temporal*, relativa ao intervalo de tempo entre duas coletas em uma mesma área. As duas últimas componentes definidas estão mais associadas aos sensores embarcados em plataformas orbitais, que, em geral, possuem sensores multiespectrais e programações de revisitas estabelecidas.

No que refere à aquisição de imagens digitais, o detector é um sensor de estado sólido, que em geral é do tipo CCD (*Charge-Coupled Device*) ou CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*). Estes sensores são compostos de elementos pontuais de silício, nos quais a tensão de saída é proporcional à intensidade de luz incidente. As características básicas destes tipos de detectores são definidos a seguir, de acordo com Fonseca (2005).

Os sensores CCD, usados na maioria das câmaras digitais, apresentam alta qualidade de imagem, com boa imunidade a ruídos e maior sensibilidade à luz. São dispositivos de carga acoplada, que são medidos por deslocamento de carga eletrônica dos sensores, requerendo componentes eletrônicos externos (conversor analógico-digital) que consomem espaço e energia. Desta forma, os sensores CCD são excelentes dispositivos de geração de imagens, contudo necessitam de recursos especiais.

Já os sensores CMOS são fabricados por meio de processamento de silício padrão e, por isso, podem incorporar componentes eletrônicos de suporte no chip. Alguns sensores possuem inclusive um conversor analógico-digital, que reduz significativamente os requisitos de espaço e energia da câmara. Por estas razões, os sensores CMOS possuem custos reduzidos em relação aos sensores CCD, contudo são menos sensíveis e apresentam problemas de ruídos, que são compensados com processamento interno.

Para maiores detalhes sobre os sensores CCD e CMOS, pode-se consultar Fonseca (2005).

2.3 PROCESSO DE FORMAÇÃO DAS IMAGENS DIGITAIS

De uma forma geral, o processo de formação de uma imagem em uma câmara digital pode ser representado pela Figura 2.

Os raios de luz provenientes de um objeto que atingem o sistema de lentes da câmara são focalizados nos elementos sensores, os quais são armazenados como cargas no substrato de silício do sensor; posteriormente são lidos e transformados em voltagens. Estes percorrem os circuitos eletrônicos e passam ao conversor A/D, que transforma o sinal elétrico analógico em sinal digital, até atingirem a unidade de armazenamento temporária, denominada de *Frame-Buffer*. A imagem é então processada para a composição de cores e compactação, geralmente no formato JPEG. Todavia, nas câmaras profissionais, as imagens são armazenadas diretamente no formato bruto (*raw*), para evitar a perda da qualidade da imagem no processo de compactação. Dependendo do modelo da câmara, esta imagem pode ser armazenada em cartões de memória (Ex: Sony F-828) ou em discos rígidos específicos (Ex: Hasselblad H1D). As imagens armazenadas são, em geral, transferidas ao computador por meio de cabos específicos (*USB* ou *Firewire*).

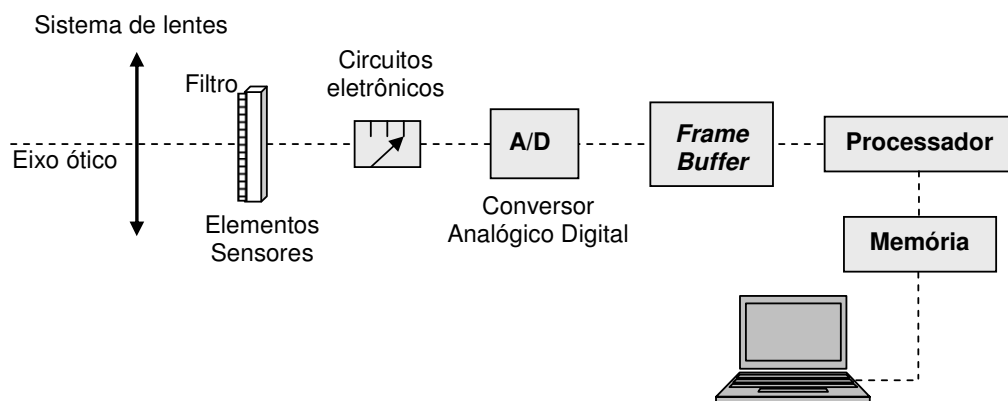


Figura 2: Processo de formação de uma imagem digital (Adaptado de GALO, 1993).

Como, em geral, as câmaras matriciais (*frame*) possuem apenas um sensor de estado sólido, a coleta de imagens coloridas é feita utilizando-se uma matriz de filtros RGB, usualmente o *Filtro de Bayer*, colocada à frente do sensor de coleta (Figura 3a). Contudo, há ainda câmaras que possui mais de um sensor de coleta, como a câmara

DuncanTech MS3100 com três sensores. Neste tipo de câmara cada sensor é responsável pela captura de uma banda espectral, e a imagem é formada pelo registro e fusão das três bandas. Galo et al (2006) apresentam as características da câmara *DuncanTech MS3100* e discutem o processo de formação das imagens neste tipo de câmara.

No *Filtro de Bayer*, as cores são compostas computacionalmente por interpolação. Os pixels que captam a componente azul (*B - Blue*) necessitam das informações das componentes vermelho (*R - Red*) e verde (*G - Green*). O tom de vermelho é obtido pela interpolação dos quatro pixels diagonais mais próximos que captam a componente vermelho, e o tom de verde é calculado a partir dos quatro pixels laterais que captam a componente verde, conforme ilustra a Figura 3b. Já nos pixels que captam a componente verde, os tons de vermelho e azul são interpolados a partir de dois pixels vizinhos (Ver Figura 3b), uma vez que 50% do sensor capta a componente verde (o olho humano é mais sensível a componente verde).

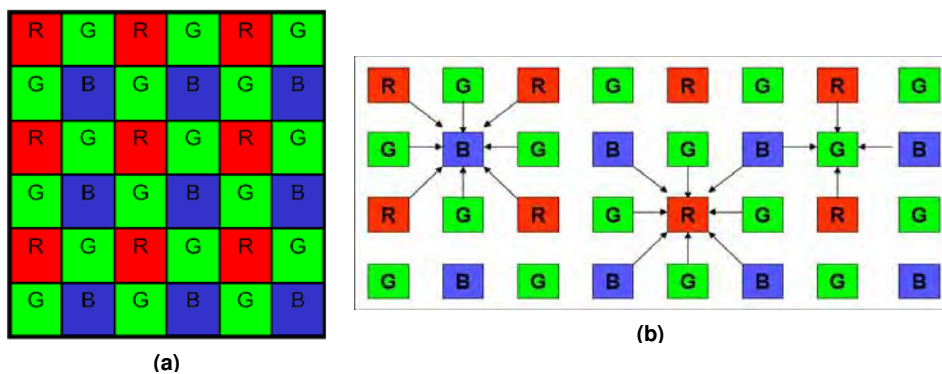


Figura 3: Matriz de filtros RGB - Filtro de Bayer.

2.4 SISTEMAS DIGITAIS COMERCIAIS

2.4.1 Câmaras digitais convencionais

As câmaras convencionais são, em geral, de pequeno e médio formato e costumemente denominadas de câmaras não métricas. Há diferentes modelos de câmaras no mercado, sendo que é importante destacar as diferenças entre as câmaras de

uso amador e os modelos profissionais. O primeiro é costumeiramente encontrado no mercado e não foi necessariamente desenvolvido com componentes de alta qualidade, de modo que não é possível garantir a qualidade geométrica e radiométrica das imagens. Já os modelos de câmaras profissionais apresentam componentes internos e lentes de maior qualidade, uma vez que são usadas por profissionais da área de fotografia e há grande preocupação na qualidade do produto final. Como exemplo, tem-se os modelos de câmaras digitais profissionais da Hasselblad, que possuem com lentes Hasselblad e obturadores de alto desempenho, além de *back* digital com sensor CCD fixo.

De certa forma estes modelos não foram inicialmente projetadas para propósitos fotogramétricos, tendo em vista que seus componentes internos não foram montados para garantir a estabilidade geométrica dos feixes de raios que formam a imagem. Contudo, vale ressaltar que estudos recentes realizados com câmaras digitais profissionais de médio formato (HABIB e MORGAN, 2003a; MACHADO et al, 2003) mostraram que este problema de estabilidade geométrica não afetou estatisticamente os resultados e, se estas câmaras forem devidamente calibradas, podem ser usadas com sucesso em projetos fotogramétricos.

Estas categorias de câmaras possibilitam certas vantagens em relação às câmaras de grande formato, como: grande disponibilidade no mercado; flexibilidade quanto ao intervalo de focalização; são pequenas, leves e de fácil manejo e; têm custos reduzidos.

2.4.1.1 Classificação quanto à resolução

Tendo como referência Cramer (2004b), pode-se classificar as câmaras digitais convencionais segundo a resolução do sensor de coleta, em três diferentes categorias. Conforme verificado nos últimos anos, tem-se um aumento de resolução dos sensores em média a cada 1,5 anos, o que permite a disponibilidade de câmaras com maior rendimento para projetos de Fotogrametria em áreas de maior porte:

- a) *Pequeno formato*: câmaras de até 6 Megapixels, usadas para uso doméstico e captura de imagens de pequenas áreas. Em algumas situações, pode-se usar um arranjo de câmaras para o incremento da resolução de coleta. Como exemplo de câmara de pequeno

formato, tem-se a câmara digital SONY DSCW5 – 5.1 Megapixels (2592 x 1944 pixels), apresentada na Figura 4.



Figura 4: Câmara digital de pequeno formato - SONY DSCW5 (5.1 Megapixels).

- b) *Médio formato*: câmaras com formatos de imagem em torno dos 15 Megapixels. Trata-se, em geral, de modelos de câmaras profissionais que são usadas por fotógrafos e em projetos ambientais e mapeamentos de pequenas áreas. As câmaras KODAK SLR/c (14 Megapixels – 4500 x 3000 pixels) e HASSELBLAD H1D (22 Megapixels – 5440 x 4080 pixels), mostradas na Figura 5, são exemplos de câmaras digitais de médio formato.



(a)



(b)

Figura 5: Câmaras digitais de médio formato: (a) KODAK SLR/c (14 Megapixels), (b) HASSELBLAD H1D (22 Megapixels).

- c) *Grande formato*: câmaras com resolução superior a 40 Megapixels, como são os casos das câmaras *Hasselblad H3D-50* (50 Megapixels) e *Phase One P65+*, com resolução de 60 Megapixels (Figura 6). Estas câmaras possibilitam maior rendimento em projetos de mapeamento de grandes áreas, aliando as vantagens da tecnologia digital à cobertura mais extensa no terreno.



(a)



(b)

Figura 6: Câmaras digitais de grande formato: (a) Hasselblad H3D-50 (50 Megapixels), (b) Back digital Phase One 65+ (60 Megapixels).

2.4.1.2 Sistemas com câmaras digitais de pequeno e médio formato

Com a evolução dos componentes e a disseminação dos modelos de câmaras de pequeno e médio formato no mercado, vários sistemas de coleta para mapeamento foram desenvolvidos, principalmente na Europa, EUA e Canadá. Neste último foi desenvolvido um documento com normas específicas para o uso e calibração destes modelos de câmaras (ILMB, 2007).

Estes sistemas se tornaram altamente atrativos ao mercado de observação da terra, tendo em vista que integram câmaras de médio formato adaptadas às componentes mecânicas, eletrônicas e sensores de georreferenciamento direto. Estas características possibilitam a concepção de um sistema de qualidade e confiabilidade, com um custo mais acessível e disponibilidade quase que instantânea dos dados, uma vez que as imagens digitais georreferenciadas podem ser obtidas logo após a missão, sem a necessidade de processamentos especiais (como retificação e mosaicagem) como ocorre nos sistemas digitais de grande formato. Além disso, são, em geral, sistemas leves e modulares, que podem ser integrados em diversos tipos de aeronaves com grande flexibilidade. Esta tendência internacional motivou o desenvolvimento do presente trabalho, no qual um sistema de aquisição de imagens digitais georreferenciadas e estudos e análises de calibração foram desenvolvidos, de forma a apresentar as viabilidades de uso desta categoria de sistema em projetos fotogramétricos.

Atualmente, pode-se destacar alguns sistemas de coleta internacionais desenvolvidos a partir de câmaras de médio formato, como o DigiCam da empresa *IGI*, o DSS (Digital Sensor System) da *Applanix* e a câmara da DIMAC (Digital Modular Aerial Camera), apresentados na Figura 7. Estes sistemas são formados por um *back* digital de 22 ou 39 Megapixels com dispositivos próprios de sincronismo e gerenciamento de dados.

A câmara DIMAC pode integrar 1 a 4 câmaras de médio formato na plataforma de coleta, de acordo com a característica do projeto. O sistema GPS/INS não é incluído na câmara, mas pode-se integrar algum sistema comercial de georreferenciamento direto.

No caso das câmaras DigiCam e DSS os sistemas de georreferenciamento direto (Aerocontrol da IGI e Applanix POS-AV na DSS) possibilitam a orientação das imagens e são integrados aos softwares de navegação e gerenciamento de voo. Estes sistemas possuem ainda softwares opcionais de pós-processamento de dados e geração de produtos, que podem ser adquiridos junto com o sistema de coleta.



Figura 7: Sistemas digitais de médio formato: (a) DIMAC, (b) DSS (Applanix), (c) DigiCam (IGI).

2.4.2 Sistemas digitais de grande formato

2.4.2.1 Sistema Tri-linear

Nesta abordagem são empregados três sensores CCD lineares (ou mais) com configuração de varredura linear (*pushbroom*) para amostrar de forma contínua o terreno em três faixas. O sistema consiste de três sensores lineares posicionados no plano focal (visada anterior, nadir e posterior) que garantem a geometria e a cobertura estereoscópica da superfície, além de sensores multiespectrais adicionais localizados próximos ao nadir, com a sensibilidade controlada por filtros (vermelho, verde, azul e infravermelho). As imagens de cada linha pancromática formam faixas contínuas nas três visadas de varredura, possibilitando tripla cobertura do terreno (Figura 8). Com o sistema de

varredura tri-linear todos os objetos aparecem em todas as três faixas coletadas pelos sensores pancromáticos (FRICKER et al, 2000).

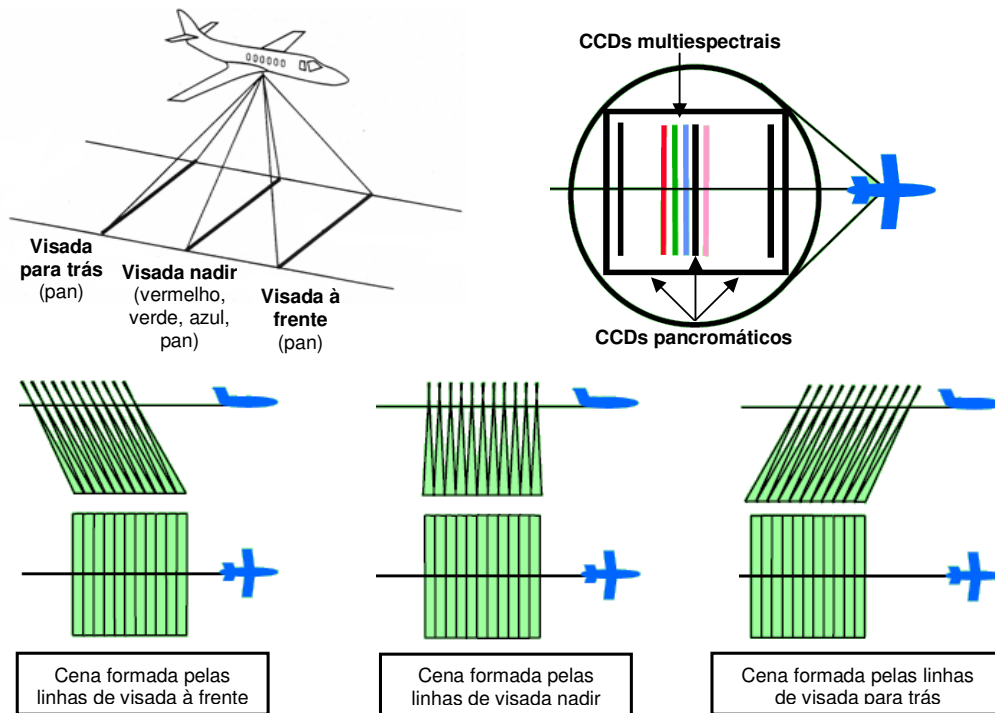


Figura 8: Geometria de aquisição de imagens em sensores tri-lineares (Adaptado de PETRIE, 2000).

O emprego dos sensores de orientação GPS e INS integrados fornecem informações de posição e atitude necessárias para corrigir geometricamente as imagens e promover a solução fotogramétrica ajustando as linhas imageadas. Com estes parâmetros de orientação direta do sensor é realizada uma retificação inicial das imagens, seguida de uma fototriangulação para o refinamento da solução.

Para as operações de triangulação e geração de Modelo Digital de Terreno (MDT) pode ser usado um “triplo matching”, ou seja, uma correlação de imagens utilizando as três visadas. As composições coloridas são usualmente utilizadas para a geração de ortoimagens, uma vez que os sensores multiespectrais estão localizados próximos ao nadir, onde as distorções são apenas laterais.

Como exemplo, a Figura 9 apresenta uma imagem adquirida por uma câmara tri-linear, nas visadas à frente e nadir. As inclinações da aeronave e as variações de relevo tornaram a imagem adquirida com distorções (Figura 9a). Com uma retificação das

imagens por meio dos dados de orientação direta (GPS/INS), as inclinações da aeronave são compensadas e a imagem resultante se assemelha a uma fotografia aérea convencional, contudo com perspectiva diferente, como mostra a Figura 9b. Pelas figuras apresentadas, nota-se que a retificação inicial das imagens é essencial para a visualização adequada da cena. As etapas seguintes consistem na triangulação das linhas imageadas, geração de modelos digitais de terreno e ortoimagens, utilizando softwares específicos do sistema.

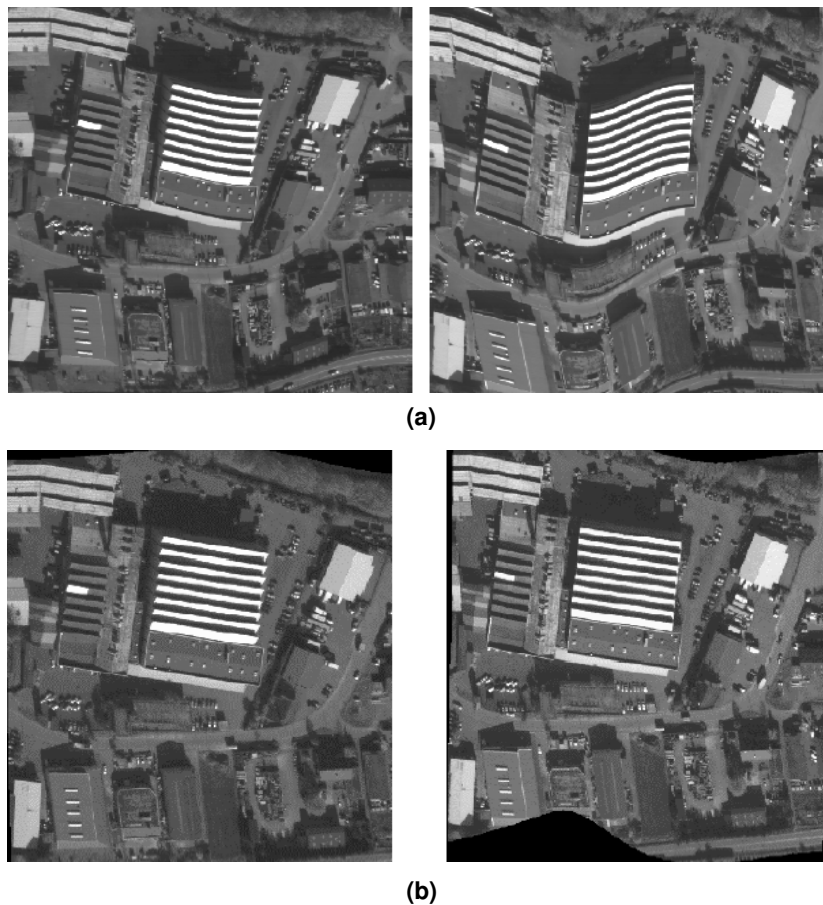


Figura 9: Imagem adquirida pelo sensor tri-linear (visadas à frente e nadir): (a) imagens originais e (b) imagens retificadas (HAALA, 2001).

Dois modelos de câmaras que se baseiam na abordagem tri-linear para aerolevantamento são as câmaras HRSC-A (*DLR* – Centro Espacial da Alemanha) e ADS 40 (*Leica Geosystems*), tratadas na seqüência desta seção.

a) HRSC-A

A câmara HRSC (Figura 10) foi inicialmente desenvolvida para as missões Marte pelo Instituto de Exploração Planetária do Centro Espacial da Alemanha (DLR) em Berlin. Desde os primeiros experimentos com a versão aérea da câmara (HRSC-A), em Maio de 1997, o sistema é usado para diferentes aplicações, como planeamento de redes de telecomunicações, modelagem tridimensional, monitoramento ambiental e atualização cartográfica (LEHMANN et al, 2000).



Figura 10: Câmara aérea digital HRSC-A (LEHMANN, 2000).

A HRSC-A é composta de nove sensores CCD lineares de 5184 pixels cada, montados sobre um plano focal, os quais imageam de forma contínua a superfície descrita pela trajetória da aeronave. Cinco sensores lineares são pancromáticos e os outros quatro contêm filtros para aquisição de imagens multiespectrais (vermelho, verde, azul e infravermelho).

Com a alta acurácia horizontal e vertical obtida pelos sensores HRSC-A, uma nova versão de câmaras HRSC foi desenvolvida: HRSC-AX (Figura 11). Esta nova versão possui algumas diferenças técnicas em relação à versão anterior, no sentido de aumentar a acurácia dos dados e a produtividade do processo.



Figura 11: Câmara aérea digital HRSC-AX (POLI, 2003).

Para melhor caracterizar estes modelos, a Tabela 1 apresenta algumas especificações técnicas das câmaras HRSC-A e HRSC-AX.

Tabela 1: Dados técnicos da câmara HRSC-A (NEUKUM, 1999).

Especificações	HRSC-A	HRSC-AX
Distância Focal	175mm	150mm
Tamanho do pixel	7 μ m	6,5 μ m
Número de sensores lineares	9	9
Número de pixels por linha	5184 pixels	12000 pixels
Resolução radiométrica	8 bits	12 bits
Tempo exposição mínimo		
Peso	32Kg	70Kg
Plataforma	Zeiss T-AS	
Taxa de varredura	450 linhas/s	450 linhas/s

Para operar a bordo de aeronaves, a HRSC-A foi adaptada em uma plataforma giro-estabilizada (ZEISS T-AS), para corrigir as inclinações da aeronave e promover a aquisição de imagens verticais. As informações de posição e orientação da plataforma durante a navegação são obtidas por meio do sistema de orientação direta POS-AV, da *Applanix*.

O DLR, em conjunto com a Universidade de Berlin, desenvolveu um software específico para o processamento das imagens, que compreende as etapas (LEHMANN et al, 2000):

- Retificação das linhas imageadas, a partir dos dados de posição e atitude fornecidos pelos sensores GPS e INS;

- A partir das imagens retificadas, aplica-se uma técnica de correlação de imagens para derivar pontos conjugados e, conseqüentemente, triangular as linhas imageadas;
- Geração do Modelo Digital de Superfície (DSM);
- Geração de ortoimagens e;
- Extração de feições.

b) ADS 40

A câmara ADS40 da *Leica Geosystems* (Figura 12) foi desenvolvida a partir da câmara HRSC-A, por meio de pesquisas realizadas em conjunto com o DLR. A ADS40 se baseia em oito sensores CCD lineares paralelos, onde três linhas proporcionam imagens pancromáticas e cinco linhas imagens multiespectrais (vermelho, verde, azul, infravermelho 1 e infravermelho próximo 2). Os três sensores lineares que captam o RGB (vermelho, verde e azul) são superpostos opticamente durante o vôo usando um arranjo especial de prismas. Os canais do infravermelho próximo são levemente deslocados em relação às linhas pancromáticas próximas ao nadir. Cada CCD pancromático consiste de duas linhas de sensores, cada qual com 12000 pixels, deslocadas de 0.5 pixel. As linhas pancromáticas fazem uso deste arranjo não coincidente para incrementar a resolução espacial.



Figura 12: Câmara aérea digital ADS40 (Leica Geosystems).

A Tabela 2 apresenta as principais características da câmara aérea digital ADS40.

Tabela 2: Dados técnicos da câmara ADS40.

Distância Focal	62,5 mm
Tamanho do pixel	6,5 μ m
Linha pancromática (escalonada)	2 * 12000 pixels
RGB e Infravermelho próximo	12000 pixels
Ângulo entre a visada vante e nadir	26º
Ângulo entre a visada vante e ré	42º
Ângulo entre a visada nadir e ré	16º
Ângulo de abertura	74º
Resolução radiométrica	8 bits
Frequência por linha	200 – 800 Hz
Capacidade de armazenamento em voo	200 – 500 GB
Peso	63kg

As medidas de posição e atitude são fornecidas pelo sistema de orientação direta POS-AV, da *Applanix*. O sistema de orientação gera dados tanto em tempo real como pós-processados. A solução em tempo real é usada para corrigir as inclinações da plataforma durante a coleta, por meio do berço com sistema de giro-estabilização, mostrado na Figura 12. A solução pós-processada é utilizada para promover a orientação das linhas imageadas, sendo que em seguida realiza-se uma fototriangulação das imagens para a eliminação dos erros residuais. A etapa seguinte consiste na geração dos produtos derivados, como modelos digitais de superfície (DSM) e ortoimagens.

2.4.2.2 Configuração modular de câmaras matriciais

Os sensores matriciais produzem imagens instantâneas de uma área no terreno com geometria em perspectiva central, conforme mostra a Figura 13. Este tipo de sensor é usado nas câmaras convencionais baseadas em filme e nas tradicionais câmaras digitais de quadro.

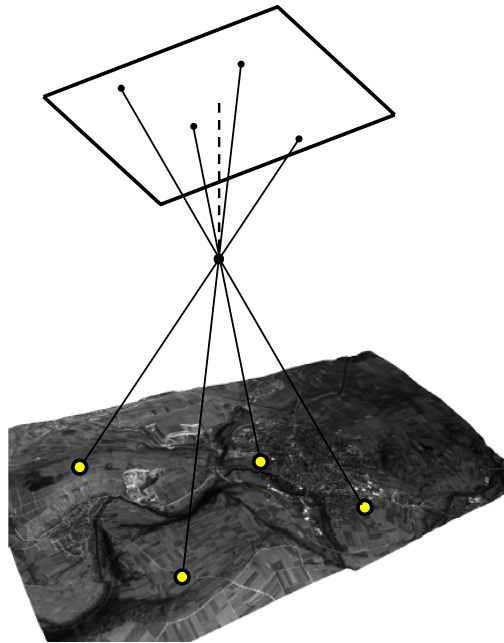


Figura 13: Geometria de aquisição de imagens nas câmaras matriciais.

No entanto, para o recobrimento aéreo torna-se importante dispor de uma câmara que, além da qualidade métrica, proporcione uma cobertura no terreno de grande dimensão, de forma a evitar um número excessivo de imagens tomadas e pontos de apoio a serem coletados em campo. Diante da limitação de resolução dos sensores digitais disponíveis no mercado, uma solução para produzir imagens de alta resolução baseia no uso de um arranjo de câmaras matriciais, com o objetivo de obter uma área de cobertura de maior dimensão no terreno.

Este tipo de sistema consiste em uma configuração de câmaras integradas sobre uma plataforma estabilizada, de tal forma que seja possível produzir uma cobertura fotográfica mais extensa do terreno a partir da integração das imagens capturadas por várias câmaras.

Dentre os sistemas digitais disponíveis no mercado, destacam-se os sistemas DMC, da *Z/I Imaging* e ULTRACAM_D da *Vexcel/Microsoft*.

a) DMC – Digital Mapping Camera

A abordagem proposta pela *Z/I Imaging*, a DMC (*Digital Mapping Camera*), consiste em uma configuração de câmaras integradas em uma plataforma estabilizada (Figura 14). Neste arranjo, quatro câmaras digitais inclinadas produzem imagens pancromáticas. Outras quatro câmaras posicionadas próximas ao nadir produzem imagens multiespectrais (vermelho, azul, verde e infravermelho), que cobrem a mesma área das quatro câmaras pancromáticas, mas com resolução reduzida (PETRIE, 2000; HINZ, 1999; TANG et al, 2000).

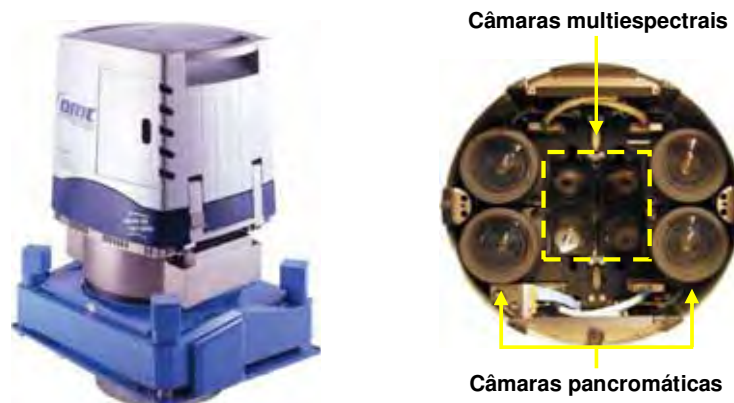


Figura 14: Sistema aéreo digital DMC – Z/I Imaging (CRAMER, 2004a).

O sistema DMC é baseado numa solução multi-câmaras formada por quatro sensores pancromáticos digitais de média resolução (7168 x 4096 pixels), posicionados de forma a garantir a máxima cobertura no terreno. Combinando-se as quatro imagens (Mosaico), a partir das áreas de superposição entre elas, tem-se uma imagem de alta resolução (13824 x 7680 pixels), ora chamada de imagem virtual. O resultado é uma imagem vertical com a usual perspectiva central das imagens convencionais (Figura 15). Para melhor caracterizar a DMC, a Tabela 3 apresenta algumas especificações técnicas da câmara.

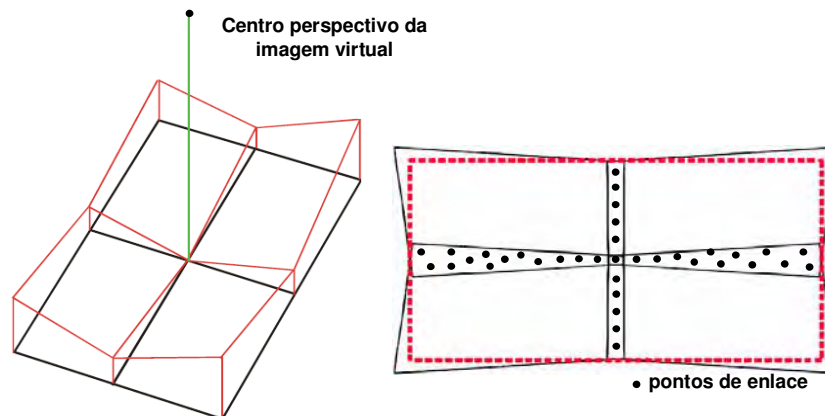


Figura 15: Formação da imagem de alta resolução – imagem virtual (ZEITLER e DOERSTEL, 2002; TANG et al, 2000).

Tabela 3: Dados técnicos da câmara DMC.

Distância Focal (imagens pancromáticas)	120mm
Abertura	f /4
Ângulo de abertura da imagem de grande formato: lateral/longitudinal	44º/74º
Resolução (imagens pancromáticas)	13824 x 7680 pixels
Tamanho do pixel (imagens pancromáticas)	12µm
Quadro da imagem (imagens pancromáticas)	95 x 168mm
Distância Focal (imagens multiespectrais)	25mm
Resolução (imagens multiespectrais)	3000 x 2000 pixels
Compensação de arraste	TDI
Resolução radiométrica	12 bits

Para a formação da imagem de alta resolução alguns procedimentos e calibrações são necessários. Primeiramente, cada uma das oito câmaras (quatro pancromáticas e quatro multiespectrais) é calibrada em laboratório, do ponto de vista geométrico e radiométrico, para o cálculo da orientação interna das câmaras e correções de diferenças de sensibilidades dos pixels nos sensores CCD. Os dados gerados neste processo são usados na etapa de pós-processamento, para a formação da imagem de alta resolução e das imagens coloridas adquiridas pelos sensores multiespectrais. A etapa de pós-processamento consiste nos seguintes processos (ZEITLER e DOERSTEL, 2002):

- Extração de pontos de enlace por correlação nas áreas de superposição das quatro imagens pancromáticas. Os dados de calibração das câmaras obtidos em laboratório são usados para corrigir as coordenadas de imagem dos pontos de enlace;

- Determinação dos ângulos de inclinação das câmaras pancromáticas dentro da plataforma, por um processo de ajustamento por feixes de raios – calibração da plataforma;
- Cálculo dos parâmetros de transformação que relacionam as imagens pancromáticas com a imagem de alta resolução, a partir dos ângulos de inclinação determinados na etapa anterior e das coordenadas dos centros perspectivos das câmaras, estabelecidas por medidas diretas;
- Projeção das imagens pancromáticas para a imagem de alta resolução usando os parâmetros de transformação calculados anteriormente;
- Extração de pontos de enlace entre a imagem de alta resolução e as quatro imagens multiespectrais;
- Cálculo dos parâmetros de transformação para relacionar as imagens multiespectrais com a imagem de alta resolução, a partir dos pontos de enlaces extraídos;
- Mapeamento das imagens multiespectrais sobre a imagem de alta resolução usando os parâmetros de transformação calculados;
- Geração das imagens multiespectrais de grande formato.

O processo de mosaicagem se baseia nos resultados do processo de calibração da plataforma, e combina as quatro imagens pancromáticas para a formação da imagem de alta resolução (imagem virtual). As posições dos centros perspectivos das câmaras são conhecidas a priori, e os ângulos de inclinação das câmaras na plataforma e os valores de distância focal são ajustados no processo de calibração da plataforma.

Para projetar cada pixel da imagem pancromática para a imagem virtual é necessário definir as propriedades da imagem virtual, conforme ilustra a Figura 16. O centro perspectivo da imagem virtual é localizado no centro dos quatro centros perspectivos das câmaras pancromáticas, e o eixo óptico é definido como o eixo óptico médio das quatro câmaras pancromáticas. A distância focal é ajustada para 120mm, para minimizar as diferenças de escalas. Com isso, pode-se projetar cada posição na imagem pancromática

para a imagem virtual, baseando-se nas equações de colinearidade (ZEITLER e DOERSTEL, 2002).

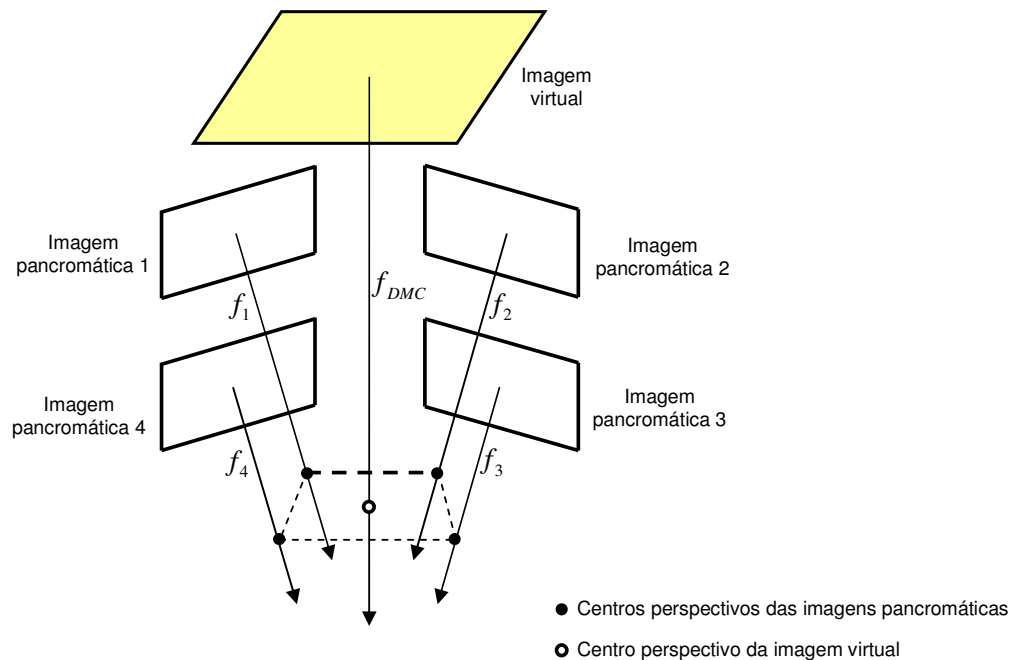


Figura 16: Geometria de formação da imagem virtual na câmara DMC (Baseado em HEIER et al, 2002).

É importante salientar as câmaras possuem um sincronismo preciso no disparo, e a orientação relativa das câmaras durante a coleta é estável (TANG et al 2000), uma vez que a não observância destes fatores pode prejudicar a acurácia do sistema.

O movimento de compensação de arraste deve ser considerado neste tipo de sistema, principalmente quando se trata de imagens de alta resolução. Para alguns modelos de câmaras digitais matriciais consideram-se o uso da técnica de compensação de arraste denominada *Time Delayed Integration (TDI)*, apresentada na Figura 17. Durante o processo de leitura da imagem, as cargas contidas nos sensores CCD são transportadas linha por linha para os registradores seriais, aonde é realizado o registro das cargas. Se este processo de deslocamento for realizado em sincronia com o movimento da matriz de CCD durante a exposição, pode-se compensar o movimento da aeronave por meio de procedimentos eletrônicos.

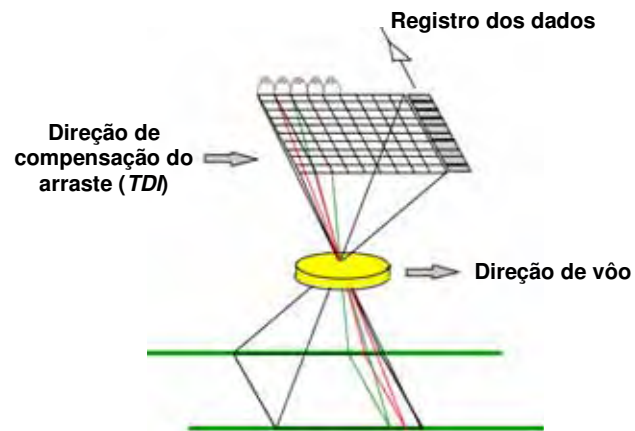


Figura 17: TDI (*Time Delay Integration*) - Técnica de compensação de arraste em câmaras digitais (Adaptado de HINZ, 1999).

b) ULTRACAM_D

A ULTRACAM_D é baseada no uso de múltiplos sensores CCD matriciais de resolução 4000 x 2700 pixels cada. Quatro cones ópticos, linearmente arranjados (Figura 18), promovem a coleta de imagens pancromáticas de alta resolução, enquanto que os outros quatro cones, localizados nas bordas da câmara, são responsáveis pela aquisição de imagens multiespectrais.



Figura 18: Sistema aéreo digital ULTRACAM_D – Vexcel/Microsoft (CRAMER, 2004b).

As câmaras pancromáticas têm o mesmo ângulo de abertura e distam 8 cm entre si, mas os sensores CCD matriciais estão localizados em diferentes posições dentro de cada plano focal. Portanto, é necessário um processo de mosaicagem das sub-imagens coletadas para se obter uma imagem de grande formato (Figura 19). Uma vez que o projeto

da ULTRACAM_D é formado por nove sensores CCD matriciais arranjados em quatro câmaras, o resultado é uma imagem de grande formato na resolução de 11500 x 7500 pixels.

No processo de mosaicagem uma câmara atua como principal (*master* – Ver Figura 19), para definir o sistema de coordenadas da imagem. Esta câmara é formada por quatro sensores CCD matriciais, que definem a imagem pancromática de grande formato da ULTRACAM_D (Figura 19a). Os espaços deixados entre as quatro sub-imagens são preenchidos pelas sub-imagens das outras três câmaras pancromáticas, como apresentam as Figuras 19b-d. As sub-imagens são mosaicadas por correlação de imagens de acordo com o sistema definido pelo cone principal, a partir de pontos de enlace medidos nas áreas de superposição (Figura 20).

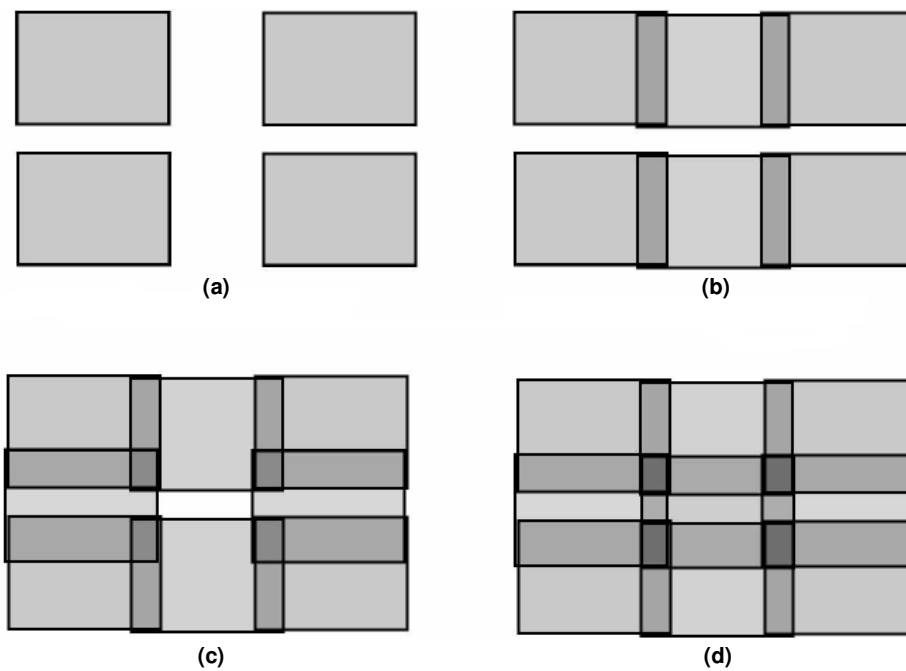


Figura 19: Formação da imagem pancromática de grande formato na ULTRACAM_D. (a) sub-imagens da câmara principal, (b) sub-imagens da câmara principal e da segunda câmara, (c) sub-imagens da câmara principal, com as da segunda e terceira câmaras, (d) imagem de grande formato formada pelas nove sub-imagens (KROPFL et al, 2004).

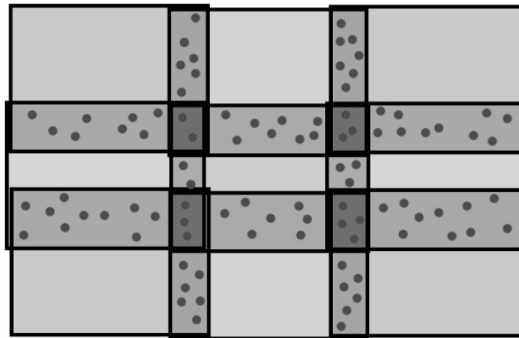


Figura 20: Pontos de enlace medidos nas áreas de superposição entre as sub-imagens, usados no processo de mosaicagem (THURGOOD, 2004).

Como as outras câmaras são fisicamente separadas da câmara principal (distância entre os cones: 8 cm), cada câmara é disparada com certo atraso de tempo (em torno de 1 ms) para definir um centro de projeção comum para todas as quatro câmaras pancromáticas, conforme ilustra a Figura 21. O atraso de tempo entre os disparos das diferentes câmaras é dependente da velocidade real da aeronave (CRAMER, 2004a).

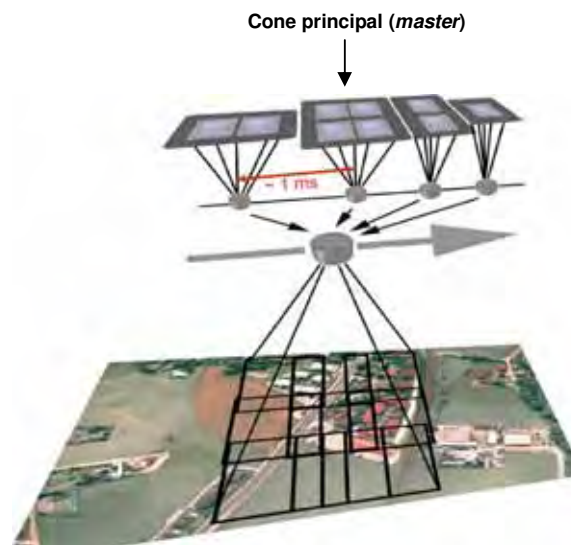


Figura 21: Seqüência de aquisição de imagens da ULTRACAM_D (THURGOOD, 2004).

Para sintetizar as características da ULTRACAM_D, a Tabela 4 apresenta algumas especificações técnicas da câmara (LEBERL e GRUBER, 2003).

Tabela 4: Dados técnicos da câmara ULTRACAM_D.

Distância Focal	100 mm
Abertura	f /5,6
Ângulo de abertura: lateral/longitudinal	55º/37º
Resolução (imagens pancromáticas)	11500 x 7500 pixels
Tamanho do pixel (imagens pancromáticas)	9µm
Quadro da imagem (imagens pancromáticas)	103,5 x 67,5mm
Resolução (imagens multiespectrais)	4008 x 2672 pixels
Tamanho do pixel (imagens multiespectrais)	9µm
Tempo de exposição	1/500 – 1/60
Compensação de arraste	TDI
Resolução radiométrica	12 bits
Dimensões	45 x 45 x 60cm
Peso	< 30Kg

2.4.2.3 Tri-linear x Arranjo matricial

Atualmente, há uma grande discussão na comunidade científica em torno da melhor solução para a aquisição de imagens digitais aéreas: câmaras baseadas na abordagem tri-linear ou na abordagem matricial.

Embora as câmaras tri-lineares possibilitem um sistema de lentes e um plano focal único, além de alta resolução geométrica e radiométrica de seus sensores, a abordagem matricial é mais aceita no mercado. Isto porque a abordagem tri-linear necessita de software específico para o processamento dos dados e o uso de sensores de orientação direta (GPS/INS) se torna imprescindível. Isto implica que a qualidade das imagens resultantes e a acurácia do produto final seja dependente da qualidade dos dados de orientação direta providos pelos GPS/INS.

A abordagem matricial se caracteriza pela geometria da imagem convencional (*frame*), com a usual perspectiva central. Isso possibilita a utilização direta das imagens nas estações fotogramétricas digitais existentes. Além disto, vale destacar que as câmaras digitais métricas utilizam técnicas de compensação de arraste (TDI), e o uso dos sensores GPS e INS é opcional.

Neste capítulo foram apresentados modelos de câmaras DMC e ULTRACAM, que apesar de ambas se basearem na abordagem de coleta matricial, apresentam características distintas de coleta e formação de imagens. A câmara DMC utiliza-

se de câmaras digitais de médio formato dispostas de forma oblíqua na plataforma de coleta, com disparos sincronizados das estações. Esta geometria convergente tem como vantagem de se poder desenvolver a plataforma de coleta sem alterar a geometria interna dos sensores de coleta, contudo o software de pós-processamento para a formação da imagem virtual torna-se mais complexo, tendo em vista que a geometria interna e a orientação relativa entre as câmaras na plataforma devem ser precisamente conhecidas.

Na abordagem proposta pela empresa Vexcel (ULTRACAM), as câmaras são dispostas de modo vertical na plataforma de coleta, sendo eletronicamente disparadas com diferenças de tempo determinadas pela velocidade da aeronave. Neste caso, têm-se imagens verticais com um centro perspectivo comum entre elas, e o processo de formação da imagem de grande formato torna-se geometricamente menos complexo. Todavia, os componentes de hardware tornam-se mais complexos, sendo que os sensores em cada conjunto óptico devem ser precisamente alinhados, evitando áreas com descontinuidades no processo de formação das imagens.

CAPÍTULO III

CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS E FOTOTRIANGULAÇÃO COM PARÂMETROS ADICIONAIS

3.1 DEFINIÇÕES E MODELOS

Segundo Mikhail et al (2001), a unidade geométrica mais elementar na Fotogrametria é o raio de luz, o qual conecta o ponto no espaço objeto, o centro perspectivo da câmara e a projeção do ponto na imagem. Uma imagem é formada por um feixe de raios que converge no centro perspectivo, cuja posição e orientação no espaço são desconhecidas. O ajustamento por feixes de raios de um bloco de imagens estabelece de forma indireta a posição e orientação de cada feixe, bem como suas precisões, a partir de informações de controle. Para melhor estabelecer as equações envolvidas no processo de formação das imagens, torna-se necessário definir inicialmente os referenciais envolvidos.

No processo de formação da imagem os referenciais envolvidos seguem definidos a seguir, tomando-se como base a Figura 22.

- **Sistema de coordenadas da imagem (c, l):**
 - Origem: canto superior esquerdo da imagem. Sistema bidimensional estabelecido sobre o plano do sensor;
 - Eixo c : eixo de contagem das colunas - direção horizontal da imagem a partir da origem do sistema;
 - Eixo l : eixo de contagem das linhas – rotacionado em 90° em relação ao eixo c .
- **Sistema intermediário da imagem (x', y'):**
 - Origem: centro da imagem. Sistema bidimensional estabelecido sobre o plano do sensor;

- Eixo x: paralelo ao eixo de contagem das colunas e orientado da mesma forma;
 - Eixo y: paralelo ao eixo de contagem das linhas, considerando uma reflexão no eixo de coordenadas.
- **Sistema fotogramétrico (x, y, z):**
- Origem: centro perspectivo da câmara (CP) – ponto nodal anterior;
 - Eixos x e y : paralelos aos eixos do sistema intermediário da imagem e orientados da mesma forma;
 - Eixo z : perpendicular ao plano da imagem e forma com os outros dois eixos um sistema dextrogiro.
- **Sistema do espaço objeto (X, Y, Z):**
- Origem: local;
 - Eixo X : na direção leste;
 - Eixo Y : na direção norte;
 - Eixo Z : vertical ao plano de referência.

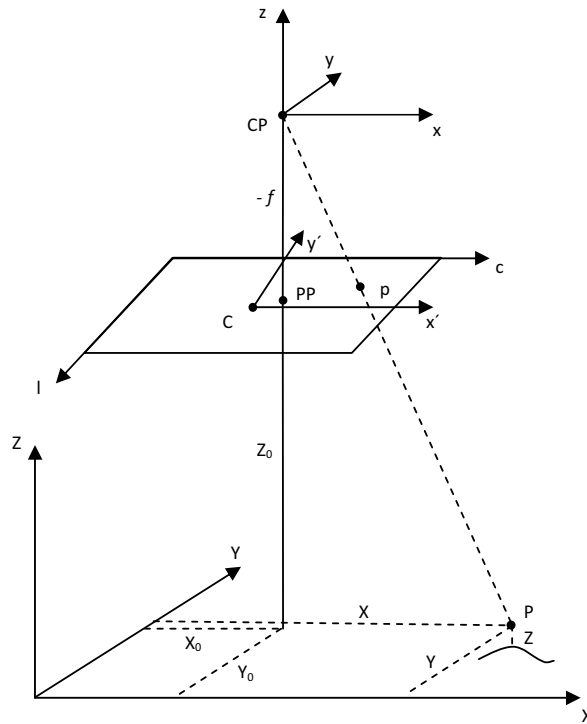


Figura 22: Sistemas de Referência considerados no processo de formação da imagem.

As coordenadas de pontos medidos nas imagens estão referenciadas ao sistema de imagem (c,l). Para estabelecer a relação entre os sistemas de imagem e fotogramétrico, tem-se a seguinte relação:

$$\begin{aligned} x &= (c - c_x) * p_x - x_0 \\ y &= -(l - c_y) * p_y - y_0 \\ z &= -f \end{aligned} \tag{1}$$

com

$$\begin{aligned} c_x &= \frac{\text{número de colunas} - 1}{2} \\ c_y &= \frac{\text{número de linhas} - 1}{2} \end{aligned} \tag{2}$$

$(x, y, -f)$: coordenadas referidas ao sistema fotogramétrico, sendo f a distância focal da câmara;

(c, l) : coordenadas referidas ao sistema da imagem;

(c_x, c_y) : coordenadas do centro da imagem no sistema de imagem;

p_x e p_y : dimensões do pixel nas componentes x e y , respectivamente;

(x_0, y_0) : coordenadas do ponto principal no referencial do sistema intermediário da imagem.

O ponto principal consiste na projeção ortogonal do centro perspectivo da câmara (CP) no plano do sensor.

Vale ressaltar que as coordenadas do ponto principal podem ser estabelecidas diretamente no referencial da imagem (c,l), sem a necessidade de uma transformação prévia para o sistema intermediário da imagem. O uso do sistema intermediário permite uma melhor percepção da magnitude do deslocamento do ponto principal, em relação ao centro da imagem.

A geometria perspectiva da imagem, a qual estabelece a relação entre os referenciais fotogramétricos e do espaço objeto, é definida pela condição de colinearidade, na qual o centro perspectivo da câmara, o ponto no espaço objeto e o correspondente ponto na imagem definem uma reta. As equações de colinearidade são dadas por:

$$\begin{aligned} x - \Delta x + f \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} &= 0 \\ y - \Delta y + f \cdot \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

com:

$\Delta x, \Delta y$: correções calculadas a partir dos parâmetros de distorção, que compensam os desvios da geometria perspectiva;

X_0, Y_0, Z_0 : coordenadas do centro perspectivo da câmara no referencial do espaço objeto;

X, Y, Z : coordenadas do ponto no sistema de referência do espaço objeto;

r_{11}, \dots, r_{33} : elementos da matriz de rotação R , que relacionam os espaços imagem e objeto, em função dos ângulos ω , φ e κ , que definem, respectivamente, as rotações em torno dos eixos x , y e z .

$$R = \begin{bmatrix} \cos \kappa \cos \varphi & \cos \kappa \sin \varphi \sin \omega + \sin \kappa \cos \omega & \sin \kappa \sin \omega - \cos \kappa \sin \varphi \cos \omega \\ -\sin \kappa \cos \varphi & \cos \kappa \cos \omega - \sin \kappa \sin \varphi \sin \omega & \sin \kappa \sin \varphi \cos \omega + \cos \kappa \sin \omega \\ \sin \varphi & -\cos \varphi \sin \omega & \cos \varphi \cos \omega \end{bmatrix} \quad (4)$$

As potenciais causas para os desvios da colinearidade na formação da imagem são as distorções das lentes (radial simétrica e descentrada) e a refração atmosférica, que deve ser considerada no caso de levantamentos aéreos.

Além destes efeitos, pode-se levar em conta o erro de afinidade do sensor, que é representado pelas componentes de não ortogonalidade e diferença de escala entre os eixos.

Distorção radial simétrica

A distorção radial simétrica é o deslocamento radial de um ponto na imagem de sua posição teoricamente correta, ou seja, uma mudança no ângulo entre o raio de luz e o eixo óptico, causado pela refração sofrida pelo raio de luz ao atravessar o sistema óptico. Tal efeito pode ser modelado por um polinômio, aplicado nas componentes x e y da coordenada do ponto (FRYER, 1996; WOLF e DEWITT, 2000).

$$\begin{aligned}\delta x_r &= (k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7) * x \\ \delta y_r &= (k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7) * y\end{aligned}\quad (5)$$

onde:

$\delta x_r, \delta y_r$: componentes da distorção radial simétrica nas coordenadas x e y ;

k_1, k_2, k_3 : coeficientes da distorção radial;

r : distância do ponto (x,y) ao ponto principal, sendo:

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (6)$$

Distorção descentrada

A distorção descentrada é causada pela impossibilidade de alinhamento entre os eixos ópticos das lentes que compõem o sistema de lentes, causando um deslocamento na posição de um ponto na imagem. Esta distorção é descrita pela expressão:

$$\begin{aligned}\delta x_d &= P_1 [3x^2 + y^2] + 2P_2 xy \\ \delta y_d &= 2P_1 xy + P_2 [3y^2 + x^2]\end{aligned}\quad (7)$$

sendo:

$\delta x_d, \delta y_d$: componentes da distorção descentrada nas coordenadas x e y ;

P_1, P_2 : coeficientes da distorção descentrada.

Vale ressaltar que a magnitude dos parâmetros de distorção descentrada é geralmente muito pequena em câmaras para fins fotogramétricos. Neste trabalho, a significância da distorção descentrada nas câmaras consideradas, assim como as correlações com os outros parâmetros, são analisados.

Refração atmosférica

Apesar de ser um fator externo a câmara, a refração atmosférica deve ser previamente considerada em calibrações com câmaras aéreas, uma vez que proporciona desvios dos raios de luz que atravessam a atmosfera em virtude das variações dos índices de refração dos meios. Este efeito causa um deslocamento radial do ponto na imagem similar à distorção radial simétrica.

Andrade (1980) destaca que a região que se estende até 5000 m acima do nível do mar tem grande variação do índice de refração, devido fundamentalmente à inversão de temperatura, variações da pressão do vapor d'água e pressão atmosférica. Acima desta região a atmosfera é relativamente calma.

Além disto, segundo Andrade (1980), torna-se relevante considerar a perturbação da atmosfera gerada pelo movimento da aeronave durante a coleta, que adiciona efeitos refrativos nos raios de luz que incidem ao sistema óptico. Contudo, é muito complexa a modelagem deste efeito para a pré-correção das coordenadas de imagem, tendo em vista que a variação de densidade ocasionada pelo movimento da aeronave é função da forma da aeronave, velocidade de cruzeiro, altura de vôo, textura da superfície inferior da aeronave, ângulo de ataque, entre outros.

Considerando a dificuldade e o custo agregado para se obter as informações meteorológicas da estação em solo e do ambiente da câmara durante a aquisição da imagem, diversos autores, como Schenk (1999), Mikhail et al (2001) e Wolf e Dewitt (2000), consideram o uso de uma atmosfera padrão, que embora seja menos

realística, é mais simplificada e usual para a pré-correção das coordenadas de imagem. Deste modo, conforme apresentado por Schenk (1999), as componentes de correção da refração atmosférica podem ser calculadas por:

$$\begin{aligned}\delta x_f &= k \left(1 + \frac{r^2}{f^2} \right) * x \\ \delta y_f &= k \left(1 + \frac{r^2}{f^2} \right) * y\end{aligned}\tag{8}$$

$$k = \left(\frac{2410H}{H^2 - 6H + 250} - \frac{2410h^2}{(h^2 - 6h + 250) * H} \right) * 10^{-6}\tag{9}$$

com:

$\delta x_f, \delta y_f$: componentes da refração fotogramétrica nas coordenadas x e y ;

H : altitude de vôo (em metros);

h : altitude média do terreno (em metros).

Afinidade

No caso de câmaras digitais os parâmetros de afinidade (A e B) correspondem a uma escala e um parâmetro de não ortogonalidade entre os eixos do sistema de coordenadas da imagem (HABIB e MORGAN, 2003b):

$$\begin{aligned}\delta x_a &= -Ax + By \\ \delta y_a &= Ay\end{aligned}\tag{10}$$

onde $\delta x_a, \delta y_a$ são as componentes de afinidade nas coordenadas x e y ;

Como o sensor de coleta das câmaras digitais é de estado sólido, este efeito é teoricamente desprezível, contudo há autores que o consideram no processo de calibração de câmaras (HEIER et al, 2002; SHORTIS et al, 1998). Dorstel et al (2003), destaca que a diferença de escala entre as medidas horizontal e vertical do pixel, modelado pelo parâmetro A , é mais significativa e não deve ser excluída do processo. Já, o parâmetro relacionado a não ortogonalidade dos eixos nem sempre é significativo. Neste trabalho, a influência deste efeito é avaliada por meio de experimentos.

3.2 CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS

De acordo com Habib et al (2004), o objetivo da calibração de câmaras é determinar os parâmetros de orientação interior da câmara. Os parâmetros que definem a geometria interna da câmara compreendem a distância focal (f), a posição do ponto principal (x_0, y_0) e os parâmetros de correções nas coordenadas de imagem que compensam os desvios da geometria perspectiva da imagem em função das distorções das lentes. Além disso, no caso aéreo, há que se considerar a refração atmosférica, cujo efeito nas coordenadas de imagem é similar ao da distorção radial simétrica.

A calibração de câmaras fotogramétricas é usualmente realizada em laboratório, com os métodos de *multicolimador* e *goniômetro*, apesar de procedimentos de campo também serem usados, a partir de pontos sinalizados em áreas de calibração. Além destes, com o avanço computacional e a implementação de algoritmos de calibração e ajustamento por feixes de raios, as técnicas de autocalibração e calibração em serviço (*on-the-job*) estão sendo largamente usadas.

3.2.1 Métodos de Laboratório

Conforme já mencionado anteriormente, os métodos *Multicolimador* e *Goniômetro* são dois tipos de procedimentos de laboratório para a calibração de câmaras.

O método do *Multicolimador* consiste em fotografar imagens projetadas, sobre uma placa de cristal com filme, por um conjunto de colimadores montados num arranjo angular convergente cujos ângulos são precisamente conhecidos. Um colimador consiste em um projetor óptico com uma cruz (ou outro alvo) montada em seu plano de foco infinito. Neste sentido, os raios de luz que incidem sobre a cruz emergem do colimador na forma de raios paralelos que, ao atravessarem o conjunto de lentes da câmara, são focalizados exatamente no plano focal.

Os colimadores são montados em planos verticais que formam 90° entre si (banco de colimadores). Cada colimador é rigidamente fixo neste banco, de tal modo que os

eixos ópticos dos colimadores adjacentes se interceptam em ângulos precisamente conhecidos. A câmara é posicionada de forma que seu plano focal seja perpendicular ao eixo do colimador central, e o ponto nodal externo das lentes seja a intersecção dos eixos de todos os colimadores. Nestas condições, quando a imagem de calibração é adquirida, as cruces dos colimadores estarão registradas ao longo das diagonais do quadro da imagem.

Na determinação da calibração da câmara, um modelo matemático específico, que inclui a distância focal calibrada, coordenadas do ponto principal e parâmetros de distorção óptica, é usado. Uma solução pelo Método dos Mínimos Quadrados é realizada para o cálculo dos valores mais prováveis para tais parâmetros.

O método do *Goniômetro* é similar ao método do multicolimador, diferindo apenas pelo equipamento utilizado e as grandezas medidas. Neste método, a câmara a ser calibrada é alinhada com o goniômetro, de modo que o ponto nodal externo esteja sobre o eixo óptico do goniômetro. Uma placa com uma rede regular de pontos é posicionada no plano focal da câmara. Quando a placa é iluminada, cada ponto da rede pode ser observado por um goniômetro, que deve estar focalizado para o infinito. Os parâmetros de calibração são então calculados mediante utilização de um modelo matemático adequado, similar ao usado no método do multicolimador.

Maiores detalhes sobre os métodos de calibração em laboratório podem ser encontrados em Wolf e Dewitt (2000), Andrade (1998) e Mikhail et al (2001). Destaca-se que os métodos de laboratório ainda são considerados para as câmaras digitais. Hefele (2006) apresenta os processos de calibração da câmara DMC (Zeiss) com bancos de colimadores no campo de calibração em Jena.

3.2.2 Métodos de campo

Os métodos de campo apresentam as vantagens de não requererem equipamentos especiais de mecânica fina e custos elevados, além de oferecerem soluções mais completas com superabundância de observações. Nesta categoria, podem-se citar os métodos: estelar, campos mistos e câmaras convergentes (WOLF e DEWITT, 2000;

ANDRADE, 1998). Além disso, os métodos de campo propiciam que as imagens sejam coletadas em condições similares às de uso, exceto para o caso do método estelar.

No método *estelar*, fotografa-se um conjunto de alvos formados por estrelas identificáveis, e grava-se o instante de exposição. A partir dos dados de ascensão reta e declinação das estrelas, obtidos nas efemérides para os instantes de coleta das imagens, a orientação e os parâmetros de calibração da câmara são estimados. A desvantagem deste método é que os raios de luz provenientes das estrelas atravessam a atmosfera, e devem ser realizadas compensações das refrações atmosféricas. Por outro lado, há um número enorme de estrelas, permitindo um grande número de observações.

Os métodos de *campos mistos* e de *câmaras convergentes* foram desenvolvidos para resolver o problema de dependência linear entre pares de parâmetros no processo de ajustamento da aerotriangulação por feixes de raios, baseado nas equações de colinearidade com parâmetros de calibração.

Conforme discutido por Andrade e Olivas (1981), na solução de um ajustamento pelo método dos Mínimos Quadrados (Ver Mikhail, 1976) é impossível separar parâmetros correlacionados (linearmente dependentes) tendo em vista que o efeito da variação de um sobre a função dada é compensada pela variação do outro. Tomando-se como base que o intervalo de correlação é entre +1 e -1, tem-se que quando mais próximo destes valores maior é a dependência linear entre os parâmetros e tem-se um caso de instabilidade.

Merchant (1968)² *apud* Andrade e Olivas (1981) verificou a existência de dependência linear na matriz das derivadas parciais do modelo matemático em relação aos parâmetros, para o caso da solução de calibração de câmaras com fotos aéreas perfeitamente verticais adquiridas sobre um terreno plano. No caso matricial, isso ocorre quando há uma combinação linear entre colunas (colunas proporcionais). A Tabela 5 mostra os elementos da matriz de derivadas para o método paramétrico de ajustamento (Ver MIKHAIL e ACKERMAN, 1976), no caso das fotos perfeitamente verticais e o terreno plano.

² MERCHANT, D. G. *Calibration of the aerial photogrammetric system*. S.I., Rome Air Development Center, 1968.

Tabela 5: Elementos da matriz das derivadas parciais em relação aos parâmetros – calibração de câmaras.

	x_0	y_0	f	X_0	Y_0	Z_0
$F(x)$	-1	0	$-\frac{X-X_0}{Z-Z_0}$	$\frac{f}{Z-Z_0}$	0	$-f\frac{X-X_0}{(Z-Z_0)^2}$
$F(y)$	0	-1	$-\frac{Y-Y_0}{Z-Z_0}$	0	$\frac{f}{Z-Z_0}$	$-f\frac{Y-Y_0}{(Z-Z_0)^2}$

Considerando o terreno plano verifica-se que o termo $Z-Z_0$ é constante. Deste modo, tem-se dependência linear na matriz, tendo em vista que se as colunas relativas aos parâmetros x_0 , y_0 e f forem multiplicadas pelo termo $(\frac{f}{Z-Z_0})$ resultam-se nas colunas dos parâmetros X_0 , Y_0 e Z_0 , respectivamente.

Pelos dados apresentados, Merchant (1968) *apud* Andrade e Olivas (1981) verificou que se a componente Z variar (terreno não plano) a dependência linear entre os parâmetros deixará de existir. Deste modo, o método desenvolvido por Merchant (campos mistos) se baseia no uso de dois campos de calibração, sendo um montanhoso e outro plano. A utilização do terreno acidentado permite a quebra da dependência linear entre os parâmetros, uma vez que a altura de vôo não se torna constante. O campo mais plano é usado para a distribuição de uma grande quantidade de pontos de controle. Leigh (1973)³ *apud* Andrade e Olivas (1981) destacou por meio de experimentos realizados que a diferença de altitude dos pontos no terreno deve ser de pelo menos 20% da altura de vôo.

De outra forma, vale destacar que se os parâmetros relativos às coordenadas dos centros perspectivos das fotos (X_0 , Y_0 , Z_0) forem conhecidos a priori com precisão, tem-se também a quebra da dependência linear entre os parâmetros, tendo em vista que os efeitos dos parâmetros na função poderão ser separados. Esta abordagem é discutida com experimentos neste trabalho de pesquisa.

No método de câmaras convergentes, a quebra de correlação entre os parâmetros de orientação interior (OI) e orientação exterior (OE) é realizada por meio de tomadas de fotografias convergentes entre si. Com isto, este método se torna de difícil

³ LEIGH, G. E. *A study in improvement of the metric camera system*. S. I., The Ohio State University, 1973.

adequação para câmaras aéreas, mas de fácil utilização para a calibração com fotografias terrestres.

Os métodos de calibração de campo podem ser generalizados para que os parâmetros de calibração sejam determinados durante a realização do levantamento. Nesta premissa, são introduzidos os termos calibração em serviço (*on-the-job*) e autocalibração (*self-calibration*), conforme definidos em Clarke e Fryer (1998) e Fryer (1996).

A *calibração em serviço* se baseia no ajustamento por feixes de raios com parâmetros adicionais, os quais descrevem os parâmetros de distorção das lentes, distância focal, coordenadas do ponto principal e outros (Ex: afinidade). Os pontos de controle são localizados nas imediações ou nas áreas próximas ao objeto a ser fotografado. Este método é mais comum no contexto da calibração de câmaras à curta distância, porém pode ser também usado em aplicações aéreas, onde pontos de controle são dispostos sobre a área a ser fotografada.

Na *autocalibração*, as medidas de pontos discretos nas imagens são usadas como dados de entrada para a determinação das coordenadas no espaço objeto dos pontos observados e dos parâmetros de calibração, a partir das equações de colinearidade modificadas pela adição dos parâmetros de calibração. É importante destacar que esta abordagem não requer a utilização de objetos de controle para a calibração. Utiliza-se o mínimo de injunções (por exemplo, informações de distância), o suficiente para eliminar a singularidade provocada pelo não uso de informações do espaço objeto. O arranjo geométrico das câmaras e o número e a distribuição dos pontos observados nas imagens são os fatores que influenciam a acurácia da solução final (FRYER, 1996).

Embora os conceitos de *autocalibração* e *calibração em serviço* sejam bem definidos, alguns autores não os diferenciam (WOLF e DEWITT, 2000; MIKHAIL et al, 2001), sendo chamados genericamente de *autocalibração*. Neste trabalho se utilizará o termo Fototriangulação com parâmetros adicionais, largamente usado na literatura, para se referir ao processo de determinação dos parâmetros de orientação interior e demais efeitos sistemáticos em conjunto com os demais parâmetros no ajustamento em bloco.

3.3 FOTOTRIANGULAÇÃO COM PARÂMETROS ADICIONAIS

Em geral, a calibração das câmaras é realizada antes de sua utilização nas coberturas aéreas. Os parâmetros de orientação interior podem ser determinados tanto por métodos de laboratório quanto por métodos de campo, e então fixados durante o processo de fototriangulação. Com isto, assume-se que as coordenadas de pontos medidos nas imagens sejam corrigidas dos efeitos sistemáticos (distorções das lentes e deformações do sensor) antes da realização da fototriangulação. Isto permite o uso de um modelo mais simplificado no ajustamento em bloco por feixes de raios, com um número menor de incógnitas e sem parâmetros altamente correlacionados.

Contudo, os parâmetros de orientação interior da câmara podem ser determinados como parte da solução durante o ajustamento em bloco, introduzindo parâmetros adicionais às equações de colinearidade e considerando alguns elementos destas equações como incógnitas (distância focal, coordenadas do ponto principal e parâmetros de lentes). Embora a inclusão de parâmetros adicionais possa resultar em correlações indesejáveis, é relevante considerar que o ambiente em que a calibração foi realizada (laboratório ou outros) é diferente do ambiente de coleta das imagens. Além disto, a operação com as câmaras durante a coleta de imagens e o período de tempo decorrido da calibração da câmara podem alterar os parâmetros de orientação interior, dependendo da estabilidade do sistema óptico e da câmara, prejudicando a reconstrução tridimensional precisa dos pontos.

Em geral, modelos polinomiais são considerados para incorporar os parâmetros adicionais, sendo que a distância focal e as coordenadas do ponto principal são fixadas a partir dos valores pré-calibrados, como é o caso dos modelos apresentados mais adiante. Estes modelos são denominados por alguns autores como *modelos de autocalibração*, contudo se tratam de grupos de parâmetros polinomiais que visam absorver os efeitos de distorção das lentes e outros erros sistemáticos. No caso aéreo, devido às correlações entre parâmetros, não é possível estimar simultaneamente os valores de distância focal e coordenadas do ponto principal no processo, exceto se houver uma

variação significativa da altitude dos pontos no espaço objeto ou se os parâmetros de orientação exterior forem conhecidos com precisão (GPS/INS).

Segundo Clarke e Fryer (1998), com os desenvolvimentos e usos de técnicas de ajuste em bloco por D. C. Brown desde a década de 60, mais comumente com fotografias terrestres, verificou-se que era possível determinar parâmetros de calibração simultaneamente com a determinação de coordenadas de alvos no espaço objeto. Este método tornou-se conhecido como autocalibração, que se constitui num método robusto, no qual as observações de pontos nas imagens, adquiridas em diferentes pontos de vista, contribuem para a determinação dos parâmetros de orientação interior e outros efeitos sistemáticos. Os primeiros trabalhos com imagens aéreas surgiram no início da década de 70, e no congresso de 1976 da Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ISPRS) foi estabelecido um grupo de trabalho que fomentou o estudo de diferentes conjuntos de parâmetros adicionais.

Conforme já discutido, estes modelos geralmente se baseiam em polinômios cujos coeficientes modelam os efeitos de distorção das lentes e demais erros sistemáticos provenientes do processo de aquisição e digitalização das imagens, como erros de deformação do filme, distorção de afinidade e outros erros residuais, como a parte residual não modelada da refração fotogramétrica.

Há diversos modelos com parâmetros adicionais que foram desenvolvidos principalmente na década de 70. Como exemplo, apresenta-se os modelos de Ebner e Brown (MURAI et al, 1984; MIKHAIL et al, 2001), que são os mais conhecidos na literatura.

- *Modelo de Ebner:*

$$\begin{aligned} \Delta x &= a_1x + a_2y - a_3\left(2x^2 - \frac{4r^2}{3}\right) + a_4xy + a_5\left(y^2 - \frac{2r^2}{3}\right) + a_7x\left(y^2 - \frac{2r^2}{3}\right) + \\ &+ a_9y\left(x^2 - \frac{2r^2}{3}\right) + a_{11}\left(x^2 - \frac{2r^2}{3}\right)\left(y^2 - \frac{2r^2}{3}\right) \\ \Delta y &= -a_1y + a_2x + a_3xy - a_4\left(2y^2 - \frac{4r^2}{3}\right) + a_6\left(x^2 - \frac{2r^2}{3}\right) + a_8y\left(x^2 - \frac{2r^2}{3}\right) + \\ &+ a_{10}x\left(y^2 - \frac{2r^2}{3}\right) + a_{12}\left(x^2 - \frac{2r^2}{3}\right)\left(y^2 - \frac{2r^2}{3}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

com:

$\Delta x, \Delta y$: correções às observações;

(a_1, \dots, a_{12}) : parâmetros do polinômio de Ebner;

- *Modelo de Brown:*

$$\begin{aligned}
 \Delta x = & a_1x + a_2y + a_3xy + a_4y^2 + a_5x^2y + a_6xy^2 + a_7x^2y^2 + \\
 & + \frac{x}{f} [a_{13}(x^2 - y^2) + a_{14}x^2y^2 + a_{15}(x^4 - y^4)] + \\
 & + x [a_{16}(x^2 + y^2)^2 + a_{17}(x^2 + y^2)^4 + a_{18}(x^2 + y^2)^6] + a_{19} + a_{21} \left(\frac{x}{f} \right) \\
 \Delta y = & a_8xy + a_9x^2 + a_{10}x^2y + a_{11}xy^2 + a_{12}x^2y^2 + \\
 & + \frac{y}{f} [a_{13}(x^2 - y^2) + a_{14}x^2y^2 + a_{15}(x^4 - y^4)] + \\
 & + y [a_{16}(x^2 + y^2)^2 + a_{17}(x^2 + y^2)^4 + a_{18}(x^2 + y^2)^6] + a_{20} + a_{21} \left(\frac{y}{f} \right)
 \end{aligned} \tag{12}$$

sendo (a_1, \dots, a_{21}) os parâmetros do polinômio de Brown.

No modelo de Ebner, assim como em outros modelos como Grün e Mauelshagen (Murai et al., 1984), os coeficientes expressam de forma implícita as correções aos efeitos sistemáticos presentes no processo de formação da imagem. Já no modelo de Brown, o polinômio foi desenvolvido de forma a expressar a realidade física dos efeitos. Como exemplo, pode-se verificar que os coeficientes a_{16} , a_{17} e a_{18} correspondem, respectivamente, aos parâmetros k_1 , k_2 e k_3 da distorção radial simétrica. Murai et al. (1984) verificaram, por meio de experimentos de calibração terrestre com parâmetros adicionais, que modelos físicos, como o de Brown e modelos que descrevem a distorção das lentes, mostraram melhor acurácia que modelos polinomiais, tais como o de Ebner, Grün e Mauelshagen.

Os modelos com parâmetros adicionais são usados também nos modernos sistemas digitais de aquisição de imagens. Kornus et al (2006) apresentaram testes de calibração com o sistema DMC (*Digital Mapping System*) da *Z/I Imaging*. Nestes testes verificou-se que o uso de quatro conjuntos de parâmetros adicionais, sendo um conjunto por câmara da plataforma de coleta, possibilitou uma melhor acurácia na componente

altimétrica em cerca de 2,5 vezes e correções na ordem de 1,5 pixels nas bordas das imagens. Quando foi testado apenas 1 conjunto de parâmetros adicionais para o sistema não houve melhoria alguma nos resultados. Isso indicou que cada sistema óptico da plataforma de coleta tem um comportamento específico, necessitando de um conjunto de parâmetros para cada câmara.

Gruber e Ladstadter (2006) apresentaram testes de calibração e georreferenciamento direto com o sistema ULTRACAM da *Vexcel/Microsoft*. Com os resultados apresentados verificou-se que a introdução de parâmetros adicionais ao ajustamento em bloco proporcionou uma melhoria na acurácia vertical na ordem de 2,7 vezes. Além disso, os resíduos das coordenadas de imagem reduziram cerca de 2,3 vezes com o uso dos parâmetros adicionais.

Há também modelos que expressam de forma explícita os parâmetros de orientação interior, como é o caso do modelo de lentes, presente no módulo de aerotriangulação do software LPS (*Leica Photogrammetry Suite*). Este software dispõe também dos modelos polinomiais de Bauer, Jacobsen, Ebner e Brown. Mais detalhes destes modelos podem ser consultados diretamente no manual do usuário do software LPS (LEICA PHOTOGRAMMETRY SUITE PROJECT MANAGER, 2006).

O modelo de lentes do software LPS expressa somente a distorção radial simétrica, sem considerar os outros efeitos residuais. Este tipo de modelo pode ser usado em câmaras digitais para absorver os erros de distorção das lentes, já que os erros de afinidade são muito pequenos, e o efeito de distorção descentrada em lentes de alta qualidade não é significativo. Conforme destaca Fraser *apud* Clarke e Fryer (1998)⁴, deve-se ter cuidado com o uso indiscriminado de parâmetros adicionais para não afetar a qualidade da solução do ajustamento, sendo que em alguns casos não há informações geométricas suficientes para separar os efeitos dos parâmetros a serem determinados.

Em geral, nos modelos com parâmetros adicionais, a distância focal e as coordenadas do ponto principal são fixadas a partir de valores pré-calibrados, e não são

⁴ FRASER, C. S. Film unflatness effects in analytical non-metric photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 24(5), 1982. pp 156–166.

tratados como incógnitas no ajustamento. Isto porque, conforme já discutido, há efeitos de correlação entre estes parâmetros e as coordenadas do centro perspectivo da câmara.

Estes efeitos de correlação podem ser contornados se houver uma variação significativa da altitude dos pontos imageados, se for adotado o uso de fotografias convergentes, a realização de faixas de vôos cruzadas ou; o uso de sensores GPS/INS para a determinação acurada das posições do centro perspectivo da câmara (WOLF e DEWITT, 2000).

O uso do GPS e do sistema inercial durante a coleta das imagens simplifica o processo de ajustamento com parâmetros adicionais, uma vez que estes sistemas fornecem as informações confiáveis de posição e orientação da câmara nos instantes das exposições fotográficas. Os erros de deriva do sistema inercial (Capítulo IV), assim como os deslocamentos entre os sensores (câmara-GPS-INS) na plataforma de coleta, podem ser também tratados como parâmetros adicionais no ajustamento em bloco.

CAPÍTULO IV

GEORREFERENCIAMENTO DIRETO

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Segundo Skaloud (1999), o termo *georreferenciamento* pode ser definido como o processo de se obter a posição, atitude (orientação) e velocidade do objeto no espaço de tempo. Quando estas informações são obtidas diretamente por meio de sensores embarcados, o termo *georreferenciamento direto* é usado.

No contexto da Fotogrametria, tem-se o georreferenciamento de imagens, no qual os parâmetros de orientação exterior (posição e orientação) da câmara em cada exposição fotográfica devem ser conhecidos. Usualmente, se utiliza pontos de terreno com coordenadas conhecidas (pontos de controle) para o georreferenciamento de imagens aéreas, contudo esta abordagem incrementa os custos e o tempo de processamento no projeto fotogramétrico.

Nos últimos anos, houve uma crescente utilização de receptores GPS a bordo de plataformas aerotransportadas para a determinação das sucessivas posições do centro perspectivo da câmara nos instantes das tomadas das fotografias. O uso do GPS pode reduzir, mas não eliminar a necessidade de pontos de controle no projeto fotogramétrico.

Uma vez que o uso do GPS embarcado não elimina a necessidade de pontos de controle, a integração entre o GPS e sensores inerciais tornou-se o foco das pesquisas na área de aerolevanteamento. O sistema de navegação inercial fornece informações de posição, velocidade e atitude da plataforma por meio de medidas de variações angulares e acelerações e, com o GPS integrado, há um aumento da confiabilidade e acurácia do levantamento, em virtude da alta precisão posicional do GPS.

Uma forma alternativa para a determinação dos ângulos de atitude de uma plataforma rígida é a utilização de um arranjo de receptores GPS. Nesta configuração, três ou mais antenas GPS são esparsamente posicionados sobre a plataforma para a coleta dos dados. A atitude da plataforma é determinada pela orientação do sistema de coordenadas da plataforma com respeito a um sistema de coordenadas de referência. Na determinação de atitude com o GPS, o sistema de referência é usualmente um sistema de coordenadas local. Maiores detalhes sobre esta forma de estimação da orientação de plataformas podem ser encontrados em Lu (1995).

Em Fotogrametria, o georreferenciamento direto de imagens possibilita algumas vantagens sobre a abordagem tradicional de orientação de imagens, como (TOMMASELLI, 2001):

- A determinação mais rápida dos parâmetros de orientação exterior, pois a etapa de aerotriangulação pode ser eliminada ou inteiramente automatizada;
- A observação de fenômenos variantes no tempo, que necessitam de uma avaliação imediata (Inundações, vestígios de petróleo, desmatamento, etc);
- A eliminação das 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;
- O controle automático dos disparos da câmara;
- Mesmo se for empregada a Aerotriangulação, os algoritmos de correlação funcionarão com melhor rendimento.

Com esta breve introdução, os tópicos seguintes deste capítulo apresentam as definições, características e modelos do sistema de navegação inercial e do sistema de posicionamento por satélites (GPS), enfatizando a integração destes sistemas a fim de compor o conceito do georreferenciamento direto.

4.2 SISTEMA DE NAVEGAÇÃO INERCIAL

4.2.1 Considerações iniciais

Um sistema inercial é composto fundamentalmente por uma unidade de medida inercial (IMU) e um processador de navegação (PN), como ilustra a Figura 23. A unidade inercial é composta por três acelerômetros, que medem as forças específicas exercidas sobre a IMU, compreendendo acelerações lineares e gravidade, com respeito a um referencial inercial; três giroscópios (ou giros) que medem variações angulares sofridas pela IMU; além de sensores auxiliares para a calibração.

O processador de navegação recebe os dados inerciais e realiza duas funções: primeiro, é realizado um alinhamento inicial, durante o qual ele estabelece uma posição e uma orientação inicial usando o vetor de gravidade local como referência vertical e o norte geográfico como azimute de referência. Tendo estabelecido o sistema de navegação de referência (ao nível local), o PN resolve as equações de movimento a partir da força específica e das razões angulares medidas, para gerar as soluções de posição, velocidade e atitude na razão de amostragem do sensor.



Figura 23: Unidade de medida inercial Litton LN-200 e processador de navegação (COLOMINA, 2002).

A principal vantagem do INS é que, uma vez alinhado, ele navega de forma autônoma, sem a necessidade de informações externas. Por outro lado, o sistema inercial possui erros posicionais que crescem com o tempo, ocasionados por erros de alinhamento e erros internos dos sensores.

4.2.2 Breve histórico

Segundo Scherzinger (2001), o sistema de navegação inercial (INS) foi inicialmente demonstrado em 1949 por C. S. Draper e, desde então, tem sido usado em aplicações militares e comerciais, cujos levantamentos independem de interferências externas e sinais de origem. O INS fornece uma solução completa de navegação, que inclui informações de posição, velocidade, atitude, acelerações e velocidades angulares da plataforma que está sendo navegada.

Esta tecnologia foi primeiramente desenvolvida para aplicações militares no início de 1968. A comunidade de Geodésia iniciou os trabalhos com estes sensores durante a década de 70, quando também surgiram os sistemas inerciais *strapdown*, com giroscópios a laser e computadores de alto desempenho, capazes de processar uma grande quantidade de dados de navegação (SCHERZINGER, 2001).

O advento do GPS introduziu novas possibilidades na área de levantamentos. O GPS fornece medidas de posição e velocidade, que são integradas às medidas INS por meio do Filtro de Kalman, para a modelagem dos erros inerentes ao INS e promover a melhor solução de trajetória. Esta integração GPS/INS permitiu a caracterização do conceito de georreferenciamento direto, para aplicações em Fotogrametria e Sensoriamento Remoto.

Os primeiros experimentos foram realizados pelas Universidades de Calgary e do Estado de Ohio (OSU) no fim da década de 80 e início da década de 90. Alguns sistemas experimentais foram colocados em prática, essencialmente *scanners* multiespectrais integrados a sensores de orientação INS a bordo de aeronaves. Estes sistemas demonstraram o conceito do georreferenciamento direto, mas foram impraticáveis devido a grande dimensão e ao alto custo do INS. Além disto, os giros e acelerômetros introduziram erros nos parâmetros de orientação ao longo da trajetória, que comprometeram a acurácia da orientação das imagens.

O georreferenciamento direto tornou-se possível com o posicionamento GPS preciso e a chegada dos sistemas inerciais *strapdown*, para aplicações táticas (mísseis guiados) e de navegação. Com a menor dimensão foi possível montar a unidade de medida

inercial próxima ao centro perspectivo da câmara, estratégia adotada pela *Z/I imaging* (câmara DMC) e pela *Leica Geosystems* (câmara ADS40).

A Applanix foi a primeira organização a comercializar um sistema GPS/INS especificamente para aplicações de aerolevantamento (1996, POS/AV – *Position and Orientation System for Airborne Vehicles*). Desde então, foi possível realizar medidas diretas dos parâmetros de orientação exterior de cada foto adquirida, para auxiliar, ou mesmo eliminar a etapa de fototriangulação de imagens (SCHERZINGER, 2001).

4.2.3 Classificação

Tomando-se como base o tipo de plataforma, os sistemas de navegação inercial podem ser categorizados em (KOCAMAN, 2003; KING e FRIN, 1998):

- *Gimballed platform (plataforma mecânica)*, na qual a direção dos eixos de medição é estabilizada no espaço por meio de uma plataforma servo-controlada. Este tipo de sistema é de alta precisão, contudo são muito complexos do ponto de vista mecânico e, conseqüentemente, possuem um alto custo;
- *Strapdown platform (plataforma analítica)*: a direção dos eixos acompanha os movimentos do veículo e os movimentos angulares são continuamente medidos. Este tipo de sistema exige uma alta capacidade computacional para a determinação da orientação no espaço em tempo real. Uma vez que a ausência de complexas partes mecânicas permite a redução do peso e dimensão e, conseqüentemente, do custo, os sistemas *strapdown* são comumente usados para a navegação inercial de plataformas comerciais. Com isto, as definições e modelos apresentados no decorrer deste capítulo referem-se a este tipo de sistema.

Para melhor caracterizar os tipos de plataformas inerciais, a Figura 24 ilustra as plataformas *gimballed* e *strapdown*.

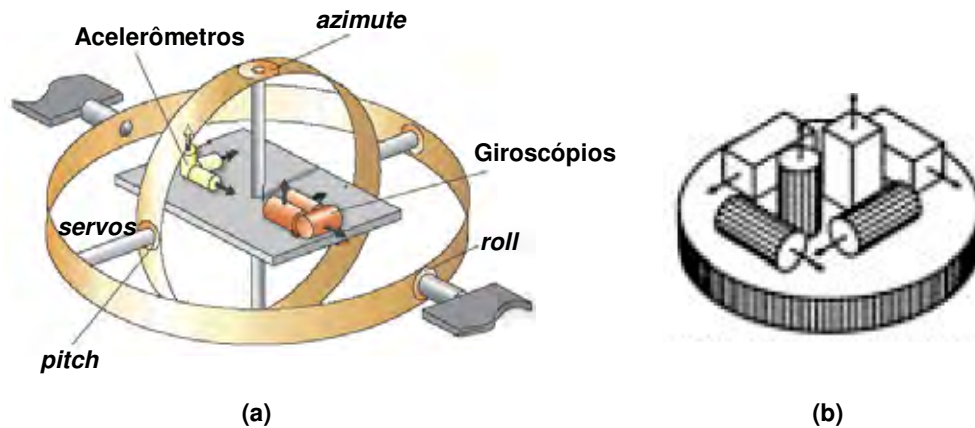


Figura 24: Unidades de medida inercial: (a) *gimballed*, (b) *strapdown* (KING e FRIN, 1998; KOKAMAN, 2003).

Em outra classificação, levando-se em conta a grandeza dos erros intrínsecos ao sistema, os sensores inerciais podem ser classificados em três grupos (SKALLOUD, 1999):

- *Estratégicos*: unidades inerciais de baixa precisão, com erros acentuados ao longo do tempo ($> 0,1^\circ/s$). São usados em levantamentos de curto período de tempo e necessitam de outras fontes de dados integrados (GPS) para a suavização dos erros internos do INS;
- *Táticos*: sistemas de custo médio (~U\$50.000) usados geralmente para a orientação de mísseis. Estes sistemas possuem custos inferiores aos sistemas de navegação devido ao curto período de tempo percorrido pela plataforma e, conseqüentemente, os erros internos não afetam significativamente a descrição de trajetória;
- *Navegação*: unidades inerciais de alto desempenho e custos elevados ($> U\$100.000$), usadas para navegação de alta precisão.

Como exemplo, a Tabela 6 apresenta as características de três sistemas inerciais disponíveis no mercado, que representam os três grupos classificados anteriormente: estratégico (*Motion Pak II*), tático (*LN-200*) e de navegação (*iNAV-FJI-IDEG-001*). Trata-se de sensores em estudo por Wis et al (2004).

Tabela 6: Características de três sistemas inerciais.

Modelo	Motion Pak II	LN-200	iNAV-FJI-IDEG-001
Fabricante	Systron Donner	Northrop Grumman	iMAR Navigation
Giroscópios			
Erro	5°/s	1°/h	0,003°/h
Acelerômetros			
Erro (μg)	200.000	300	< 5
Razão de dados (Hz)	32	400	1500
Sincronismo	não	sim	Sim
Dimensão (cm)	12,8 x 11,2 x 11,6	8,9 x 8,9 x 8,5	20,0 x 20,0 x 20,0
Peso (kg)	1,2	0,8	5,5
Desempenho			
roll, pich (° - RMS)	< 0,5	0,02	< 0,01
yaw (° - RMS)	< 1	0,01	< 0,01
Custo aproximado (U\$)	3.000,00	30.000,00	150.000,00
Imagem			

4.2.4 Equações de Observação

Um sistema de navegação inercial é um sistema autônomo de posicionamento e orientação, que mede acelerações lineares e variações angulares ao longo da trajetória (Figura 25). A teoria é baseada na lei de Newton onde a força específica medida \vec{f}_b de um movimento em relação a um sistema de coordenadas inercial pode ser obtido pela combinação das acelerações lineares do sistema \vec{a} e a aceleração da gravidade \vec{g} . Com o modelo de gravidade conhecido pode-se calcular as acelerações lineares, a partir da força específica medida (CRAMER, 1997).

$$\vec{a} = \vec{f}_b + \vec{g} \quad (13)$$

Integrando a aceleração linear (\vec{a}) em relação ao tempo tem-se a velocidade e, com a segunda integração, da velocidade em relação ao tempo, obtém-se a informação de posição. Da mesma forma, as variações angulares são integradas em relação ao tempo para se obter as informações de atitude. Nesta técnica de navegação necessita-se de valores iniciais para as grandezas (posição, velocidade e atitude), que são obtidos antes

da realização da coleta, quando a plataforma ainda se encontra estável (inicialização e alinhamento do sistema).

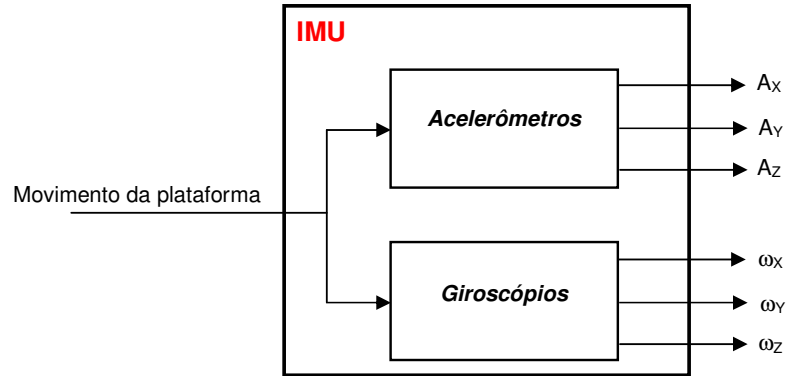


Figura 25: Unidade de medida inercial.

As observações dos acelerômetros numa IMU, considerando os ruídos observacionais, podem ser modeladas de diversas formas. Schwarz e El-Sheimy (2000) apresentam um modelo que considera a soma dos diferentes fatores de erros presentes nas observações:

$$\vec{l}_f = \vec{f}_b + \vec{b} + (S_1 + S_2) * \vec{f}_b + N_f * \vec{f}_b + \vec{\gamma} + \vec{\delta g} + \vec{\varepsilon}_f \quad (14)$$

onde:

l_f : vetor de observação dos acelerômetros;

f_b : força específica;

b : desvio sistemático das medições dos acelerômetros (*bias*);

S_1 : fator de escala dos erros lineares;

S_2 : fator de escala dos erros não lineares;

N_f : matriz com os desvios de ortogonalidade dos eixos dos acelerômetros;

γ : gravidade normal;

δg : distúrbio da gravidade no ponto (diferença entre g e γ);

ε_f : ruídos observacionais dos acelerômetros.

De forma análoga, as observações dos giroscópios podem ser representadas por:

$$\vec{l}_\omega = \vec{\omega} + \vec{d} + S * \vec{\omega} + N_\omega * \vec{\omega} + \vec{\varepsilon}_\omega \quad (15)$$

onde:

l_ω : vetor de observação dos giroscópios;

ω : velocidade angular;

d : desvio sistemático das medições dos giroscópios;

s : fator de escala;

N_ω : matriz com os desvios de ortogonalidade dos eixos dos giroscópios;

ε_ω : ruídos observacionais dos giroscópios.

4.2.5 Referenciais e transformações usados na navegação inercial

Na navegação inercial estão envolvidos diversos sistemas de referência, conforme ilustra a Figura 26 (SCHWARZ e EL-SHEIMY, 2000):

- **Sistema quase inercial (i):** num sistema de referência considerado inercial, as leis dinâmicas de Newton são válidas, nas quais o sistema de referência é considerado sem rotações e acelerações. As medidas realizadas pelos giroscópios e acelerômetros são referenciadas a este sistema considerado inercial (i).
 - Origem: centro de massa da Terra;
 - Eixo Z_n : coincide com o eixo de rotação da Terra;
 - Eixo X_n : na direção do equinócio vernal médio;
 - Eixo Y_n : torna o sistema dextrogiro.
- **Sistema Geocêntrico (e):**
 - Origem: centro de massa da Terra;
 - Eixo Z_e : coincide com o eixo de rotação da Terra;

- Eixo X_e : aponta para o meridiano médio de Greenwich;
- Eixo Y_e : torna o sistema dextrogiro.
- **Sistema de navegação (n):**
 - Origem: local;
 - Eixo X_n : torna o sistema dextrogiro;
 - Eixo Y_n : direção norte;
 - Eixo Z_n : normal ao elipsóide de referência.
- **Sistema do sensor inercial, ou da plataforma (b):**
 - Origem: centro do conjunto de sensores da IMU;
 - Eixo Y_b : direção da trajetória da plataforma;
 - Eixo X_b : direção transversal;
 - Eixo Z_b : direção vertical à plataforma para cima.

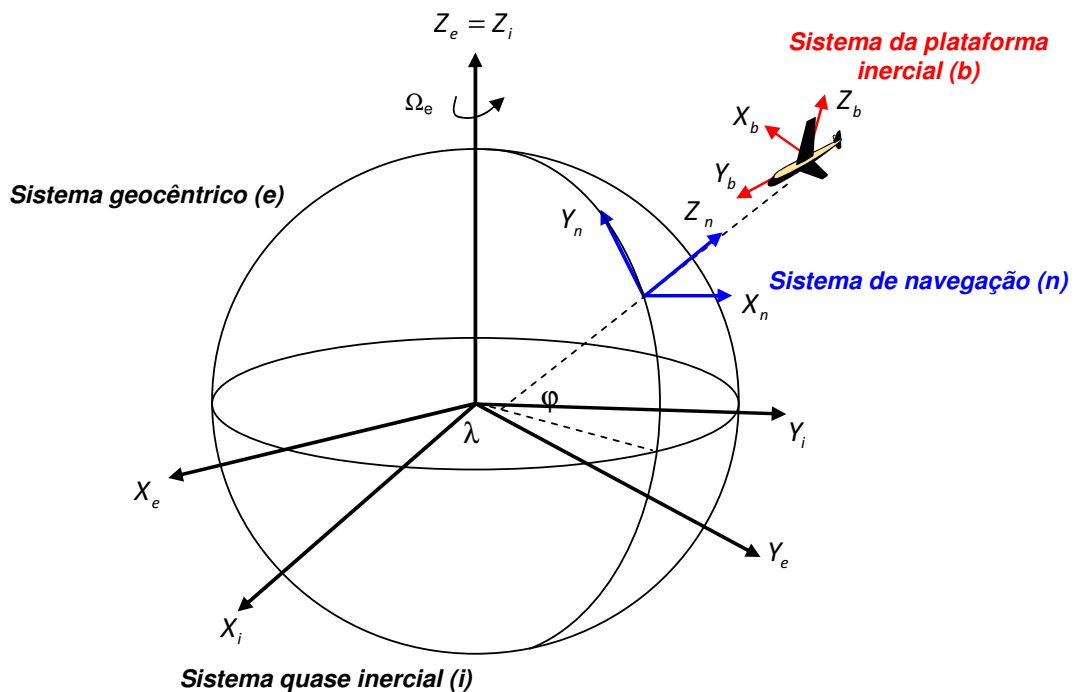


Figura 26: Sistemas de Referência usados na navegação inercial (adaptado de SCHWARZ e EL-SHEIMY, 2000).

De acordo com Baumker e Heimes (2002), a navegação inercial é baseada em integrações contínuas de acelerações medidas pelos acelerômetros. Tais acelerações são medidas no **sistema do sensor inercial**, ou da plataforma, (**b – body frame**). Todavia, estas medidas e as correções devido à gravidade e outros efeitos, devem ser transformadas para um sistema de coordenadas local, denominado **sistema de navegação (n – navigation frame)**. A transformação entre estes sistemas é realizada por uma matriz de rotação, formada pelos ângulos de rotação *roll* (ϕ), *pitch* (θ) e *yaw* (ψ), interpretados como ângulos de navegação (Figura 28). Os ângulos de navegação e, conseqüentemente, a matriz de rotação são continuamente atualizados pelas medidas angulares dos giroscópios.

Os modelos matemáticos que estabelecem as relações entre os referenciais podem ser encontrados em Skaloud (1999) e Baumker e Heimes (2002).

4.2.6 Erros do INS

Devido a ruídos, fatores instrumentais e efeitos aleatórios, na navegação inercial há diversas fontes de erros que podem prejudicar a precisão do levantamento e, conseqüentemente, devem ser considerados. A Tabela 7 sumariza os principais tipos de erros do INS, destacando o grau magnitude destes erros na coleta.

Tabela 7: Erros no INS (OMERBASHICH, 2002).

Tipo de erro	Descrição	Magnitude
Erros de alinhamento	Erros em roll, pitch e heading	-
Acelerômetros: <i>Bias</i>	Deslocamento constante nos dados de saída dos acelerômetros	50 – 100 μg (1 $\mu\text{g} = 9,81 * 10^{-6} \text{ m/s}^2$)
Acelerômetros: erros de fator de escala	Resulta em um erro de aceleração proporcional a aceleração captada	75 – 200 ppm
Não-ortogonalidade dos eixos dos acelerômetros e giroscópios	Não-alinhamento nos eixos dos acelerômetros e giroscópios	5 – 25"
Giroscópios: <i>drift</i>	Erro devido às variações de temperatura	0,002 – 0,01°/h
Giroscópios: erros de fator de escala	Erros angulares proporcionados pelas variações de temperatura	< 10 ppm
Ruídos		0,002°/h

4.3 SISTEMA DE POSICIONAMENTO POR SATÉLITES - GPS

4.3.1 Considerações iniciais

O GPS (*Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global) é um sistema de posicionamento por rádionavegação desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (*DoD – Department of Defense*), para fins de navegação em aplicações militares. Contudo, pela alta acurácia proporcionada pelo sistema, uma gama de aplicações emergiu dos mais variados segmentos da comunidade civil, como: navegação, controle de frotas, agricultura, cadastro e posicionamento geodésico, classificado como levantamento de alta precisão.

O sistema era originalmente composto por vinte e quatro satélites (atualmente são 32 satélites) operacionais distribuídos em seis planos orbitais com um ângulo de cinquenta e cinco graus em relação ao Equador. Seu período de passagem é de doze horas siderais. Esta configuração permite que a qualquer hora e em qualquer lugar da superfície terrestre, ou próximo a esta, o usuário tenha à 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 (MONICO, 2000).

O princípio básico de navegação pelo GPS se baseia na medição de distâncias entre o receptor e os satélites. Conhecendo-se as coordenadas dos satélites num dado sistema de referência (WGS84 - *World Geodetic System* – 1984), é possível obter as coordenadas geocêntricas da antena do receptor no mesmo referencial. O uso de outros sistemas de referência é possível mediante a aplicação de modelos de transformações geométricas adequados.

Há diferentes técnicas para se determinar a posição de um ponto sobre a superfície terrestre. No caso do georreferenciamento direto de plataformas, alguns métodos de posicionamento são usados, como:

Posicionamento relativo convencional: deve-se dispor de no mínimo dois receptores GPS, ou então utilizar uma das estações de referência (Ex: RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) como estação base. Os métodos de posicionamento relativo podem ser: posicionamento estático, estático rápido, semicinemático ou cinemático. No posicionamento cinemático, adotado na orientação direta do sensor, um dos receptores ocupa uma estação de coordenadas conhecidas (base) e o outro rastreia as posições de interesse. Neste caso, as informações de coordenadas precisas são obtidas após o processamento dos dados.

RTK (Real Time Kinematic – Posicionamento Cinemático em Tempo Real). Este tipo de técnica baseia-se no posicionamento em tempo real de uma estação móvel a partir de correções diferenciais (transmitidas via link de rádio) geradas a partir de uma ou mais estações de referência. O emprego das correções diferenciais proporciona uma minimização da influência dos erros atuantes na estação móvel, fundamentalmente os erros do relógio, das efemérides e atmosféricos (Ionosfera e Troposfera). Um fator limitante deste método é o comprimento da linha de base, em geral inferior a 10 km, para manter a correlação espacial dos erros. Deste modo, diversos trabalhos estão sendo realizados para o estabelecimento de redes ativas, de modo que se tenham disponíveis estações de referência próximas as áreas de projeto.

DGPS (Differential GPS): baseia-se na utilização de um receptor estacionário (base) em uma estação com coordenadas conhecidas. Nesta estação, o processamento dos dados é realizado mediante o método de posicionamento por ponto, no qual se permite calcular correções posicionais (ΔX , ΔY , ΔZ) para esta base. Tais correções são possíveis de serem obtidas, pois as coordenadas da estação base são conhecidas. Se a estação base estiver localizada nas proximidades da região de levantamento, há uma forte correlação entre os erros calculados na estação base e os erros da estação móvel. Sendo assim, as correções podem ser enviadas à estação móvel por meio de link de rádio para corrigir posições ou observações coletadas.

PPP (Posicionamento por Ponto Preciso): como o próprio nome diz, trata-se de um método de posicionamento por ponto, sendo que neste caso são empregadas as efemérides precisas e as correções dos relógios com alta precisão (fornecidas pelo *IGS - International GNSS Service*), com dados da fase da onda portadora. Monico (2000)

destaca que atualmente, pesquisas vêm sendo realizadas, inclusive com serviços já disponibilizados, no que concerne ao PPP em tempo real e PPP *on-line*, nos quais correções diferenciais em tempo real são geradas e disponibilizadas aos usuários via serviços de email e FTP.

Para maiores detalhes sobre os métodos de posicionamento apresentados, consultar Monico (2000) e Seeber (2003).

Em aplicações de georreferenciamento direto em aerolevanteamento, o posicionamento relativo é bastante usado. Entretanto, com os constantes avanços nos métodos de posicionamento em tempo real, que possuem vantagens da disponibilidade instantânea de dados precisos, os métodos de RTK e do sistema OMNISTAR estão sendo considerados nos sistemas mais modernos.

O OMNISTAR consiste em um serviço de abrangência global para o fornecimento de dados de correção GPS via satélites em tempo real. Este serviço conta com uma rede de mais de 70 estações distribuídas sobre o globo terrestre. São três categorias de serviços disponibilizados: VBS, com precisão sub-métrica; HP, com precisão na ordem de 10-15 cm e; XP, que fornece dados com qualidade melhor que 10 cm de precisão. Maiores detalhes podem ser obtidos no *website* do serviço (<http://www.omnistar.com/>).

4.3.2 Equações básicas de observação GPS

As observações básicas de um receptor GPS são representadas pelas equações referentes à pseudodistância a partir do código (eq. 16) e pela fase da onda portadora (eq. 17), conforme apresentadas em Schwarz e El-Sheimy (2000) e Monico (2000):

$$PD = \rho + c[dT - dt] + dp + T + I + m_{PD} + \varepsilon_{PD} \quad (16)$$

$$\Phi = \rho + c[dT - dt] + dp + T - I + \lambda N + m_{\Phi} + \varepsilon_{\Phi} \quad (17)$$

onde:

PD : pseudodistância, que corresponde à diferença de tempo entre a transmissão do sinal no satélite e o tempo de recebimento no receptor GPS, multiplicado pela velocidade da luz no vácuo;

Φ : fase da onda portadora: diferença entre a fase do sinal do satélite, recebido no receptor, e a fase do sinal gerado no receptor;

ρ : distância geométrica entre o satélite e o receptor;

c : velocidade da luz no vácuo;

dT : erro do relógio do receptor;

dt : erro do relógio do satélite;

dp : erro de órbita;

T : erro devido à refração da troposfera;

I : erro devido à refração da ionosfera;

m_{pD} : erro devido ao efeito do multi-caminho na medida de pseudodistância;

m_{Φ} : erro devido ao efeito do multi-caminho na fase da onda portadora;

ε_{pD} : erro da medida de pseudodistância;

ε_{pD} : erro da fase da onda portadora;

N : ambigüidade: número de ciclos inteiros completos entre o satélite e o receptor.

Os parâmetros incógnitos apresentados nas equações 18 e 19 (erros atmosféricos e dos relógios) podem ser minimizados utilizando a combinação de observáveis por meio da abordagem de duplas diferenças ($\nabla\Delta$).

$$\nabla\Delta PD = \nabla\Delta\rho + \nabla\Delta T + \nabla\Delta dp + \nabla\Delta I + \nabla\Delta m_p + \varepsilon_{\nabla\Delta PD} \quad (18)$$

$$\nabla\Delta\Phi = \nabla\Delta\rho + \lambda\nabla\Delta N + \nabla\Delta dp + \nabla\Delta T - \nabla\Delta I + \nabla\Delta m_{\Phi} + \varepsilon_{\nabla\Delta\Phi} \quad (19)$$

4.3.3 Erros nas observáveis GPS

As observáveis GPS, assim como observações em quaisquer processos de medidas, estão sujeitas a erros. Os principais erros associados ao GPS são apresentados na Tabela 8. A descrição completa, tal como, os modelos e formas de atenuação dos erros nas observáveis GPS podem ser encontrados em Monico (2000).

Tabela 8: Erros nas observáveis GPS (FORTES, 2004; KOKAMAN, 2003; MONICO, 2000).

Fonte	Tipos de erros	Descrição	Magnitude
Satélite	Erro de órbita	Erros nas efemérides dos satélites	2 m
	Erro do relógio	Precisão em relação sistema de tempo GPS	2,1 m = 7 ns
	Disponibilidade seletiva	Degradação do sinal GPS (desativada em 2000)	120 m
Propagação do sinal	Refração troposférica	Camada da atmosfera até aproximadamente 50 km	2,3 m (Componente seca) 0,8 m (Componente úmida)
	Refração Ionosférica	Camada da atmosfera localizada acima da troposfera	33 m
Receptor	Multicaminho	Reflexão dos sinais GPS a partir de objetos próximos ao receptor	< 5 m (código) < 5 cm (fase)
	ruídos		< 3 m (código) < 2 mm (fase)

4.4 INTEGRAÇÃO GPS/INS

4.4.1 Considerações iniciais

O sistema de posicionamento GPS é baseado em medidas de sinais de rádio transmitidos pelos satélites e recebidos por receptores GPS, para a determinação de informações posicionais que atendam ao levantamento requerido. Todavia, os sinais GPS sofrem perturbações e interrupções que afetam a qualidade das medidas realizadas.

Por outro lado, o sistema de navegação inercial (INS) utiliza sensores (acelerômetros e giroscópios) para realizar medidas de acelerações e variações angulares e promover informações de navegação, sem interferências externas. Contudo, a qualidade das medidas providas pelos sensores inerciais é degradada ao longo do tempo, devido aos erros internos do INS (Tópico 4.2.6).

Neste contexto, a integração das informações providas pelos sensores GPS e INS aumenta a acurácia final do levantamento, uma vez que são sistemas complementares. Os dados INS são usados para suavizar os ruídos de observação do GPS e complementar o rastreamento do GPS fornecendo as informações de posição e de velocidade quando há perda de sinal do receptor, ou mesmo, quando a visibilidade dos satélites é insuficiente. Por

outro lado, a alta estabilidade do GPS é apropriada para compensar os erros internos do INS acumulados ao longo do tempo.

Para sintetizar, a Figura 27 mostra as características particulares de cada sistema, com os aspectos positivos e as deficiências dos sensores, e apresenta as vantagens da integração GPS/INS neste panorama.

INS	GPS
<ul style="list-style-type: none"> ○ Alta acurácia em posição e velocidade em curto espaço de tempo; ○ Informações angulares acuradas; ○ Acurácia do sistema decresce com o tempo; ○ Alta freqüência de dados; ○ Sistema autônomo, que independe de sinais externos; ○ Afetado pela gravidade. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Alta acurácia em posição e velocidade em longo espaço de tempo; ○ Informações angulares ruidosas; ○ Acurácia do sistema uniforme, independente do tempo; ○ Baixa freqüência de dados; ○ Sistema não-autônomo, que depende de sinais externos (possibilidade de perdas do sinal); ○ Não é sensível à gravidade.
<p>GPS/INS</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Alta acurácia em posição e velocidade; ○ Determinação precisa de atitude; ○ Alta freqüência de dados; ○ Dados de navegação durante a perda de sinal GPS ○ Detecção e correção de perdas de ciclos; ○ Determinação do vetor da gravidade. 	

Figura 27: Vantagens da integração GPS/INS (SKALLOUD, 1999).

4.4.2 Aplicações

Com a crescente utilização dos sistemas GPS e INS integrados, algumas aplicações potenciais surgiram nas mais diversas áreas de atuação, onde cada área do

conhecimento possui uma necessidade particular de acurácia e disponibilidade dos dados, como (LIMA et al, 2001):

- *Posicionamento preciso (geodésico)*: neste contexto pode-se utilizar a integração GPS/INS para a realização de levantamentos cinemáticos em ambientes onde ocorrem perdas de sinais GPS, como em regiões urbanas e florestas, uma vez que os sistemas inerciais realizam observações sem interferências externas;
- *Levantamentos batimétricos*: estes levantamentos são frequentemente realizados com o apoio do GPS, que embora não tenha obstruções para as perdas de sinais, podem sofrer influências de multi-caminho. Neste caso, podem ser usados os dados INS para a detecção deste efeito.
- *Levantamentos gravimétricos*: são utilizados sistemas GPS/INS de alta precisão para a determinação da gravidade (SCHWARZ, 2000) e do geóide (PARÉS et al, 2005);
- *Levantamentos fotogramétricos*: o sistema GPS/INS é usado para a determinação direta dos parâmetros de orientação exterior (posição e atitude) das imagens adquiridas em vôo (MOSTAFA e SCHWARZ, 2001; CRAMER et al, 1999; MOSTAFA e HUTTON, 2001). A integração GPS/INS também é usada no georreferenciamento direto de imagens adquiridas em veículos terrestres, nos chamados sistemas de mapeamento móvel (EL-SHEIMY, 2000);

4.4.3 Integração das observações

4.4.3.1 Sincronismo e amostragem de dados

Para que as observações providas dos sistemas GPS e INS possam ser integradas, torna-se de fundamental importância o sincronismo entre os sistemas, uma vez que erros de sincronização afetam diretamente a determinação de trajetória do veículo em translação e movimento angular. O sincronismo entre os sistemas pode ser realizado com a utilização de sinais específicos gerados pelos instrumentos ou por mensagens contendo informações de tempo (LIMA, 2000).

Na integração de dados, utiliza-se o tempo GPS como referência, e como se tratam de sistemas com diferentes taxas de aquisição (amostragem), torna-se necessário o uso de técnicas de interpolação.

Lima (2000) destaca que há diferentes taxas de amostragem de dados nos instrumentos de medição (GPS e INS), e isto deve ser levado em conta na coleta. Isto porque quanto maior a taxa de amostragem dos sensores inerciais maior será a densidade de ruídos nas observações. Além disto, uma taxa de amostragem elevada requer uma maior capacidade de armazenamento dos dados coletados. Portanto, dependendo da velocidade, tempo e tipos de manobras realizadas durante a coleta, pode-se estabelecer uma taxa de amostragem menor que os valores máximos definidos nos instrumentos.

4.4.3.2 Processamento dos dados

As observações GPS e INS são processadas em um algoritmo de integração, em geral o Filtro de Kalman, no qual são estimados os erros das medidas. Além disto, as variáveis de estado do GPS e do INS (descritas no fluxograma da Figura 28) são estimadas por meio de procedimentos recursivos.

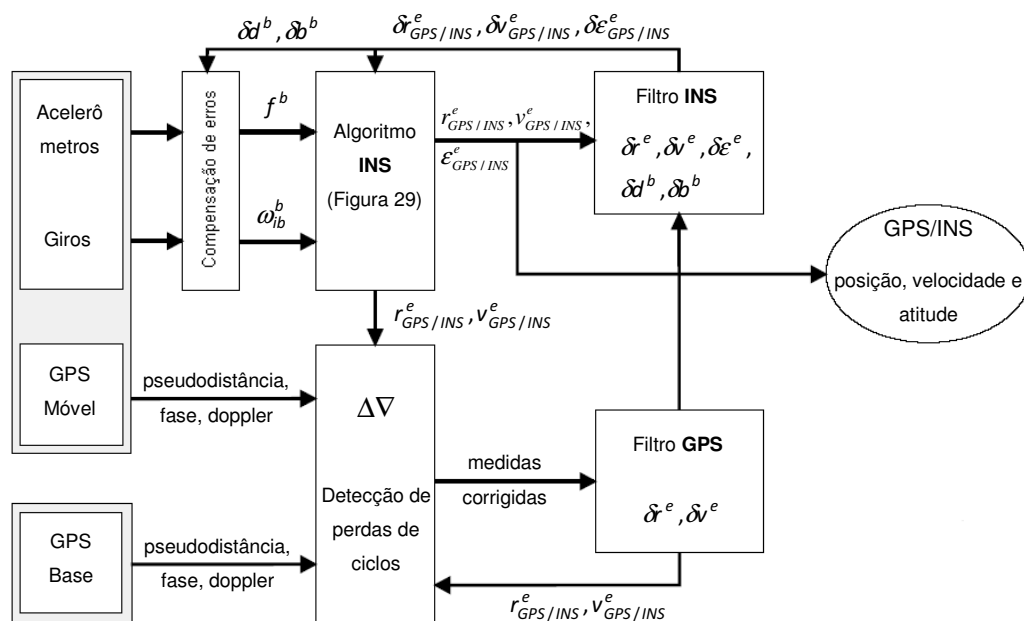


Figura 28: Filtro de Kalman para a integração GPS/INS (Adaptado de Cramer, 1997).

De acordo com Cramer (1997), há duas abordagens para a filtragem dos dados: centralizada e descentralizada. Na primeira, as observações do GPS e do INS são processadas em conjunto num único filtro, onde a integração é feita a partir dos dados brutos dos sistemas. Esta abordagem é considerada direta do ponto de vista do processamento, contudo não é flexível para a combinação com outros sensores, visto que o filtro principal tem que ser reimplementado.

Já no filtro descentralizado, os dados dos sensores GPS e INS são pré-processados em filtros locais e seus resultados são combinados no filtro principal. Com isto, esta abordagem é mais flexível com outros sensores, uma vez que as novas observações podem ser adicionadas sem modificar a estrutura do filtro principal. Além disto, o sistema torna-se mais confiável, uma vez que erros provenientes de diferentes sistemas podem ser detectados e corrigidos antes da integração dos dados.

Conforme apresentado na Figura 28, o Filtro de Kalman descentralizado para a integração GPS/INS é baseado em dois filtros, que funcionam de modo paralelo: um filtro para o processamento dos dados GPS e outro (principal) para os dados INS.

As duplas diferenças de pseudodistância e de fase formam os vetores de observação para o filtro GPS. Neste filtro, os seis erros de estado GPS são estimados: posição ($\delta r_x^e, \delta r_y^e, \delta r_z^e$) e velocidade ($\delta v_x^e, \delta v_y^e, \delta v_z^e$). As medidas de posição e velocidade estimadas no filtro GPS são usadas para atualizar os dados no filtro INS. O vetor estado deste filtro principal consiste de quinze erros de estado INS: nove erros de navegação (posição: $\delta r_x^e, \delta r_y^e, \delta r_z^e$, velocidade: $\delta v_x^e, \delta v_y^e, \delta v_z^e$ e não-alinhamento: $\delta e_x^e, \delta e_y^e, \delta e_z^e$) e seis erros que descrevem os erros internos do INS, dados no sistema do sensor inercial (b): acelerômetros ($\delta b_x^b, \delta b_y^b, \delta b_z^b$) e giroscópios ($\delta a_x^b, \delta a_y^b, \delta a_z^b$). Os erros de estado atualizados são usados para corrigir os dados brutos INS e alimentar o algoritmo INS, apresentado na Figura 28. Neste ponto, os dados de saída do algoritmo são gerados a partir da integração de informações GPS/INS. As medidas de posição e velocidade são usadas para detectar e corrigir possíveis perdas de ciclos do GPS (CRAMER, 1997).

A orientação exterior de um sensor (câmara) é obtida ao se considerar os deslocamentos e rotações entre o GPS, INS e câmara, conforme apresentado na próxima seção (4.5).

Conforme já descrito, a maioria dos sistemas de coleta utiliza o Filtro de Kalman para integrar os dados INS/GPS. Apesar de amplamente usado, El-Sheimy et al (2003) relatam que o método de estimação baseado na filtragem Kalman tem algumas desvantagens com respeito ao volume de cálculos, presença de ruídos e observabilidade de diferentes estados. O filtro trabalha de forma eficiente em certos modelos pré-definidos, ou seja, se o filtro é exposto a dados de entrada que não se ajustam ao modelo, ele não promove uma solução confiável. Além disto, durante as perdas de sinais do GPS, o Filtro de Kalman fornece uma predição pobre para a navegação INS.

Há outros métodos usados para o processamento dos dados GPS/INS, conforme apresentam El-Sheimy et al (2003), que utiliza uma metodologia baseada na transformação de Wavelet para a integração GPS/INS.

4.5 GEORREFERENCIAMENTO DIRETO DE IMAGENS AÉREAS

4.5.1 Modelo matemático

A formulação matemática que relaciona os sistemas de coordenadas da imagem e de terreno é descrita pela condição de colinearidade, expressa em sua forma inversa por (MOSTAFA e SCHWARZ, 2001; CRAMER, 1997):

$$\vec{r}_p^m = \vec{r}_{cp}^m + \alpha C_c^m \vec{r}_p^c \quad (20)$$

sendo:

$$\vec{r}_p^m = \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix}_m : \text{vetor de coordenadas do ponto } p \text{ no referencial do espaço objeto (} m -$$

referencial de mapeamento);

$$\vec{r}_{cp}^m = \begin{bmatrix} X_{cp} \\ Y_{cp} \\ Z_{cp} \end{bmatrix}_m : \text{vetor de coordenadas do centro perspectivo da câmara (CP) no referencial do}$$

espaço objeto;

α : fator de escala;

C_c^m : matriz de rotação dada em função dos ângulos de rotação (ω, φ, κ), que relacionam o sistema fotogramétrico ao sistema do espaço objeto (equação 4).

$$\vec{r}_p^c = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ -f \end{bmatrix}_c : \text{vetor de coordenadas do ponto no sistema fotogramétrico (c – referencial da}$$

câmara).

Uma vez que a câmara, a antena GPS e o sensor inercial (INS) não ocupam a mesma posição no espaço, a equação 42 pode ser modificada para considerar as diferenças de posição e orientação entre os sensores:

$$\vec{r}_p^m = (\vec{r}_{GPS/INS}^m + C_b^m a^b) + \alpha (C_b^m C_c^b) \vec{r}_p^c \quad (21)$$

onde:

$$\vec{r}_{GPS/INS}^m = \begin{bmatrix} X_{GPS/INS} \\ Y_{GPS/INS} \\ Z_{GPS/INS} \end{bmatrix}_m : \text{vetor de coordenadas do centro do INS no referencial do espaço objeto;}$$

C_b^m : matriz de rotação entre o sistema do sensor inercial b e o referencial do espaço objeto (m), definida por:

$$C_b^m = C_c^m * (C_c^b)^T, \quad (22)$$

$$C_c^b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} : \text{matriz de rotação (ortogonal) entre o sistema fotogramétrico (c) e o}$$

sistema do sensor inercial b .

$a^b = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix}_b$: vetor de deslocamento entre o centro do sensor inercial e o centro perspectivo

da câmara *CP*, que pode ser determinado por medidas diretas ou técnicas topográficas;

Uma vez que o INS não mede diretamente os ângulos de rotação usados em Fotogrametria (ω, ϕ, κ), e sim os ângulos de navegação (ϕ, θ, ψ), as distintas definições dos sistemas de coordenadas e dos ângulos de rotação devem ser consideradas.

Para o georreferenciamento direto, a matriz de transformação c_c^m que relaciona o sistema fotogramétrico (*c*) e o sistema relativo ao espaço objeto (*m*), tem que ser determinada para cada exposição fotográfica, a partir das informações providas pelo sensor inercial da posição do centro perspectivo e dos ângulos de atitude (ϕ, θ, ψ). Com conseqüentes transformações, os ângulos fotogramétricos (ω, ϕ, κ) são calculados. Maiores detalhes podem ser encontrados em Baumker e Heimes (2002).

4.5.2 Acurácia em levantamentos aerofotogramétricos

A acurácia dos dados de posição e orientação fornecidos pelos sensores GPS e INS integrados depende da qualidade e das características dos sensores utilizados. A Tabela 9 apresenta algumas informações de acurácia de experimentos realizados com GPS/INS em levantamentos fotogramétricos.

Tabela 9: Acurácia de alguns sistemas GPS/INS.

MODELO	ACURÁCIA
310 GPS/INS da APPLANIX	Posição: 0,1-0,3m Atitude: 1-2'
INS Motionpak (BEI/Systron Donner) com GPS Ashtech 3DF	Posição: 0,5m Atitude: 2' - roll, 3' - pitch e 20' - yaw
APPLANIX POS/DG310: GPS Novatel Millennium e INS Litton LR 86	Posição: 0,1-0,2m Atitude: 7-15"
Applanix POS/AV 510	Posição: 0,05-0,3m Atitude: 18-30"
POS/AC™ da APPLANIX	Posição: 0,3m Atitude: 2-4'
AEROcontrol – IGI (Testes realizados pela Universidade de Stuttgart em 2000)	Posição: 0,05 – 0,08m Atitude: 11" – roll e pitch, 25" - yaw

Fonte: Seara (2002); Cramer e Schade (1995); Cramer et al (1999); Mostafa e Hutton (2001).

CAPÍTULO V

MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com os conceitos e técnicas abordados nos capítulos referentes à revisão bibliográfica, o presente capítulo trata dos materiais, métodos e desenvolvimentos para a integração de sensores e estudos de calibração de câmaras, visando à concepção do sistema aerotransportado de aquisição de imagens digitais.

5.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram adquiridos e desenvolvidos com recursos da FAPESP, via programa PIPE, de projetos de pesquisa realizados anteriormente na Universidade, além de estruturas e recursos disponibilizados pela empresa Engemap:

- Equipamentos obtidos com recursos FAPESP (proc. 04/09217-3):
 - Duas câmaras digitais *Hasselblad Imacon H1D* (22 Megapixels). Em Novembro de 2007 a empresa Engemap adquiriu uma atualização do *back digital* para 39 Megapixels;
 - Duas lentes *Hasselblad* de 50 mm;
 - Software *FlexColor Hasselblad/Imacon* – para transferência das imagens;

- Um sistema GPS/INS *SPAN*⁵ – *Novatel*;
 - Software de pós-processamento *Waypoint Inertial Explorer*;
 - Uma antena GPS-534c *Novatel* para aeronave;
 - Um receptor GPS de dupla frequência *LEICA GRX1200Pro* – estação base;
 - Uma plataforma para o sistema de aquisição de imagens digitais – “Berço” - projetado e desenvolvido neste trabalho;
 - Suporte de fixação para as câmaras digitais e o sistema de navegação inercial - projetado e desenvolvido neste trabalho;
 - Interface de disparo e sincronismo para o sistema de coleta (câmaras digitais e sistema de georreferenciamento direto) - projetada e desenvolvida neste trabalho;
 - Um computador mini-ITX para navegação e controle do sistema de coleta;
 - Um notebook SONY VAIO Pentium IV, 3,06 GHz, 80 GB de espaço em disco e 1 GB de memória RAM – edição de relatórios e processamentos dos dados em campo;
 - Uma impressora *Hp LaserJet 3015*;
 - Um plotter *Hp DesignJet 130nr 24”* – impressão de produtos cartográficos.
- 1 câmara digital *Sony F-828* (8 Megapixels), que neste projeto foi adaptada com filtro infravermelho – Processo FAPESP 02/01886-8 – câmara opcional na plataforma de coleta;
 - Aeronave modelo *Minuano*, de propriedade da empresa *Engemap Engenharia, Mapeamento e Aerolevante Ltda*;
 - Compilador *Borland C++ Builder 4.0*;
 - *Microsoft Office 2000 Standard* – FCT/UNESP;
 - Sistema Fotogramétrico Digital *LPS* – FCT/UNESP e *Engemap*.
 - Distanciômetro a Laser – FCT/UNESP;
 - Paquímetro – FCT/UNESP.

⁵ A unidade de navegação inercial não chegou a ser usada nesta pesquisa, tendo em vista que houve atrasos significativos no processo de importação.

5.3 O DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

5.3.1 Contexto histórico

As câmaras digitais de médio formato passaram a ser usadas em todo o mundo como dispositivos alternativos de aquisição de imagens para fins de mapeamento, conforme discutido no Capítulo II. Esta abordagem é hoje fonte de estudos do Grupo de Pesquisa em Fotogrametria da UNESP e da empresa Engemap, Engenharia, Mapeamento e Aerolevantamento Ltda.

Há três anos se iniciou um projeto conjunto de pesquisa e inovação entre a empresa Engemap e o Grupo de Fotogrametria da UNESP, financiado pela FAPESP via programa PIPE (Programa de Inovação Tecnológica em Pequenas Empresas). O objetivo proposto no projeto foi o desenvolvimento de uma plataforma de aquisição de imagens com câmaras digitais e sensores de georreferenciamento direto para fins de mapeamento. Os aspectos teóricos de desenvolvimento do sistema, assim como os estudos e análises de calibração de câmaras digitais, foram tratados no presente trabalho de pesquisa.

Em paralelo teve-se o desenvolvimento do projeto ARMOD (Automação dos processos de Reconstrução e orientação de MODElos usando imagens digitais), desenvolvido pelo grupo de Fotogrametria da UNESP e financiamento do CNPq, com foco na automação de processos fotogramétricos.

A motivação para o desenvolvimento destes projetos se deu pela experiência acumulada do Grupo de Pesquisa da UNESP em vários projetos anteriores com câmaras de pequeno e médio formatos, como apresentados em Tommaselli (1997), Hasegawa (1998), Imai (1997), Santos et al (2000) e Ruy (2004). Um grande marco foi a participação no projeto SEIRA, em conjunto com o Instituto de Geomática da Universidade Politécnica da Catalunia, no qual se desenvolveram as bases para a integração de sensores de orientação direta à plataforma de coleta de imagens. Este projeto foi contemplado com o prêmio IBEROEKA de inovação tecnológica de 2003, concedido pelo CYTED.

5.3.2 Características gerais do sistema

O Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-processamento de Imagens digitais (SAAPI) é formado por uma **plataforma de coleta**, composta por sensores ópticos e de posição/orientação e uma **unidade de controle e alimentação**, com processadores e baterias, como ilustra a Figura 29, além de **algoritmos de calibração e processamento de imagens e dados**.

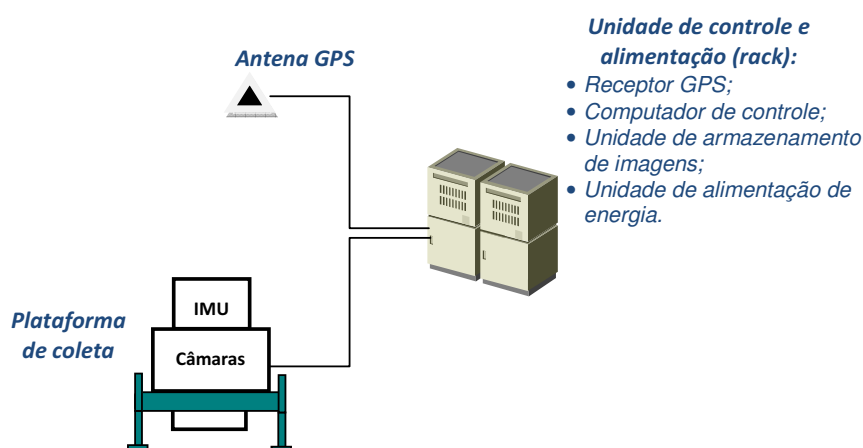


Figura 29: Componentes do Sistema Aerotransportado de Aquisição de Imagens digitais (SAAPI).

Este projeto objetivou o desenvolvimento de um sistema de aquisição de imagens digitais georreferenciadas, com características de flexibilidade, confiabilidade, baixo custo e peso, se comparado aos modernos sistemas digitais, visando aplicações em áreas de pequeno e médio porte que requeiram produtos cartográficos de resposta rápida, como: análises ambientais e monitoramento de desastres; mapeamentos temáticos e topográficos e; projetos de corredores, como rodovias, ferrovias, linhas de transmissão, gasodutos e oleodutos.

O sistema de aquisição é baseado no uso de câmaras digitais integradas a um sistema de georreferenciamento direto composto por uma unidade de navegação inercial táctica e um receptor GPS de dupla-freqüência. Uma configuração proposta baseia-se no posicionamento das câmaras digitais de forma convergente, com a aquisição automática e simultânea das imagens por meio de interface eletrônica, de tal forma que estas registrem

áreas subseqüentes do terreno, com pequena sobreposição (10%). Além disso, uma câmara para a captura de imagens infravermelhas pode ser posicionada na plataforma de coleta, com a coleta simultânea e sincronizada com as imagens coloridas, considerando aplicações em projetos ambientais, com a melhor identificação e classificação de áreas temáticas. Para melhor esclarecer, a Tabela 10 apresenta as possibilidades de configurações da plataforma de coleta.

Tabela 10: Opções de coleta do sistema SAAPL.

	Opções		
	A	B	C
Câmaras utilizadas	1 câmara Hasselblad	1 câmara Hasselblad e 1 câmara infravermelha	2 câmaras Hasselblad e 1 câmara infravermelha
Modo de coleta	vertical	vertical	<i>Câmaras Hasselblad</i> : modo dual convergente <i>Câmara infravermelha</i> : modo vertical
Resolução	5412 x 7216 pixels	<i>Hasselblad</i> : 5412 x 7216 pixels $f = 50$ mm pixel: 6,8 microns <i>Infravermelha</i> : 3264 x 2164 pixels $f = 35$ mm pixel: 10,7 microns (equivalente)	<i>Hasselblad</i> : 5412 x 7216 pixels $f = 50$ mm pixel: 6,8 microns <i>Área de coleta aproximada das duas câmaras Hasselblad</i> : 11000 x 6800 pixels <i>Infravermelha</i> : 3264 x 2164 pixels $f = 28$ mm pixel: 10,7 microns (equivalente)
Disparo controlado e sincronizado por computador			
Registro de eventos no GPS			

As informações de posição e orientação da plataforma são fornecidas pelo sistema de georreferenciamento direto. Estes dados são usados para a navegação em vôo e para o georreferenciamento das imagens. Considerando os dados de georreferenciamento, estudos, análises e algoritmos computacionais sobre os aspectos de calibração das câmaras foram desenvolvidos, a partir do processo de ajuste em bloco com parâmetros adicionais. Do ponto de vista das análises de calibração realizada neste trabalho, a disponibilidade da unidade de navegação inercial integrada ao sistema não é crítica, tendo em vista que as informações de posição, coletadas com precisão e de forma síncrona com as câmaras, são suficientes e fundamentais para a modelagem dos parâmetros adicionais na calibração em serviço.

5.3.3 Sistema de aquisição

Conforme já definido, o sistema de aquisição é formado pela plataforma de coleta e pela unidade de controle e alimentação, que estão apresentadas nos tópicos seguintes.

5.3.3.1 Plataforma de coleta

A plataforma de coleta é formada pelas câmaras digitais, sistema de georreferenciamento direto e unidades físicas de fixação e estabilização dos equipamentos (Figura 30).



Figura 30: Plataforma de coleta do sistema SAAP.

Na plataforma podem ser posicionadas de uma a três câmaras conforme definido na Tabela 10. Originalmente, duas câmaras Hasselblad H1D com resolução de 22 Megapixels foram adquiridas no projeto. Em Novembro de 2007, a empresa Engemap adquiriu a atualização do *back* digital e o sistema passou a ter duas câmaras Hasselblad modelo H3D de resolução de 39 Megapixels, possibilitando maior rendimento na coleta de dados.

As câmaras digitais Hasselblad são modelos profissionais com lentes Hasselblad de alta qualidade geométrica e *back* digital Imacon com CCD fixo. Estas

características, garantidas pelos fabricantes, possibilitam a confiabilidade no uso destas câmaras em trabalhos fotogramétricos. Outros sistemas comerciais reconhecidos internacionalmente, utilizam modelos de câmaras similares para trabalhos em Fotogrametria, integrando os mesmos tipos de componentes, como é o caso do sistema DigiCAM da empresa IGI (DIGICAM, 2008).

Outra câmara que pode ser posicionada na plataforma de coleta é a câmara digital SONY F-828, que foi adaptada para a captura de imagens na banda do infravermelho próximo. Esta câmara é utilizada de forma opcional para a coleta de dados sobre áreas que visam estudos ambientais, uma vez que a banda do infravermelho proporciona melhores resultados na classificação temática dos alvos e fenômenos de interesse.

A Figura 31 apresenta as câmaras digitais Hasselblad H3D (Figura 31a) e SONY F-828 (Figura 31b), que compõem a plataforma de coleta do sistema SAAPI. As especificações técnicas destas câmaras podem ser encontradas no Anexo A deste trabalho.



Figura 31: Câmaras Digitais que compõem o sistema SAAPI: (a) Hasselblad H3D (39 Megapixels), (b) SONY F-828 (8 Megapixels).

De forma integrada às câmaras digitais tem-se o sistema de georreferenciamento direto. Inicialmente, considerando estudos e simulações com câmaras digitais e dados de georreferenciamento direto, como apresentados em Tommaselli e Ruy (2004), definiu-se o sistema SPAN da Novatel para compor o sistema, em virtude de suas características de desempenho e custo acessível. Tal sistema é formado por um receptor GPS de dupla-freqüência modelo DL4-Plus e uma unidade inercial tática G2-H58 (Honeywell HG 1700 AG58), além de componentes de software e hardware. O GPS DL-Plus foi inicialmente integrado ao sistema, a partir do qual foram desenvolvidas todas as interfaces de

sincronismo de dados, navegação e, posteriormente, os testes de ensaios em vôo e fototriangulação com parâmetros adicionais.

Contudo, a unidade de navegação inercial não pôde ser integrada ao sistema, uma vez que houve problemas burocráticos e de licença de uso durante o processo de importação junto aos EUA, sendo necessário o cancelamento e substituição do modelo do sistema de georreferenciamento direto em Outubro de 2008. O novo modelo definido foi o SPAN-CPT, também da Novatel, que possui uma unidade de navegação inercial produzida da Alemanha e que, deste modo, não necessita de uma licença especial de importação e uso, como ocorrem com as IMU importadas dos EUA.

O SPAN-CPT/Novatel constitui um sistema integrado de GPS e unidade de navegação inercial tática em uma única caixa (Figura 32), de forma a representar um sistema modular e leve. O GPS permite receber mensagens do sistema OMNISTAR, a partir do qual é possível a navegação em tempo real com acurácia em torno de 10-15 cm. Para o uso do sistema em tempo real com esta precisão tem-se um custo anual que deve ser pago a fornecedora (OMNISTAR).

A precisão da atitude gira em torno de $0,1^\circ$ em *heading* e $0,05^\circ$ em *roll* e *pitch*, considerando os dados pós-processados. Outras especificações do sistema podem ser encontradas no Anexo B. O sistema *SPAN-CPT* proporciona tanto a solução em tempo real como a pós-processada. Em geral, a solução em tempo real (velocidade, posição e atitude da plataforma) é usada para a navegação e controle de deriva em vôo, e a solução pós-processada para o georreferenciamento das imagens. Contudo, como este sistema permite alta acurácia posicional em tempo real, as coordenadas dos centros perspectivos poderão ser obtidas em quase tempo real. Devido a esta característica está em desenvolvimento um módulo de geração instantânea de fotoíndices, que permitirá a realização de análises relativas à qualidade do vôo logo após o término da missão. Estas características possibilitam ao sistema grande agilidade ao processo de mapeamento, uma vez que as imagens georreferenciadas e os subprodutos poderão ser obtidos logo após a coleta em vôo.



Figura 32: Sistema de georreferenciamento direto SPAN-CPT/Novatel (Fonte: www.novatel.com).

O suporte metálico foi desenvolvido com exoesqueletos individuais para as câmaras, de forma a garantir a geometria e estabilidade das orientações internas das câmaras, bem como da orientação relativa entre elas na plataforma de coleta, conforme ilustra a Figura 33. Os exoesqueletos possuem pontos de fixação na base inferior e nas laterais do suporte, de forma a evitar quaisquer variações de orientação relativa entre as câmaras. A inclinação das câmaras no suporte é de 18° , a qual foi estabelecida em função do ângulo de abertura das câmaras e das características do projeto do sistema, conforme discutido no item 5.3.6.



Figura 33: Plataforma de coleta do sistema SAAPL com os exoesqueletos de alumínio para as câmaras Hasselblad; (b) plataforma na configuração dual.

Antes de chegar a esta solução definitiva, outros dois modelos haviam sido desenvolvidos. Nestes modelos preliminares, a garantia de estabilidade de orientação

interior e relativa entre as câmaras não estava sendo atendida e, deste modo, a confiabilidade no que concerne a calibração e rigidez geométrica do sistema estaria prejudicada. Neste sentido, estudos e simulações foram desenvolvidos até se chegar ao protótipo atual, especialmente desenvolvido para o sistema SAAPI. Um ponto fundamental verificado no desenvolvimento deste suporte é que para alterar entre as configurações (Tabela 10), a câmara Hasselblad não é retirada do exoesqueleto, garantindo a rigidez interna da câmara.

Para a sustentação de todo o sistema um berço de alumínio foi projetado e desenvolvido (Ver Figura 30). O berço é fixo a fuselagem da aeronave, sendo sustentado por amortecedores que evitam a transmissão das vibrações da aeronave para o sistema. A abertura interna do berço é de 21 x 21 cm, onde é fixado o sistema. Há ainda um nível de bolha e uma graduação angular para a correção manual da deriva da aeronave em vôo (*heading*).

5.3.3.2 Unidade de controle e alimentação

A unidade de controle e alimentação de energia do sistema SAAPI é estruturada sobre um *rack* de alumínio, especialmente desenvolvido para a aeronave da empresa e para o sistema SAAPI, conforme apresentado na Figura 34. Esta unidade é composta por um computador de controle integrado a um monitor *touch screen*, um receptor GPS de dupla-freqüência do sistema SPAN, unidade de armazenamento das imagens, monitor de vídeo e sistema de alimentação e controle de energia.



Figura 34: Unidade de controle e alimentação de energia do SAAPI.

O computador de controle é responsável pelo gerenciamento de todo o sistema em voo. Utiliza-se o ambiente LINUX como sistema operacional, a partir do qual foram implementados os sistemas de disparo e sincronismo de dados, e o software de controle e navegação em voo. Um monitor *touch screen* é usado para o display gráfico e interação com o sistema de navegação em voo. Na Seção 5.3.5 apresenta-se uma descrição do sistema de disparo e sincronismo desenvolvido.

A unidade de armazenamento de imagens das câmaras digitais Hasselblad é denominada *Image Bank* (Figura 35). Trata-se de uma unidade de disco rígido conectada à câmara por meio de um cabo *firewire*. Nos modelos de câmara H1D – 22 Megapixels a capacidade do *image bank* era de 40GB, que comportava o armazenamento de aproximadamente 850 imagens. Já no modelo atual H3D – 39 Megapixels, a capacidade é de 100GB, que armazena mais de 1500 imagens.

A Figura 35 apresenta ainda o computador de controle do sistema SAAPI e as unidades de armazenamento de imagens das câmaras Hasselblad H3D, montados sobre o *rack* na aeronave.



Figura 35: Computador de controle e unidades de armazenamento de imagens do sistema SAAPI.

Cabe ressaltar que recentemente foi integrado um HD de estado sólido (*SSD – Solid State Disk*) com capacidade de 128 GB no computador do sistema. Como se trata de um dispositivo de estado sólido, os efeitos de vibração não interferem no desempenho da unidade, tornando-se ideal para as aplicações em aeronaves e outros veículos. Além disso, a velocidade de acesso ao disco é cerca de quatro vezes mais rápida que uma unidade de disco rígido convencional, conforme testes de laboratório realizados.

Com estas características, desenvolveu-se recentemente no sistema uma alternativa para a transferência das imagens em vôo. As imagens podem ser transferidas diretamente para este disco de estado sólido durante a missão, a partir de interface *firewire 800* integrada no computador e software de gerenciamento específico da Hasselblad. Isso simplifica e agiliza o modo de coleta, uma vez que as imagens são transferidas diretamente ao computador, sem a necessidade de uso das unidades de armazenamento – *images Banks*. Além disso, torna o sistema com maior confiabilidade e robustez, devido ao uso de uma unidade de gravação de estado sólido e menos suscetível a problemas causados por vibrações.

Além do monitor *touch screen* utiliza-se um monitor de vídeo conectado à uma câmara de monitoramento para o controle visual da trajetória e correção da deriva em vôo. A correção de deriva é realizada manualmente sobre o sistema, com o acompanhamento da cena imageada via monitor. Um berço com sistema de giro-estabilização está sendo desenvolvido, o que permitirá a compensação automática dos movimentos angulares.

O modelo de antena do sistema SPAN é o Novatel GPS-534c, especial para a utilização em aeronaves e que permite a captura da banda L referente ao sistema OMNISTAR. A antena GPS foi posicionada na parte superior da aeronave, conforme mostra a Figura 36, na direção vertical à plataforma de coleta, e conectada ao receptor GPS por meio de cabo próprio passado pelo forro da aeronave (Especificações técnicas no Anexo B).



Figura 36: Antena Novatel GPS-534c fixada à aeronave.

Para a definição da posição de instalação da antena, a aeronave foi nivelada com o auxílio de niveladores hidráulicos, simulando as condições de voo. Após isso, a plataforma de coleta foi nivelada pelo suporte de câmaras. Nestas condições, o centro da plataforma superior do suporte de câmaras (plataforma de fixação da unidade de navegação inercial) foi projetado ao teto da aeronave com o uso de um fio de prumo. A altura deste ponto da plataforma até o ponto de fixação da antena foi medido com distanciômetro a laser.

Posteriormente, a diferença ao centro de fase da antena e o vetor de deslocamento entre o ponto de medida no suporte aos centros perspectivos das câmaras foram considerados. As medidas sobre o suporte de câmaras foram realizadas em laboratório com um paquímetro.

Para a alimentação de energia de todo o sistema, uma bateria aeronáutica homologada de 12 V foi instalada no rack da aeronave. A instalação e as conexões desta bateria junto ao sistema de alimentação da aeronave foram realizadas por oficina especializada e homologada. Todos os equipamentos do sistema SAAPI (câmaras, unidades de armazenamento, GPS/INS, computador, monitores) possuem alimentação de energia em 12 V e, para melhor organização e segurança dos equipamentos, um painel de conectores com chaves e fusíveis independentes foi desenvolvido (Ver Figura 34).

5.3.4 Arquitetura do sistema de voo

O sistema de voo aqui definido é formado pelo piloto da aeronave, operador de voo, computador de controle (sistema), câmaras e sensores de posição e orientação. As funções de cada componente do sistema de voo são estabelecidas no diagrama apresentado na Figura 37.

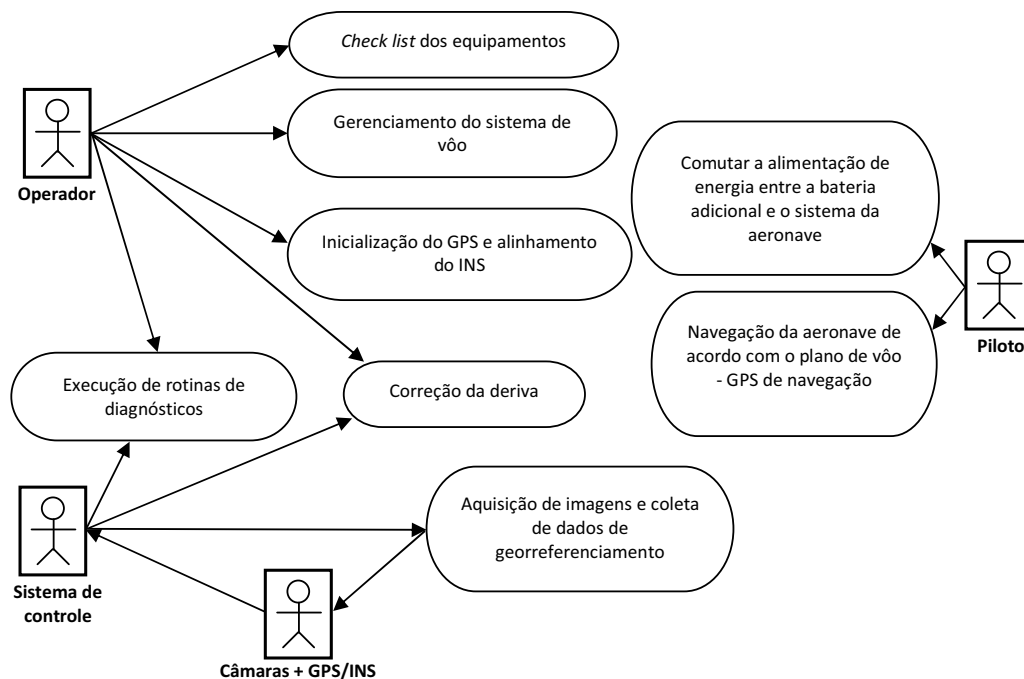


Figura 37: Diagrama do sistema de voo – SAAPI.

O *operador* é responsável pelo gerenciamento e operação do sistema de aquisição. Antes da realização do vôo, quando a aeronave ainda se encontra estável em solo, o operador executa:

- Rotinas de diagnósticos para a verificação do estado do sistema;
- *Check list* do sistema, onde são verificadas as conexões, sistema de alimentação de energia, as regulagens das câmaras e o funcionamento de todo o sistema;
- Configuração dos dados de vôo;
- Teste e inicialização do sistema GPS e;
- Alinhamento do sistema de navegação inercial, que estabelece a inicialização dos parâmetros que definem a navegação inercial (Software próprio do INS).

No decorrer do vôo o operador gerencia a coleta de dados e realiza a correção da deriva da aeronave. Este processo é realizado com o auxílio do monitor de vídeo. As variações angulares no plano horizontal (*heading*) são acompanhadas pelo operador e compensadas manualmente por meio de ajustes angulares realizados sobre a plataforma de coleta. Vale ressaltar que esta correção da deriva é realizada antes do início da coleta das imagens e após a estabilização da aeronave na faixa de vôo.

Esta abordagem de correção da deriva é provisória, visto que com a disponibilidade do sistema de navegação inercial, esta correção será realizada a partir dos dados disponibilizados em tempo real pelo GPS/INS. Além disso, um berço com sistema de giro-estabilização está sendo desenvolvido, o que permitirá a correção automática dos movimentos da aeronave.

A alimentação de energia dos equipamentos embarcados na aeronave, durante as operações de pouso e decolagem, é realizada por meio da bateria adicional posicionada no *rack*. No decorrer da missão em vôo, os equipamentos são alimentados pelo sistema de energia da aeronave, e a bateria adicional é carregada pelo alternador da aeronave. Esta permuta no processo de alimentação de energia dos equipamentos é realizada pelo *piloto*, por meio de uma chave de controle posicionada no painel da aeronave.

O disparo das câmaras é autônomo e sincronizado com o sistema de georreferenciamento direto por meio de interfaces eletrônicas, conforme segue definido no tópico seguinte.

5.3.5 Disparo e sincronismo do sistema

O disparo e sincronismo do sistema são realizados de forma automática por meio de dispositivos de software e hardware especialmente desenvolvidos para o SAAPI. As implementações físicas foram desenvolvidas por um bolsista FAPESP ligado ao projeto, que atualmente desenvolve o curso de mestrado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da UNESP. O esquema de funcionamento do sistema em vôo é apresentado na Figura 38.

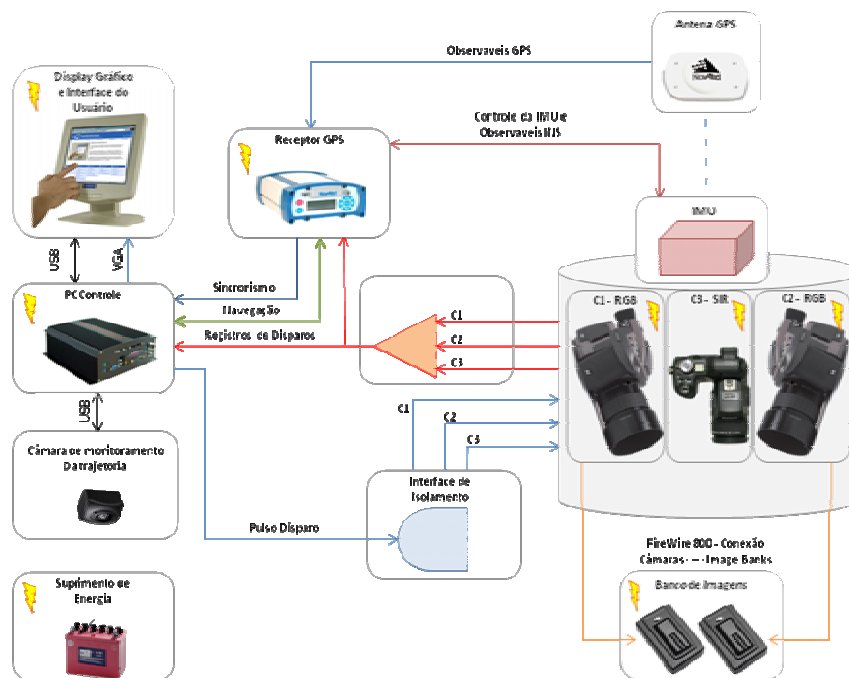


Figura 38: Hardware do sistema SAAPI.

A partir do plano de vôo previamente calculado o computador de controle é configurado para o projeto a ser executado. Destaca-se que, um programa para o cálculo automático do plano de vôo foi desenvolvido no projeto (REIS et al, 2006). Este programa

calcula o plano de vôo analítico e gráfico de forma integrada a um aplicativo CAD, com interfaces diretas para o *Google Earth* e para o GPS do piloto da aeronave.

A interface do sistema é gerenciada a partir de um monitor com recurso *touchscreen*. Um monitor auxiliar ligado diretamente a uma câmara de monitoramento é usado para o controle visual da trajetória e correção da deriva em vôo.

A cada estação de exposição definida no plano de vôo, um pulso é disparado pelo computador de controle para o acionamento das câmaras, que transferem diretamente as imagens para as unidades de armazenamento. O disparo de todas as câmaras é realizado de forma sincronizada, garantido por um circuito integrado ao computador que gerencia o disparo síncrono. O sincronismo do sistema é uma das etapas mais críticas na coleta de dados em vôo. Isto porque o disparo não sincronizado entre as câmaras e o erro de sincronismo entre as câmaras e o sistema GPS podem resultar em erros na superposição e no georreferenciamento direto das imagens, prejudicando a acurácia e a confiabilidade do sistema de coleta.

A estratégia desenvolvida para o sincronismo entre os sistemas é baseada no sistema de tempo do GPS. As marcas de disparos das câmaras são armazenadas no arquivo bruto do GPS. O software de pós-processamento dos dados (*GravNav - Waypoint*) interpreta estes registros e, com o pós-processamento dos dados, realiza a interpolação das coordenadas para os momentos de disparo das imagens.

Para referenciar os eventos de disparo ao sistema fotogramétrico das imagens, deve-se considerar o deslocamento entre o centro de fase da antena GPS e o centro perspectivo da câmara. Esta medida de deslocamento entre o centro de fase da antena GPS e o centro perspectivo da câmara é realizada por meio de medidas diretas de distância. Para isto, a aeronave foi nivelada em vôo e utilizou-se um fio de prumo, um distanciômetro a laser e um paquímetro para realizar as medidas das componentes tridimensionais. A informação do centro de fase da antena foi verificada no manual da antena. Já a posição do centro perspectivo da câmara foi determinada a partir de medidas internas realizadas com um paquímetro, considerando informações e documentos referentes à câmara e a lente, todos repassados diretamente pela fábrica da Hasselblad na Dinamarca.

A unidade de medida inercial (IMU), que se encontra em fase final de importação, será posicionada na plataforma acima das câmaras, com os movimentos solidários às mesmas. A IMU é conectada diretamente ao receptor GPS, sendo que suas medidas são referenciadas diretamente ao sistema de tempo do GPS.

Todos os equipamentos que compõem o sistema de coleta possuem alimentação de energia provida pela bateria do sistema que, por sua vez, é interligada ao sistema de energia da aeronave.

5.3.6 Configuração dual da plataforma de coleta

As câmaras digitais Hasselblad possuem duas opções de lentes adquiridas neste projeto: 50 mm e 80 mm. Contudo, vale ressaltar que o uso das lentes de 80 mm se torna mais restrito em virtude do pequeno ângulo de abertura (Tabela 11). Isto faz com que a aeronave tenha que navegar a uma altura de vôo mais elevada, para que a imagem adquirida tenha resolução compatível com a imagem tomada com uma lente de 50 mm, o que torna, em muitos casos, inviável para aeronaves de pequeno porte. Além disto, o pequeno ângulo de abertura proporciona uma geometria desfavorável para a determinação de coordenadas altimétricas no terreno.

Tabela 11: Ângulos de abertura da câmara digital Hasselblad.

	Ângulo de abertura lado menor $\alpha = 2 * \arctan\left(\frac{l}{2f}\right)$	Ângulo de abertura lado maior $\beta = 2 * \arctan\left(\frac{L}{2f}\right)$
$f = 50 \text{ mm}$	40°18'	52°13'
$f = 80 \text{ mm}$	25°16'	34°03'

l = lado menor da fotografia (na câmara Hasselblad H3D equivale a 36,7 mm – Ver Anexo A);
L = lado maior da fotografia (na câmara Hasselblad H3D equivale a 49 mm – Ver Anexo A);
f = distância focal da câmara.

Nestas condições, a lente de 80 mm pode ser melhor utilizada no recobrimento de áreas com variações abruptas de altitudes, como áreas urbanas, uma vez

que o pequeno ângulo de abertura da câmara proporciona imagens com menor efeito do deslocamento devido ao relevo e minimiza a possibilidade de áreas oclusas nas imagens.

Diante deste panorama, neste trabalho optou-se pelo desenvolvimento do suporte de câmaras considerando o uso das lentes de 50 mm, que possibilita maior rendimento ao sistema. Contudo, se o uso das lentes de 80 mm for justificado, torna-se necessário apenas substituir os exoesqueletos de alumínio das câmaras, considerando a nova inclinação para o arranjo dual.

Considerando agora a configuração dual do sistema de coleta, o ângulo de cobertura no terreno em cada exposição pode ser incrementado, como mostra a Figura 39. A medida Δ equivale à distância entre os centros perspectivos (CP_1 e CP_2) das duas câmaras Hasselblad na plataforma de coleta, que no projeto do suporte de câmaras foi fixado em 11 cm. A cobertura da imagem no terreno na direção de coleta convergente (d) é obtida por meio de relações trigonométricas, a partir da altura de vôo z e das medidas angulares θ_1 e θ_2 , que somadas correspondem ao ângulo de abertura da câmara nesta direção.

Como as câmaras são posicionadas uma de frente à outra na plataforma de coleta, tem-se que a inclinação das câmaras ocorre em relação ao lado menor da fotografia e, portanto, os valores de θ_1 e θ_2 são 38° e 2° , respectivamente (Consultar Tabela 11). O valor do ângulo θ_2 foi calculado de tal modo que se tenha uma superposição de 10% entre as fotografias adquiridas simultaneamente pelas duas câmaras. Com isto, a inclinação (i) de cada câmara na plataforma de coleta resultou em 18° .

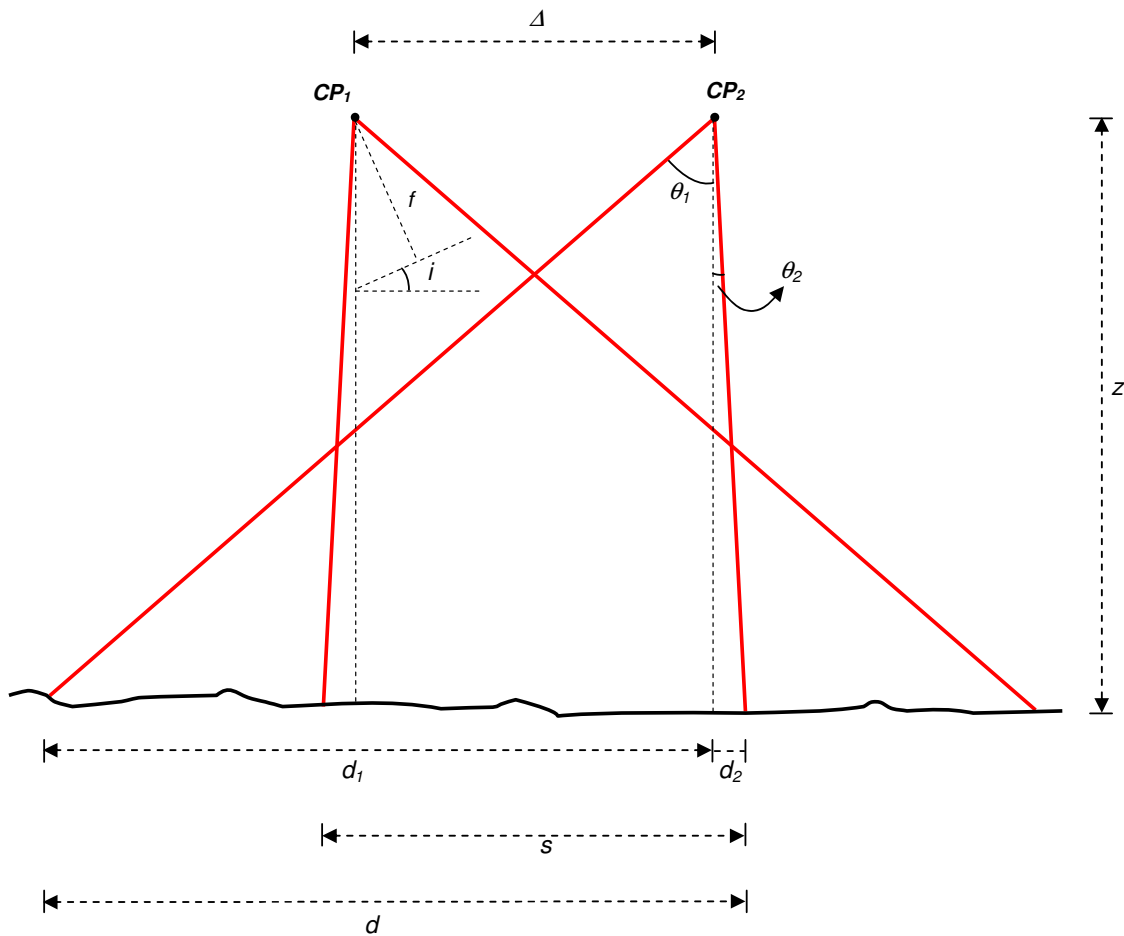


Figura 39: Geometria das câmaras na plataforma de coleta.

$$d_1 = z \cdot \operatorname{tg}(\theta_1) = z \cdot \operatorname{tg}(38^\circ) \quad (23)$$

$$d_2 = z \cdot \operatorname{tg}(\theta_2) = z \cdot \operatorname{tg}(2^\circ) \quad (24)$$

$$d = d_1 + d_2 \quad (25)$$

A superposição entre as imagens s é dada por:

$$s = 2 \cdot d_2 + \Delta \quad (26)$$

Nesta configuração de coleta dual, verificou-se que o sistema poderia operar de duas formas.

Na primeira, o suporte de câmaras é posicionado de modo que se tenha a coleta convergente das imagens na direção da linha de vôo, ou seja, uma câmara posicionada para frente e a outra para trás, como mostra a Figura 40.

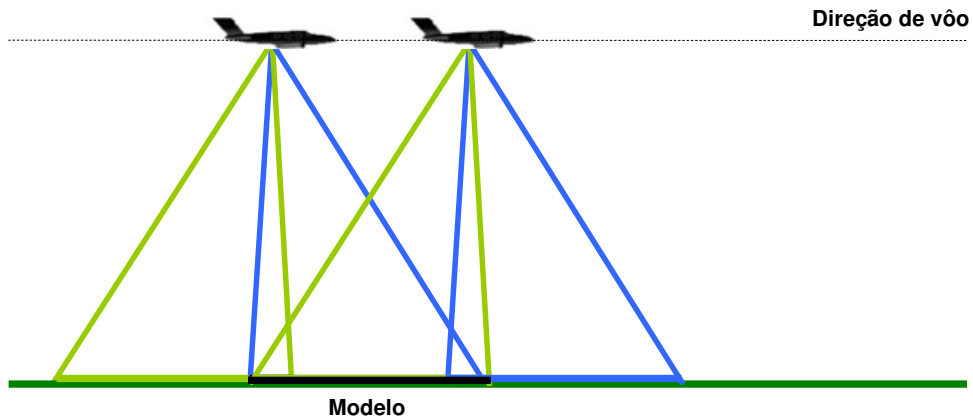


Figura 40: Geometria de aquisição das imagens Hasselblad: opção de coleta ao longo da linha de vôo.

Em outro modo de coleta, o suporte de câmaras pode ser girado no berço para aumentar a cobertura lateral de vôo, como ilustra a Figura 41.

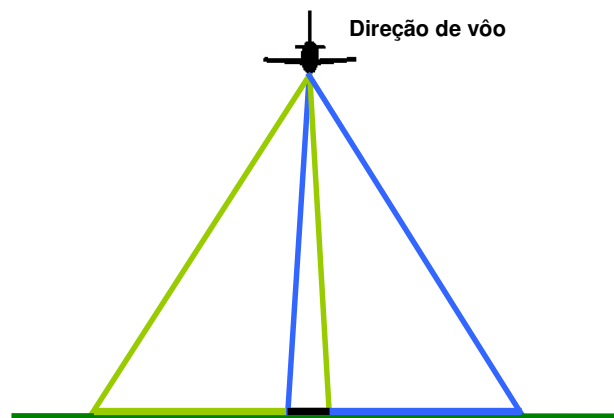


Figura 41: Geometria de aquisição das imagens Hasselblad: opção de coleta perpendicular à linha de vôo.

A primeira forma de coleta pode ser bastante interessante em projetos de corredores, como linhas de transmissão, rodovias, gasodutos e oleodutos, visto que o número de aquisições se torna reduzido, possibilitando um aumento no intervalo de disparo entre as fotos. O intervalo entre as fotos é mais crítico nas câmaras de menor resolução,

como era inicialmente previsto no projeto. Contudo, com o incremento de resolução e o avanço tecnológico dos dispositivos de gravação de dados nas câmaras mais modernas este fato não se torna tão importante. As câmaras mais modernas da Hasselblad, por exemplo, permitem a aquisição de imagens a cada 1,8 segundos.

Já a segunda abordagem possibilita uma redução do número de linhas de vôo em blocos fotogramétricos, minorando o custo do levantamento, uma vez que se otimiza o tempo e o consumo de combustível da aeronave.

5.3.7 Homologação do sistema

Para a execução das atividades de aerolevamento no Brasil torna-se necessária a homologação da aeronave e do sistema de aquisição junto ao Centro Técnico Aeroespacial (CTA). Além disto, a empresa deve estar inscrita no Ministério da Defesa para o exercício de atividades de aerolevamento com o sistema de coleta proposto.

Vale ressaltar que a legislação brasileira relativa a esta atividade não aborda especificamente o uso de câmaras digitais embarcadas em aeronaves para a execução de atividades de aerolevamento. Entretanto, para contornar este problema, autorizações especiais estão sendo concedidas pelo Ministério da Defesa para que sistemas digitais operem em atividades de aerolevamento.

O processo de homologação da aeronave da empresa Engemap (modelo Minuano EMBRAER - Figura 42) junto ao CTA para a execução de atividades de aerolevamento com o sistema proposto (SAAPI) foi realizado durante o ano de 2006.



Figura 42: Aeronave da empresa Engemap – Minuano - EMBRAER.

Para a homologação da aeronave, alguns estudos e análises foram desenvolvidos para propor modificações internas de forma a tornar a aeronave adequada para as atividades de aerolevante com o sistema de câmaras digitais proposto neste projeto. Tais modificações propostas foram realizadas por uma oficina homologada situada na cidade de São José dos Campos – SP, sendo o serviço supervisionado e deferido por um Engenheiro Aeronáutico especializado em aeronaves adaptadas para SAE (Serviço Aéreo Especializado).

As modificações propostas e realizadas foram:

- a) *Furo para a aquisição de imagens*: furo na fuselagem da aeronave com diâmetro de 270 mm e reforço estrutural, para a fixação da plataforma de coleta (Figura 43). Esta dimensão, consideravelmente inferior às dimensões de aeronaves com câmaras analógicas (que gira em torno de 420 mm), foi definida com base nos cálculos do ângulo de abertura e cobertura das câmaras (Seção 5.3.5), de forma que não se tenha riscos de imageamento da fuselagem da aeronave.



Figura 43: Furo na fuselagem da aeronave para a aquisição das imagens.

- b) *Sistema de escotilha* para o controle da abertura do furo de aquisição das imagens, conforme mostra a Figura 44. Esta escotilha tem a função de proteger o sistema de coleta durante as operações de pouso e decolagem da aeronave, evitando que detritos e sujeiras possam prejudicar a integridade do sistema. As operações de abertura e fechamento da escotilha são realizadas pelo operador do sistema.



Figura 44: Sistema de escotilha desenvolvido para as operações com o sistema de coleta.

- c) *Suporte (rack)* para o armazenamento dos componentes da unidade de controle e alimentação (Ver Figura 34). Neste *rack* são posicionados o computador de controle, tela de visualização, receptor GPS e sistema de alimentação de energia.

- d) *Instalação da antena GPS* na parte superior da aeronave (Ver Figura 36), verticalmente acima da plataforma de coleta. Para a fixação da antena GPS a aeronave foi nivelada com o auxílio de um macaco hidráulico, e a sua posição foi definida verticalmente acima do centro da plataforma de coleta, utilizando um fio de prumo.

- e) *Adaptações na parte elétrica*. Foi instalada uma bateria aeronáutica de 12 V no *rack* para a alimentação de energia do sistema de coleta. Esta bateria foi ligada ao sistema de energia da aeronave, e uma chave de energia adaptada no painel da aeronave pode ser acionada pelo piloto para suspender a conexão com a bateria do sistema, durante as operações mais críticas com a aeronave, de modo que o sistema de coleta não interfira no desempenho da aeronave e a segurança do voo seja garantida. Além disso, um painel de conectores (ligado a bateria) com tomadas para todos os componentes do sistema foi desenvolvido (Ver Figura 34).

5.4 CALIBRAÇÃO

5.4.1 Calibração de câmaras

A calibração de câmaras tem por objetivo a determinação dos parâmetros que definem sua geometria interna. Esta etapa pode ser realizada em laboratório ou em métodos de campo, conforme descrito no capítulo III.

Contudo, as condições do ambiente de calibração são, em geral, diferentes do ambiente de coleta das imagens. Como exemplo, tem-se um decréscimo de temperatura na ordem de 2° (dois graus) a cada mil pés que se sobe com a aeronave. Com isto, pode-se ter uma diferença nos valores dos parâmetros de calibração. Uma solução, estudada neste trabalho, é a utilização de parâmetros adicionais ao modelo de fototriangulação. Neste trabalho, tais parâmetros adicionais referem-se aos parâmetros de orientação interior (distância focal, coordenadas do ponto principal, distorções das lentes e modelo de afinidade), que podem ser introduzidos à solução de forma a estimá-los em serviço, ou seja, com comportamento relativo ao ambiente de coleta das imagens.

O estudo e o emprego de parâmetros adicionais ao modelo de fototriangulação se tornam adequados ao escopo deste trabalho uma vez que se tem um sistema de georreferenciamento direto integrado. Além disso, tem-se a opção de configuração dual, na qual as câmaras são dispostas de forma inclinada na plataforma de coleta. Deste modo, as imagens podem ser obtidas de forma convergente e os parâmetros de orientação exterior em cada exposição fotográfica são calculados de forma direta, eliminando-se o problema de correlação entre os parâmetros de OI e OE no processo de ajuste em bloco, conforme discutido no Capítulo III.

Trata-se ainda neste trabalho do estudo e implementações de injunções de orientação relativa entre as câmaras e modelos de erros do sistema GPS/INS. Estes parâmetros são tratados nos processos de ajuste em bloco para a garantia de geometria do sistema e a qualidade na determinação da solução.

Nestas condições adotou-se como metodologia neste trabalho o cálculo da calibração das câmaras de duas formas. A princípio, as câmaras são calibradas no campo de

calibração terrestre e, em cada projeto de aerolevamento desenvolve-se a fototriangulação com parâmetros adicionais para a estimação dos parâmetros relacionados ao ambiente de coleta das imagens. Com as calibrações em terreno tem-se a determinação periódica dos parâmetros de orientação interior das câmaras, de forma que se possa avaliar o uso destes valores nos projetos aerofotogramétricos e a estabilidade temporal destes parâmetros.

Para os estudos e processamentos de calibração desenvolveu-se nesta pesquisa um software em linguagem C/C++. O programa, denominado CMC (Calibração Multi-Câmaras), permite a realização simultânea da calibração de três câmaras, considerando restrições de orientação relativa. Tanto para a calibração terrestre quanto para a fototriangulação com parâmetros adicionais, o modelo matemático é o mesmo, mas com tratamentos diferenciados, uma vez que não se considera o uso do GPS/INS na calibração terrestre. Na calibração terrestre, a geometria de aquisição, com fotos tomadas de forma convergente e rotacionadas entre si, é usada para a quebra de correlação entre os parâmetros e a determinação de orientação relativa entre as câmaras.

Neste programa, injunções de orientação relativa entre câmaras e modelos de erros de trajetória do sistema GPS/INS também foram estudados e desenvolvidos. Portanto, o programa computacional desenvolvido pode ser considerado para as duas abordagens de calibração.

Os modelos matemáticos desenvolvidos e o programa computacional para a calibração das câmaras encontram-se detalhados no decorrer desta seção.

Calibração das câmaras em campo terrestre

A calibração das câmaras em terreno é realizada para a determinação dos parâmetros de orientação interior das câmaras e a orientação relativa entre elas na plataforma de coleta. Neste processo, as câmaras são montadas nos exoesqueletos individuais e em seguida no suporte de câmaras. Os exoesqueletos garantem que o conjunto *lente-corpo-back* de cada câmara permaneça fixo e estável. Com a montagem no suporte de câmaras, a geometria de orientação relativa é garantida.

As fotos são adquiridas de forma sincronizada pelo dispositivo de coleta desenvolvido (Figura 45a). Utilizam-se modos convergentes e girados para a aquisição das imagens, para a quebra de correlação entre os parâmetros de orientação interior e exterior. Além disso, pode-se estimar a orientação relativa entre as câmaras na plataforma de coleta, por meio de metodologia desenvolvida e apresentada no tópico seguinte, onde são descritos os modelos matemáticos e os algoritmos computacionais desenvolvidos. No que se refere à metodologia de estabelecimento de injunções de orientação relativa entre as câmaras, uma dissertação de Mestrado foi desenvolvida, na qual as implementações computacionais foram integradas ao programa de calibração e testes foram realizados (Bazan 2008).

A calibração terrestre é realizada periodicamente em intervalos de tempo esparsos (em geral, uma vez por ano), desde que as câmaras não tenham sido removidas do suporte, para que a calibração da orientação relativa entre elas não seja afetada.

Para esta etapa de calibração faz-se uso do campo de calibração da FCT/UNESP, que foi recentemente reformado com recursos do projeto de calibração de câmaras financiado pelo CNPq e coordenado pelo professor Mauricio Galo, (Figura 45b). Foram adicionados mais alvos de controle e foram realizadas medidas de distância entre os alvos com um paquímetro. Com isso, a rede de pontos foi reajustada, agora com injunções de distância. Pelos testes realizados nesta pesquisa e em Bazan (2008) verificou-se que o uso desta nova rede de pontos permitiu uma melhora significativa na solução de calibração, com uma redução em cerca de 20% dos resíduos das foto-coordenadas e dos desvios-padrão dos parâmetros estimados, promovendo uma solução com maior precisão e confiabilidade.



Figura 45: Calibração de câmaras: (a) coleta de imagens com a plataforma do sistema SAAPI, (b) campo de calibração da FCT/UNESP.

Fototriangulação com parâmetros adicionais

A fototriangulação com parâmetros adicionais (FPA) trata do ajustamento por feixes de raios do bloco de imagens, considerando também parâmetros que modelam a geometria interna das câmaras no processo de formação das imagens. Na FPA com a configuração dual a inunção de orientação relativa, determinada na calibração terrestre, pode ser também considerada, de forma a garantir a geometria de aquisição.

Além disso, foram desenvolvidos algoritmos, e implementados no programa computacional, relativos a modelagem de erros do sistema GPS/INS. Os erros do GPS/INS considerados neste trabalho estão relacionados aos parâmetros *shift* e *drift*, que modelam os desvios de trajetória, conforme modelo definido no tópico seguinte. Estes parâmetros de correção são aplicados às informações de posição e orientação da plataforma de aquisição. No máximo 12 parâmetros por faixa são estimados durante o processo de ajuste em bloco. Estes parâmetros são tratados como livres no ajustamento, para a absorção dos erros de trajetória.

O modelo matemático estudado foi do tipo explícito, no qual os parâmetros de orientação interior e distorções das lentes e do sensor podem ser determinados no processo de ajustamento. Para se definir esta abordagem estudos com modelos de fototriangulação com parâmetros adicionais foram desenvolvidos, a partir testes de fototriangulação com três blocos de imagens adquiridos pela câmara digital Hasselblad que integra o sistema SA-API. Nestes testes, os modelos de FPA (Bauer, Jacobsen, Ebner, Brown e modelo de distorção das lentes) foram explorados para se verificar o ganho em exatidão resultante do uso desta técnica em relação à fototriangulação convencional por feixes de raios, sem parâmetros adicionais. Pelas análises dos resultados obtidos nestes testes verificou-se que o modelo de distorção das lentes foi o modelo de FPA que possibilitou os melhores resultados. Os detalhes dos modelos de FPA, dos resultados e análises dos testes estão apresentados em Ruy et al (2008) e no capítulo de experimentos deste trabalho (capítulo VI).

Como neste trabalho tem-se o sistema com dados de georreferenciamento direto, desenvolve-se o modelo para se considerar também a estimação da distância focal e

das coordenadas do ponto principal, uma vez que a correlação entre os parâmetros de orientação interior e exterior pode ser eliminada considerando injunções sobre os parâmetros de orientação exterior providos pelo sistema GPS/INS.

A idéia é que em cada projeto aerofotogramétrico seja realizada uma coleta inicial em uma pequena área do bloco, denominada de área de calibração. Sobre esta área, faixas de vôo em sentidos contrários e cruzadas entre si são realizadas, e alguns pontos de apoio são coletados. De posse das imagens, dos parâmetros de orientação interior iniciais (calibração terrestre), dos parâmetros de orientação exterior (GPS/INS) e das coordenadas dos pontos de apoio, aplica-se o algoritmo de fototriangulação com parâmetros adicionais desenvolvido. Com isso, os parâmetros obtidos nesta área de calibração podem então ser aplicados para todo o bloco fotogramétrico, uma vez que foram refinados para as condições de coleta das imagens.

Modelos matemáticos

A solução de calibração é calculada mediante ajustamento pelo Método Combinado com injunções, detalhado no Apêndice A, uma vez que tanto os parâmetros como os valores observados são ligados por uma função não explícita e não linear.

Equações de Observação:

As equações de observação correspondem às equações de colinearidade, acrescidas de parâmetros adicionais, que modelam a geometria interna das câmaras.

$$x - x_0 - (x - x_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) - P_1 [3(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] - 2P_2(x - x_0)(y - y_0) - A(x - x_0) + B(y - y_0) + f \cdot \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = 0 \quad (27)$$

$$y - y_0 - (y - y_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) - 2P_1(x - x_0)(y - y_0) + P_2 [3(y - y_0)^2 + (x - x_0)^2] - f \cdot \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} = 0$$

com:

x, y : coordenadas do ponto no sistema intermediário de imagem;

f : distância focal da câmara;

x_0, y_0 : coordenadas do ponto principal no sistema intermediário de imagem;

k_1, k_2, k_3 : coeficientes da distorção radial;

P_1, P_2 : coeficientes da distorção descentrada;

A, B : parâmetros de afinidade;

$$r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2;$$

X_0, Y_0, Z_0 : coordenadas do centro perspectivo da câmara no espaço objeto;

X, Y, Z : coordenadas do ponto no espaço objeto;

r_{11}, \dots, r_{33} : elementos da matriz de rotação, que relacionam os espaços imagem e objeto (equação 4 – Capítulo 3).

A correção de refração atmosférica é pré-aplicada no caso aéreo sobre as coordenadas de imagem, considerando o modelo definido no Capítulo III.

Equações de Injunção:

As equações de injunção correspondem a restrições impostas aos parâmetros, tomando-se como base a qualidade de seus valores iniciais. Foram aplicados como injunções no processo:

- Injunções de peso:

Os parâmetros de orientação interior e exterior, e as coordenadas de pontos de controle, podem ser tratados como injunções de peso, de acordo com suas precisões estabelecidas.

- Modelos de erros do GPS/INS:

Os modelos de erros do sistema de georreferenciamento direto são formados por parâmetros que modelam os desvios de trajetória do sistema GPS/INS (*shift*, *drift*), conforme mostra a Figura 46. Estes parâmetros absorvem deslocamentos lineares e derivas proporcionais ao tempo decorrente na faixa de vôo, onde a aeronave se desloca de

forma linear sem movimentos de correção. Deste modo, é calculado um conjunto destes parâmetros por faixa de vôo. Durante o vôo fotogramétrico, manobras de calibração do sistema GPS/INS, como curvas com grande inclinação e manobras na forma de oito, são executadas para minimizar o acúmulo destes erros.

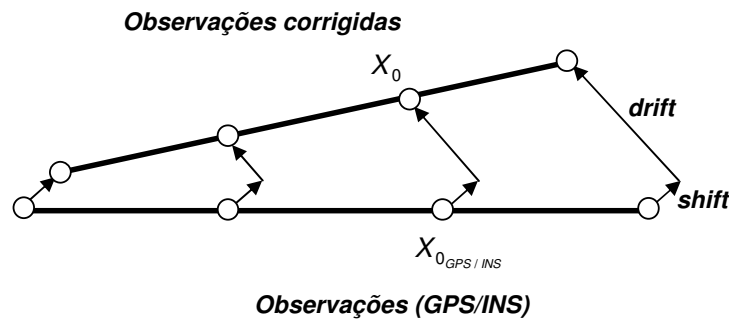


Figura 46: Parâmetros de orientação exterior corrigidos dos parâmetros shift e drift (Adaptado de DORSTEL et al, 2001).

$$\begin{aligned}
 X_{GPS(i)} - X_{0(i)} - shift_{X(s)} - \Delta t(i) * drift_{X(s)} &= 0 \\
 Y_{GPS(i)} - Y_{0(i)} - shift_{Y(s)} - \Delta t(i) * drift_{Y(s)} &= 0 \\
 Z_{GPS(i)} - Z_{0(i)} - shift_{Z(s)} - \Delta t(i) * drift_{Z(s)} &= 0 \\
 \omega_{INS(i)} - \omega_i - shift_{\omega(s)} - \Delta t(i) * drift_{\omega(s)} &= 0 \\
 \varphi_{INS(i)} - \varphi_i - shift_{\varphi(s)} - \Delta t(i) * drift_{\varphi(s)} &= 0 \\
 \kappa_{INS(i)} - \kappa_i - shift_{\kappa(s)} - \Delta t(i) * drift_{\kappa(s)} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

com:

$X_{GPS(i)}, Y_{GPS(i)}, Z_{GPS(i)}$: observações de posição do GPS/INS para a exposição i ;

$X_{0(i)}, Y_{0(i)}, Z_{0(i)}$: coordenadas do centro perspectivo na exposição i ;

$shift_{X,Y,Z,\omega,\varphi,\kappa(s)}$: parâmetros de erro de deslocamento nas informações de posição e atitude para a faixa s ;

$drift_{X,Y,Z,\omega,\varphi,\kappa(s)}$: parâmetros de erro de deriva, em função do tempo (Δt), nas informações de posição e atitude para a faixa s ;

$\omega_{INS(i)}, \varphi_{INS(i)}, \kappa_{INS(i)}$: observações de atitude do INS para a exposição i ;

$\omega_{(i)}, \varphi_{(i)}, \kappa_{(i)}$: parâmetros de atitude da câmara na exposição i ;

Nos métodos desenvolvidos são consideradas três abordagens para o tratamento do modelo de erros do sistema GPS/INS. Estas abordagens foram implementadas no programa de calibração desenvolvido.

- No caso da calibração terrestre, onde não se tem disponível os sensores de orientação direta, os parâmetros *shift*, e *drift* são desconsiderados na calibração;
- Quando se tem disponível somente o GPS a bordo da aeronave, somente as três primeiras equações são consideradas no processo. Neste caso, seis parâmetros ($shift_x, shift_y, shift_z, drift_x, drift_y, drift_z$) são calculados por faixa no ajuste em bloco;
- No caso mais completo, quando se utiliza o sistema GPS/INS, todas as seis equações apresentadas são consideradas no processo de fototriangulação com parâmetros adicionais. Para este caso, doze parâmetros ($shift_x, shift_y, shift_z, shift_\omega, shift_\phi, shift_\kappa, drift_x, drift_y, drift_z, drift_\omega, drift_\phi, drift_\kappa$) são calculados por faixa de voo.

o Orientação relativa entre as câmaras:

A metodologia desenvolvida considera a formação de equações de injunção a partir dos elementos de orientação exterior das duas câmaras, levando-se em consideração que a orientação relativa se mantém fixa ao longo das aquisições, desde que se assuma que o suporte de câmaras é fisicamente estável, conforme projetado. Esta metodologia foi implementada em uma dissertação de mestrado desenvolvida por Bazan (2008).

Para maior esclarecimento, a Figura 47 mostra o arranjo dual das câmaras na plataforma de coleta.

Os elementos que definem a orientação relativa entre as câmaras são compostos pelos ângulos de rotação entre as câmaras $\Delta\omega$, $\Delta\phi$ e $\Delta\kappa$ e pela distância D entre os centros perspectivos (CP's) das câmaras. Conforme definido em projeto e apresentado na Figura 47, as câmaras estão dispostas uma de frente a outra e com uma inclinação na ordem de 18° em relação a vertical. Nestas condições, o ângulo $\Delta\kappa$ possui um valor aproximado de 180° e o ângulo $\Delta\omega$ 36° . Já o ângulo $\Delta\phi$ é praticamente nulo, uma vez que as câmaras estão alinhadas nesta direção. A distância D entre os CP's é a resultante das componentes de medida nas três direções, definida em 11 cm no projeto.

Os ângulos de orientação relativa (Δk , $\Delta\varphi$ e $\Delta\omega$) e a distância D entre os CPs das câmaras são calculados em função dos elementos de orientação exterior das câmaras 1 e 2. Por convenção, adotou-se a câmara 1 como câmara da direita (d) e o CP da câmara 1 como origem local do sistema, e a câmara 2 como câmara da esquerda (e):

$$R_R = R_{C_1} (R_{C_2})^{-1} \quad (29)$$
$$D_i = \sqrt{(X_0^e - X_0^d)^2 + (Y_0^e - Y_0^d)^2 + (Z_0^e - Z_0^d)^2}$$

com:

R_R : Matriz de orientação relativa, definida em função das rotações ($\Delta\omega$, $\Delta\varphi$, Δk);

R_{C_1} : Matriz de orientação exterior da câmara 1 (câmara da direita);

$(R_{C_2})^{-1}$: Inversa da matriz de orientação exterior da câmara 2 (câmara da esquerda);

D : Distância entre os centros perspectivos das câmaras.

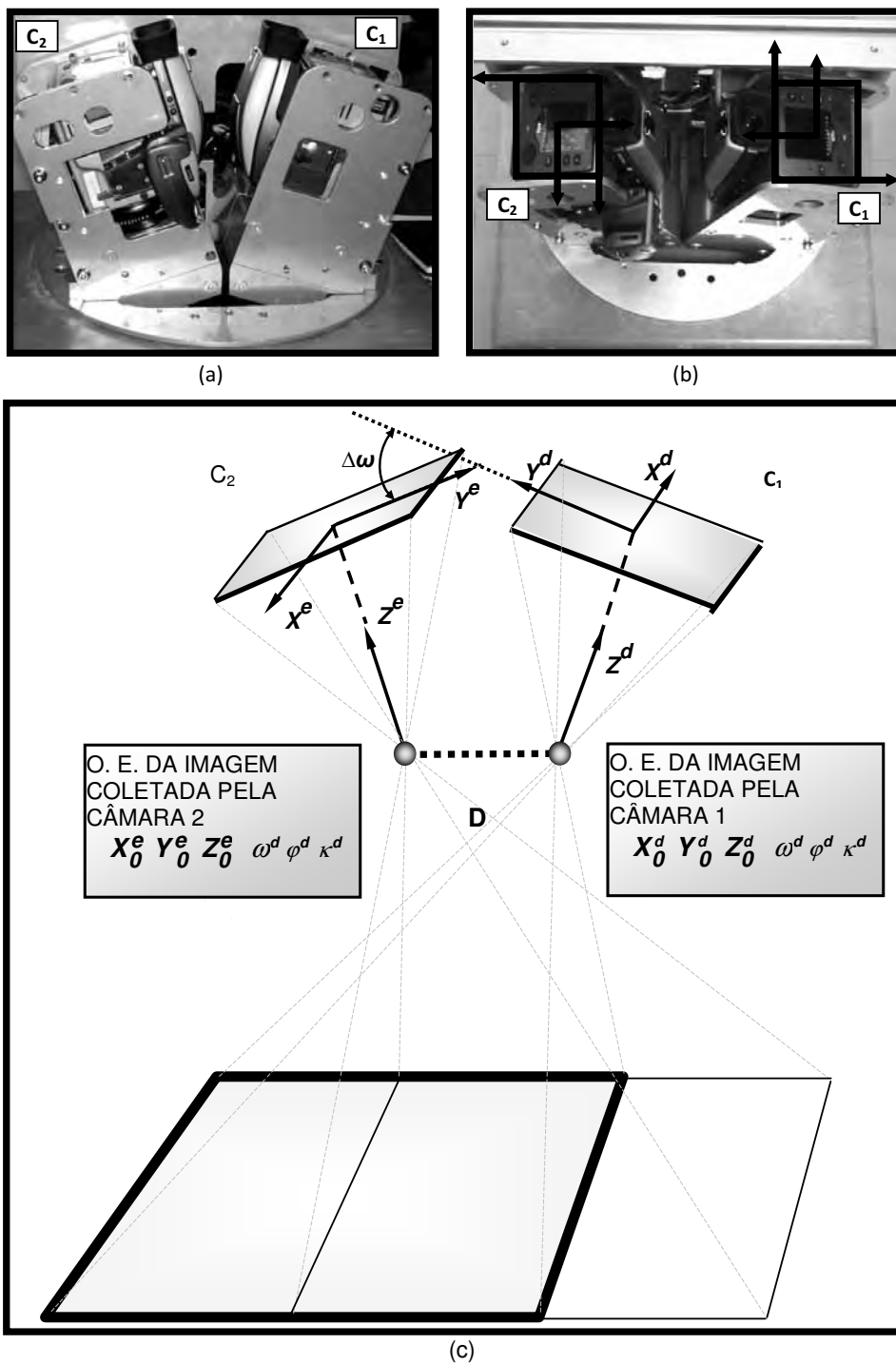


Figura 47: Arranjo dual do sistema SAAP: (a) vista lateral, (b) vista superior, (c) Geometria de aquisição das imagens (Bazan, 2008).

O desenvolvimento das equações de injunções pressupõe que a orientação relativa entre as câmaras se mantém fixa ao longo de n aquisições realizadas com o arranjo dual. As equações de injunções são derivadas partindo-se da condição de que a orientação relativa entre duas aquisições são iguais para um sistema fisicamente estável, ou seja:

$$R_R^i - R_R^{i+1} = 0 \quad (30)$$

$$D_i^2 - D_{i+1}^2 = 0 \quad (31)$$

As Equações 30 e 31 permitem escrever 4 equações de injunções para cada par de aquisições, sendo que três equações independentes podem ser extraídas a partir do relacionamento das matrizes de orientação relativa (Equação 30), e uma quarta equação extraída do relacionamento das distâncias entre os CPs (Equação 31). Para n aquisições feitas com o arranjo dual, $n-1$ relacionamentos independentes podem ser considerados mediante as Equações 30 e 31, o que resulta em um total de $(n-1) \times 4$ equações de injunções no ajustamento. As matrizes de rotação R_1^i e R_2^i referentes às câmaras 1 e 2 na aquisição i são dadas por:

$$R_1^i = \begin{bmatrix} r_{11}^d & r_{12}^d & r_{13}^d \\ r_{21}^d & r_{22}^d & r_{23}^d \\ r_{31}^d & r_{32}^d & r_{33}^d \end{bmatrix}^{(i)} \quad \text{e} \quad R_2^i = \begin{bmatrix} r_{11}^e & r_{12}^e & r_{13}^e \\ r_{21}^e & r_{22}^e & r_{23}^e \\ r_{31}^e & r_{32}^e & r_{33}^e \end{bmatrix}^{(i)} \quad (32)$$

Como as matrizes de rotação são ortogonais, a inversa de R_2^i é dada pela sua transposta. Assim sendo, a partir das Equações 30 e 31, obtém-se a matriz de orientação relativa e a equação de distância para a aquisição i , em função dos parâmetros de orientação exterior das câmaras 1 e 2, que correspondem as câmaras da direita e da esquerda, respectivamente:

$$R_R^i = \begin{bmatrix} (r_{11}^d r_{11}^e + r_{12}^d r_{12}^e + r_{13}^d r_{13}^e) & (r_{11}^d r_{21}^e + r_{12}^d r_{22}^e + r_{13}^d r_{23}^e) & (r_{11}^d r_{31}^e + r_{12}^d r_{32}^e + r_{13}^d r_{33}^e) \\ (r_{21}^d r_{11}^e + r_{22}^d r_{12}^e + r_{23}^d r_{13}^e) & (r_{21}^d r_{21}^e + r_{22}^d r_{22}^e + r_{23}^d r_{23}^e) & (r_{21}^d r_{31}^e + r_{22}^d r_{32}^e + r_{23}^d r_{33}^e) \\ (r_{31}^d r_{11}^e + r_{32}^d r_{12}^e + r_{33}^d r_{13}^e) & (r_{31}^d r_{21}^e + r_{32}^d r_{22}^e + r_{33}^d r_{23}^e) & (r_{31}^d r_{31}^e + r_{32}^d r_{32}^e + r_{33}^d r_{33}^e) \end{bmatrix}^{(i)} \quad (33)$$

$$D_i = \sqrt{(X_0^{e(i)} - X_0^{d(i)})^2 + (Y_0^{e(i)} - Y_0^{d(i)})^2 + (Z_0^{e(i)} - Z_0^{d(i)})^2} \quad (34)$$

Da mesma forma como foi feito para a aquisição i , realiza-se o cálculo da matriz de orientação relativa R_R^{i+1} e da distância D_{i+1} , referentes à aquisição $i+1$, e assim por diante. Com base nas restrições apresentadas pelas equações 30 e 31, quatro equações de injunções são definidas:

$$G_1 = (r_{21}^d r_{11}^e + r_{22}^d r_{12}^e + r_{23}^d r_{13}^e)^{(i)} - (r_{21}^d r_{11}^e + r_{22}^d r_{12}^e + r_{23}^d r_{13}^e)^{(i+1)} = 0 \quad (35)$$

$$G_2 = (r_{31}^d r_{11}^e + r_{32}^d r_{12}^e + r_{33}^d r_{13}^e)^{(i)} - (r_{31}^d r_{11}^e + r_{32}^d r_{12}^e + r_{33}^d r_{13}^e)^{(i+1)} = 0 \quad (36)$$

$$G_3 = (r_{31}^d r_{21}^e + r_{32}^d r_{22}^e + r_{33}^d r_{23}^e)^{(i)} - (r_{31}^d r_{21}^e + r_{32}^d r_{22}^e + r_{33}^d r_{23}^e)^{(i+1)} = 0 \quad (37)$$

$$G_4 = (X_0^{e(i)} - X_0^{d(i)})^2 + (Y_0^{e(i)} - Y_0^{d(i)})^2 + (Z_0^{e(i)} - Z_0^{d(i)})^2 - \\ (X_0^{e(i+1)} - X_0^{d(i+1)})^2 - (Y_0^{e(i+1)} - Y_0^{d(i+1)})^2 - (Z_0^{e(i+1)} - Z_0^{d(i+1)})^2 = 0 \quad (38)$$

As Equações 35 a 38 foram obtidas com base nos três elementos referentes a triangular inferior das respectivas matrizes de orientação relativa, já que dos nove elementos de cada matriz, apenas três são linearmente independentes.

Para garantir rigidez e confiabilidade ao sistema dual e a metodologia de injunção de orientação relativa, definiu-se por meio de medidas diretas as posições dos centros perspectivos das duas câmaras Hasselblad. Com estas posições materializadas, a medida de distância entre os CP's pode ser fixada com alta precisão.

As informações do sistema de lentes e da posição do plano focal das câmaras foram obtidas por meio de reuniões com técnicos da fábrica da Hasselblad na Dinamarca. Diante destas informações, as posições dos centros ópticos nas lentes foram obtidas. Após isso, estas posições foram extrapoladas para que fossem demarcadas nos exoesqueletos das câmaras. Com o auxílio de um paquímetro, a medida de distância entre os CP's foi efetuada. As operações de demarcações e medidas foram realizadas duas vezes, por dois operadores distintos, para garantir a qualidade do resultado. O valor da medida de distância obtido foi de 11,12 cm (Figura 48).



Figura 48: Medida de distância entre os centros perspectivos das câmaras na plataforma de coleta do sistema SAAPI.

A partir desta medida física, pode-se ter ainda equações de distância como injunções ao processo, tendo em vista que a distância entre os CP's na plataforma de coleta foram determinadas com precisão e confiabilidade, por processos diretos de medição. Bazan (2008) descreve que para utilizar esta restrição no ajustamento, a informação de distância é aplicada ao primeiro par de imagens considerado no processo de calibração. Na seqüência, o valor desta injunção é aplicado aos demais pares de imagens, com o uso da equação 38, levando-se em conta o peso atribuído em função da informação de instabilidade do sistema.

Parâmetros:

São considerados como parâmetros no processo de ajustamento:

- Parâmetros de orientação exterior de cada imagem;
- Coordenadas no espaço objeto de cada ponto medido nas imagens;
- Parâmetros de orientação interior de cada câmara. Pode-se definir o conjunto de parâmetros de OI desejado por câmara;
- Parâmetros de erros do GPS/INS para cada faixa de vôo, quando usado.

$$X_a = [\omega_1 \ \varphi_1 \ \kappa_1 \ X_{0_1} \ Y_{0_1} \ Z_{0_1} \ \dots \ \omega_n \ \varphi_n \ \kappa_n \ X_{0_n} \ Y_{0_n} \ Z_{0_n} \ X_1 \ Y_1 \ Z_1 \ \dots \ X_p \ Y_p \ Z_p, \\ \text{par}OI_1, \dots, \text{par}OI_c, \text{par erros GPS/INS}_1, \dots, \text{par erros GPS/INS}_s]^T$$

sendo:

n – número de imagens para todas as câmaras consideradas;

p – número total de pontos medidos nas imagens;

c – número de câmaras;

s – número de faixas de vôo.

Os valores das precisões referentes aos parâmetros a serem ajustados no processo são pré-definidos de acordo com a qualidade de seus valores absolutos:

- Parâmetros de orientação exterior: são definidos a partir da qualidade dos sensores de posicionamento e atitude (GPS/INS) usados. Se o sistema GPS/INS não for considerado no processo, como no caso da calibração terrestre, os parâmetros são considerados como livres no ajustamento (valores de desvio padrão elevados), e apenas valores aproximados são atribuídos aos parâmetros;
- Coordenadas dos pontos medidos no espaço objeto: têm-se dois casos. Se o ponto for de controle, o desvio padrão é definido pela qualidade de determinação de suas coordenadas, que em geral, é realizada por GPS ou técnicas de topografia. Se o ponto não tiver coordenada de controle associada a ele, este ponto é considerado como fotogramétrico. Neste caso, suas coordenadas aproximadas são calculadas no programa e estes pontos passam a ser considerados como livres no ajustamento;
- Parâmetros de orientação interior: no caso da calibração terrestre, os parâmetros são considerados livres e são calculados no ajustamento. Na fototriangulação com parâmetros adicionais, as precisões dependem do tratamento e do conjunto de parâmetros considerados no processo;
- Parâmetros de orientação relativa: são definidos a partir da geometria das câmaras no suporte. Na calibração terrestre, estes parâmetros são ajustados e, portanto, podem ser definidos com precisão na etapa de fototriangulação com parâmetros adicionais;

- Parâmetros de erros do GPS/INS: quando considerados na fototriangulação com parâmetros adicionais, são tratados como livres no ajustamento, e absorvem os erros de trajetória dos sensores de orientação direta.

Observações:

As observações neste processo de ajustamento correspondem às coordenadas bidimensionais dos pontos medidos nas imagens, para todas as câmaras consideradas:

$$L_b = [x_1 \ y_1 \ \dots \ x_p \ y_p]^T$$

Os desvios padrão das observações correspondem às precisões das medidas dos pontos nas imagens, podendo-se inclusive ter medições com qualidade sub-pixel.

Para os casos em que as equações de injeção de orientação relativa são consideradas na calibração, o vetor de observações é reordenado de forma que as observações associadas às imagens pertencentes à mesma estação sejam agrupadas. Ou seja, as observações relativas às imagens que foram adquiridas ao mesmo tempo na plataforma de coleta são automaticamente agrupadas pelo programa CMC no vetor de observações, o que permite uma melhor estrutura de dados na matriz de equações normais. A associação das observações é realizada a partir das informações de tempo das imagens, que são sincronizadas na mesma escala de tempo (tempo GPS):

$$L_b = [\{ (x_1 \ y_1)_1^{(1)}, \dots, (x_i \ y_i)_1^{(1)}, \dots, (x_1 \ y_1)_1^{(c)}, \dots, (x_i \ y_i)_1^{(c)} \}_{E_1}, \dots, \{ (x_1 \ y_1)_n^{(1)}, \dots, (x_i \ y_i)_n^{(1)}, \dots, (x_1 \ y_1)_n^{(c)}, \dots, (x_i \ y_i)_n^{(c)} \}_{E_n}]^T$$

sendo:

i : número de pontos da imagem n ;

E_1, \dots, E_n correspondem às estações de coleta.

Considerações sobre o programa computacional desenvolvido:

O programa foi desenvolvido de forma que se possam ser realizados os estudos, os processamentos e as análises relativos à calibração das câmaras e sistemas multi-câmaras.

O programa permite a calibração de até três câmaras simultaneamente, processadas de forma independente ou considerando injunções de orientação relativa. Deste modo, o programa foi denominado CMC (Calibração Multi-Câmaras). Para o caso aéreo e que se considere o uso de sistema de georreferenciamento direto, equações que modelam os erros de trajetória do sistema GPS/INS podem também ser considerados no processamento, conforme discutido no tópico anterior. A estrutura básica de funcionamento do CMC é apresentada na Figura 49.

No arquivo de projeto (*param.prj*) se definem os nomes dos arquivos de entrada e os dados que definem o projeto, como o número de câmaras, opção de georreferenciamento direto, dados estatísticos do ajustamento, entre outros. O arquivo com extensão *.iop* contém os dados de orientação interior das câmaras. Neste arquivo pode-se definir o conjunto de parâmetros de OI que se deseja calcular no processo, atribuindo-se a precisão desejada. Destaca-se que é possível selecionar qualquer combinação de parâmetros de OI por câmara, permitindo flexibilidade no processo de calibração.

O arquivo de orientação exterior (*.eop*) contém os parâmetros de orientação exterior das câmaras com os respectivos desvios-padrão. Neste arquivo se define ainda se a injunção relativa será considerada e, sobre quais câmaras se deseja aplicar esta injunção. Já nos arquivos com extensão *.gcp* e *.img* são introduzidas as coordenadas dos pontos de apoio no espaço objeto e as coordenadas dos pontos no espaço imagem, respectivamente.

O programa CMC foi desenvolvido em linguagem C/C++, estruturado em classes e estruturas de dados. O programa foi desenvolvido com recursos de otimização computacional, contemplando um método de inversão de matrizes utilizando Cholesky, função que foi desenvolvida pelo professor Júlio Hasegawa do Departamento de Cartografia

da FCT/UNESP. Além disso, a matriz das equações normais é montada de forma dinâmica em função das derivadas parciais em relação aos parâmetros considerados.

O arquivo *relatório.rep* corresponde ao arquivo de saída do programa, onde são impressos os parâmetros e observações ajustados e dados estatísticos do processo.

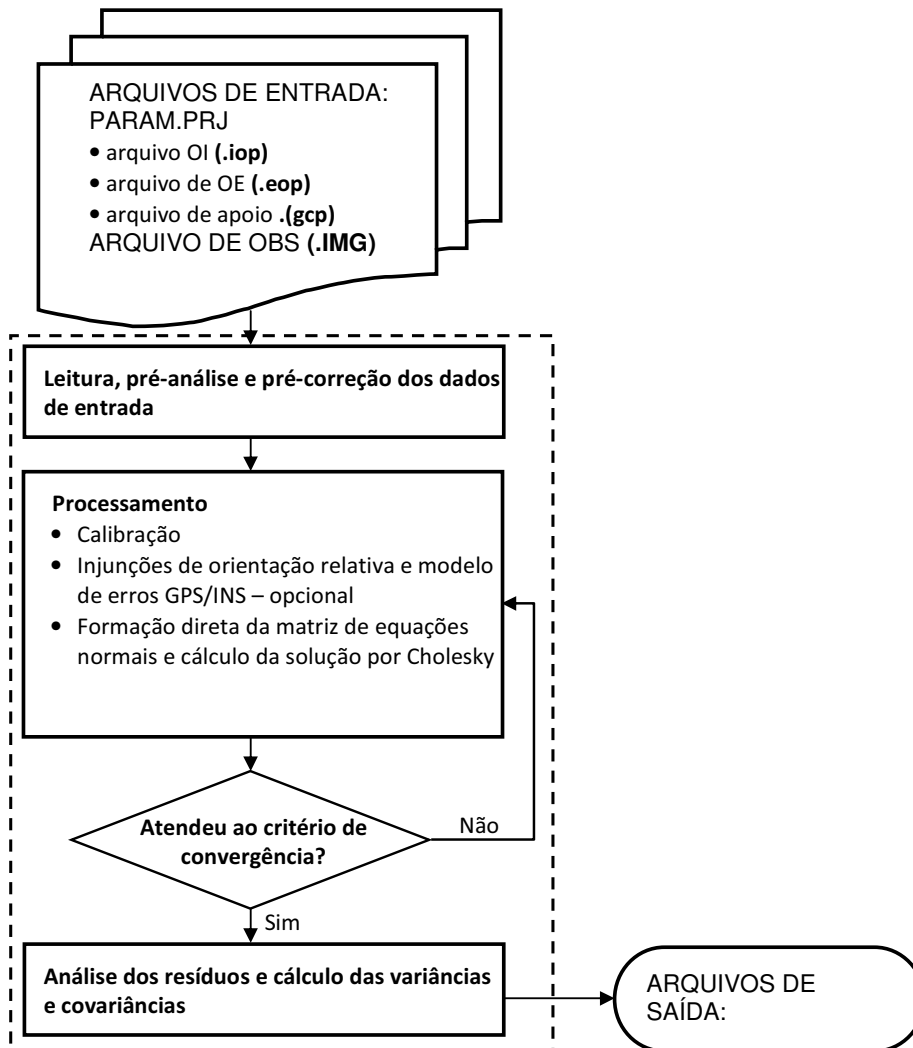


Figura 49: Estrutura de funcionamento do programa CMC.

CAPÍTULO VI

EXPERIMENTOS E RESULTADOS

6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão apresentados testes aéreos realizados com o sistema de aquisição desenvolvido, testes de calibração das câmaras digitais do sistema e estudos de fototriangulação com parâmetros adicionais, considerando blocos de imagens adquiridos com o SAAPI.

Até o presente momento foram realizados mais de dez testes aéreos desde março de 2006, considerando variadas configurações de coleta, interfaces eletrônicas e equipamentos utilizados. Para exemplificar, dois experimentos serão apresentados na Seção 6.2, de forma a sintetizar a evolução de desenvolvimento do sistema.

Na Seção 6.3 é apresentada uma análise experimental do recurso de correção de distorção das lentes do software Flexcolor da Hasselblad, presente a partir da versão 4.8.1 do software para os modelos de câmara digital Hasselblad H3D. Este recurso, que é optativo, aplica uma reamostragem na imagem com correção do efeito de distorção radial simétrica da lente Hasselblad. Foram realizados experimentos com duas câmaras Hasselblad H3D-39 Megapixels no campo de calibração da FCT/UNESP, para avaliar o impacto desta correção sobre as imagens em aplicações de Fotogrametria. É relevante destacar que em lentes de abertura angular grande, onde a distorção nas bordas das imagens é mais influente, esta pré-correção nas imagens pode ser relevante, tendo em vista que alguns softwares comerciais de Fotogrametria não modelam corretamente a distorção das lentes das imagens nos módulos de geração de Modelos Digitais de Terreno.

Na seqüência, estudos de fototriangulação com parâmetros adicionais utilizando cinco blocos de imagens aéreas coletados com o sistema SAAPI são apresentados na Seção 6.4. Estes blocos de imagens foram adquiridos em configurações diferentes, no que

se refere à geometria de aquisição, disponibilidade de dados de georreferenciamento direto e características da área imageada, de forma que se possa realizar análises em distintas condições experimentais.

6.2 TESTES COM O SISTEMA DE COLETA

6.2.1 Teste preliminar sobre a rodovia Ayrton Senna

Em Setembro de 2006 realizou-se um experimento preliminar com o sistema de aquisição de imagens. A área de estudo selecionada foi sobre a rodovia Ayrton Senna, nas proximidades da cidade de São José dos Campos – SP. Este teste foi realizado no período em que a aeronave se encontrava em processo de homologação junto ao CTA (Centro Técnico Aeroespacial).

Neste teste o sistema de aquisição de imagens, com as câmaras Hasselblad na configuração dual e a câmara infravermelha, foi instalado na aeronave da empresa Engemap, conforme mostra a Figura 50.



Figura 50: Sistema SAAPI instalado na aeronave para o voo teste sobre a rodovia Ayrton Senna, São José dos Campos - SP.

Conforme apresentado na Figura 50, tratava-se da primeira versão do sistema, que contava com um notebook para o gerenciamento e controle em voo, ausência de sistema GPS de dupla-freqüência para o registro de eventos e um suporte preliminar para a fixação das câmaras. O objetivo do teste foi verificar o comportamento do sistema em voo, no que se refere à:

- **Efeitos de vibração:** verificou-se que o computador notebook e as unidades de armazenamento das câmaras Hasselblad (*image banks*) se comportaram de forma instável em situações de turbulências e vibrações de alta freqüência, os quais apresentaram erros de leitura e gravação de dados, e desligamento geral dos dispositivos;
- **Alimentação de energia:** além dos problemas de vibração, o uso do notebook gerou sobrecarga de energia no sistema. Isso porque a alimentação de energia do computador era de 110-240V, e o inversor utilizado para converter para 12V demandou maior potência do sistema de alimentação de energia da aeronave;
- **Suporte de câmaras:** nesta versão preliminar do suporte as câmaras Hasselblad foram fixadas em apenas um ponto na parte inferior do corpo da câmara. Verificou-se neste experimento que o grau de vibração do sistema não podia ser ignorado e que este tipo de fixação singular não garantiria a rigidez geométrica da câmara e a estabilidade da orientação relativa entre elas na plataforma de coleta, somando-se o fato que estas categorias de câmaras não foram projetadas para aplicações fotogramétricas.

A partir destas constatações foi possível projetar novas soluções até que se chegasse à configuração do sistema que foi descrita no Capítulo V. O computador notebook foi substituído por um computador modelo mini-PC, que possui maior robustez na montagem interna e alimentação direta de energia 12V. Além disso, uma fonte veicular (6 – 24V) e um disco rígido de estado sólido (SSD – *Solid State Disk*) foram integrados ao computador, o que garantiu confiabilidade ao sistema de controle e armazenamento de dados.

As unidades de armazenamento das imagens e o mini-computador foram instalados em uma plataforma suspensa por atenuadores de vibração. Com relação ao

suporte de câmaras, outros modelos foram desenvolvidos até que se chegasse ao utilizado atualmente, que dispõe de exoesqueletos individuais e travamentos verticais e laterais que garantem a estabilidade da geometria interna e da orientação relativa das câmaras na plataforma de coleta.

Os dados e imagens coletados neste teste preliminar foram processados e analisados posteriormente. Conforme apresentado em Ruy et al (2007) e Sartori et al (2007), os resultados obtidos mostraram que este tipo de câmara fornece imagens com alta qualidade geométrica e radiométrica, e o uso de imagens infravermelhas aumenta a confiabilidade na identificação e classificação temática de alvos no terreno.

6.2.2 Projeto Presidente Prudente

Este projeto foi realizado em Outubro de 2008 sobre a região da cidade de Presidente Prudente – SP, para a coleta de imagens e dados de georreferenciamento direto para projetos de pesquisa desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisa em Sensoriamento Remoto da FCT/UNESP. Foram realizadas duas seções de vôo em dois dias.

Na primeira seção, de caráter mais experimental, o sistema foi configurado com as câmaras Hasselblad no modo dual (convergente) e a câmara infravermelha integrada ao sistema. Todo o sistema de disparo, sincronismo, alimentação de energia e georreferenciamento direto desenvolvido foi utilizado nesta coleta (Ver Capítulo V), conforme apresentado na Figura 51. Foram coletadas 87 imagens na região da UNESP, dispostas em quatro faixas de vôo, sendo duas faixas paralelas na direção norte-sul e as outras duas cruzadas na direção leste-oeste. A altura de vôo foi na ordem de 1100 m, proporcionando um elemento de resolução no terreno de 15 cm na direção nadir.



Figura 51: Sistema SAAPI instalado na aeronave para o voo em Presidente Prudente.

Em comparação com o sistema originalmente montado nos testes iniciais (Figura 50), verificou-se que o sistema atual é mais robusto e confiável, além de possibilitar maior autonomia em voo. O suporte atual permitiu o travamento mais rigoroso das câmaras na plataforma de coleta, com desenvolvimentos especiais que promovem a estabilidade da geometria de aquisição das imagens. O sistema de disparo, sincronismo e registro dos eventos é totalmente autônomo, referenciado ao sistema de tempo do GPS.

O sistema de alimentação de energia permite que todos os equipamentos estejam carregados durante toda a missão, sem a necessidade de uso de baterias individuais.

Na Seção 6.4 apresentam-se estudos de fototriangulação com parâmetros adicionais com este bloco de imagens coletadas de modo dual com dados de georreferenciamento direto.

Para a realização da outra seção de voo, o sistema foi configurado com apenas uma câmara Hasselblad e a câmara infravermelha (opção B – Tabela 10). O importante é que para alterar a configuração de coleta, a câmara não é retirada do exoesqueleto de alumínio, permitindo que a orientação interior determinada na calibração terrestre seja mantida.

Neste voo foram coletadas 1050 imagens distribuídas em vinte e duas faixas de voo, sendo vinte faixas paralelas e duas cruzadas, conforme mostra a Figura 52. A altura de voo foi de 1860 m, resultando em um elemento de resolução no terreno de 25 cm.



Figura 52: Fotoíndice do voo realizado na região de Presidente Prudente com o sistema SAAPÍ.

Esta seção de voo teve duração de quatro horas e a área coberta foi de aproximadamente 480 km², compreendendo os municípios de Presidente Prudente, Álvares Machado, Regente Feijó e Pirapozinho. Neste voo verificou-se que o comportamento do sistema se mostrou estável ao longo de toda a coleta, com todo o funcionamento do sistema de disparo, sincronismo, registro de eventos e armazenamento dos dados operando conforme projetado.

6.3 ANÁLISES DE CALIBRAÇÃO COM O MODELO DE CORREÇÃO DAS LENTES DO SOFTWARE HASSELBLAD FLEXCOLOR

O software *Flexcolor* da Hasselblad gerencia a transferência das imagens das unidades de armazenamento das câmaras para o computador. As imagens são

automaticamente transferidas no formato bruto, cuja extensão é (.fff), e podem ser salvas nos formatos (tif) e (jpg) a partir do software Flexcolor. Além disso, o software permite algumas opções de pré-processamento após a importação das imagens das unidades de armazenamento, como ajustes de histograma, brilho e contraste. Na nova versão do software (versão 4.8), há uma ferramenta que possibilita a correção de distorção das lentes e correção de vinhete para câmaras Hasselblad modelos H3D.

Estas correções, segundo o fabricante, foram implementadas no software *Flexcolor* com base no conhecimento de informações relativas à fabricação das lentes. O software possui mais de 30000 mapas de lentes, que são automaticamente reconhecidas quando a câmara é conectada ao computador (*firmware* da lente). A correção da distorção pode ou não ser aplicada sobre a imagem antes de salvá-la para o formato de saída (tif ou jpg). Trata-se de uma reamostragem na imagem para a correção do efeito de distorção radial.

Considerando o recurso de correção de distorção das lentes presente no software Flexcolor, alguns testes com o programa de calibração (CMC) foram desenvolvidos. Dois conjuntos de 16 imagens foram adquiridos sobre o campo de calibração da FCT/UNESP com duas câmaras Hasselblad (um conjunto por câmara). As imagens foram transferidas para o computador e foram gerados quatro conjuntos de imagens salvas no formato tif, conforme descrito abaixo:

- A. Imagens da câmara 1 sem a correção de distorção das lentes;
- B. Imagens da câmara 1 com a correção de distorção das lentes;
- C. Imagens da câmara 2 sem a correção de distorção das lentes;
- D. Imagens da câmara 2 com a correção de distorção das lentes;

As coordenadas de imagem dos alvos do campo de calibração foram medidas no software MID – Monocomparador de Imagens Digitais (desenvolvido por Mario L. L. Reiss em sua dissertação de Mestrado: Reiss, 2002) com precisão subpixel. Foram considerados 54 alvos de controle e mais de 20 pontos fotogramétricos presentes no campo. Os quatro conjuntos de imagens foram processados no programa CMC, e os parâmetros estimados encontram-se apresentados na Tabela 12. Foram considerados os parâmetros relacionados a distância focal (f), coordenadas do ponto principal (x_0, y_0) e os coeficientes k_1 e k_2 de distorção radial simétrica. A partir de testes de calibração realizados, verificou-se que

os parâmetros relativos ao terceiro termo da distorção radial simétrica (k_3), distorção descentrada (p_1, p_2) e de afinidade (a, b) não apresentaram valores significativos, com desvios-padrão de mesma magnitude aos parâmetros.

Tabela 12: Parâmetros de orientação interior para as duas câmaras Hasselblad.

	A	B	C	D
f (mm)	50,2220 +/- 0,0066	49,8528 +/- 0,0056	50,0651 +/- 0,0135	49,8132 +/- 0,0081
x_0 (mm)	-0,0192 +/- 0,0020	-0,0171 +/- 0,0015	-0,1354 +/- 0,0050	-0,2642 +/- 0,0032
y_0 (mm)	-0,0367 +/- 0,0022	-0,0060 +/- 0,0018	-0,2007 +/- 0,0062	0,0123 +/- 0,0034
k_1 (mm⁻²)	-2,6932 * 10⁻⁵ +/- 1,8258 * 10 ⁻⁷	-2,9636 * 10⁻⁸ +/- 9,9408 * 10 ⁻⁸	-2,5597 * 10⁻⁵ +/- 3,2667 * 10 ⁻⁷	-5,5462 * 10⁻⁷ +/- 1,3213 * 10 ⁻⁷
k_2 (mm⁻⁴)	1,0443 * 10⁻⁸ +/- 4,1523 * 10 ⁻¹⁰	5,1208 * 10⁻¹⁰ +/- 1,4523 * 10 ⁻¹⁰	7,7913 * 10⁻⁹ +/- 7,0253 * 10 ⁻¹⁰	8,5352 * 10⁻¹⁰ +/- 1,5618 * 10 ⁻¹⁰

Para apresentar graficamente os resultados, a Figura 53 traz as curvas de distorção, com e sem a correção de distorção, para as câmaras 1 (Figura 53a) e 2 (Figura 53b). As curvas foram calculadas a partir dos valores dos coeficientes de distorção radial simétrica (k_1, k_2) mostrados na Tabela 12. Além disso, apresenta-se também (Figura 53c) a curva de distorção obtida no documento com as especificações técnicas da lente (HC 50) (“calibração de fábrica”), disponível no endereço eletrônico do fabricante (HC50, 2008).

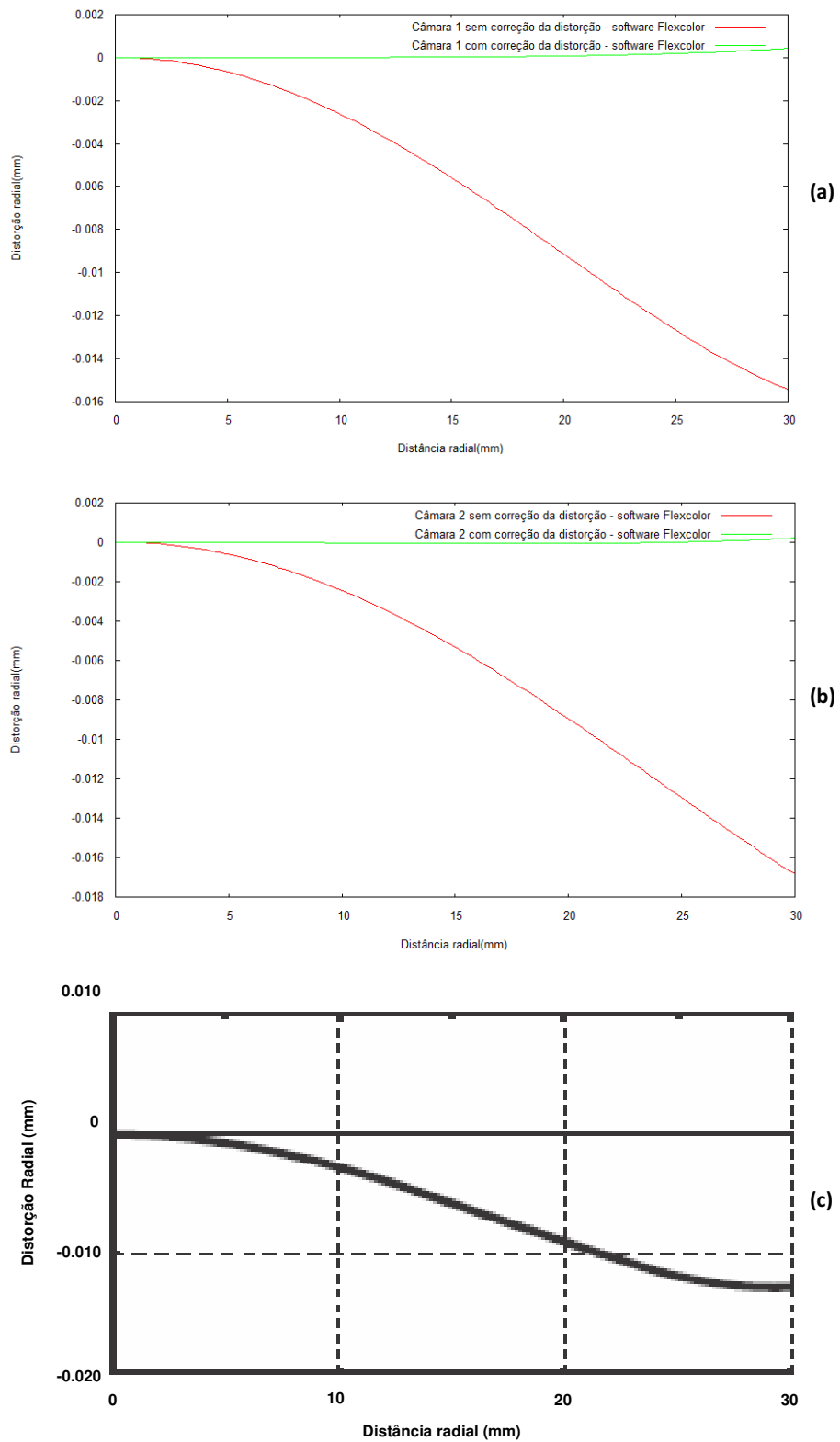


Figura 53: Curvas de distorção das lentes: (a) curvas da câmara 1 com e sem a correção de distorção do software Flexcolor, (b) curvas da câmara 2 com e sem a correção de distorção do software Flexcolor, (c) curva de distorção definida pelo fabricante da lente (Fonte: www.Hasselbladusa.com).

Com os resultados apresentados pode-se verificar que os valores dos coeficientes de distorção radial (k_1, k_2) foram reduzidos a valores residuais quando considerada a correção de distorção óptica do software Flexcolor (colunas A em relação a B, e C em relação a D – Tabela 12). Conforme mostra a Figura 53, para a distância radial igual a 30 mm (extremidades das imagens), as distorções nas imagens sem correção prévia (A e C) ficam em torno de 2,4 pixels (0,015-0,016 mm), enquanto que nas imagens pré-corrigidas (B e D) são próximas a zero (0,0003 mm – 0,04 pixel).

Verificou-se também que a curva de distorção cedida pelo fabricante (Figura 53c) apresentou comportamento similar às curvas calculadas para as imagens sem correção aplicada pelo software Flexcolor (distorção na borda em torno de 2 pixels – 0,013 mm), verificando que o mapa de lentes do software Flexcolor pôde ser utilizado para a minimização do efeito de distorção óptica nas imagens.

Como este recurso de correção da distorção é aplicada sobre as imagens, tem-se um processo de reamostragem das imagens, que produziu uma mudança de escala, conforme verificado pelos valores de distância focal resultantes, em comparação com a distância focal nominal das câmaras, que é 50,3 mm. A variação da distância focal é decorrente da mudança da curva de distorção das lentes.

Vale destacar ainda que, como a correção de distorção no software Flexcolor é realizada em relação ao centro da imagem, a posição do ponto principal, definida pelas coordenadas (x_0, y_0) , não é considerada, e seus valores de coordenadas são alterados.

Para verificar a acurácia no espaço objeto, a Tabela 13 apresenta as discrepâncias nos pontos de verificação, assim como os valores de média e Erro Médio Quadrático (EMQ) destas discrepâncias, para os testes realizados.

Tabela 13: Discrepâncias nos pontos de verificação para os testes de calibração.

		Discrepâncias nos pontos de verificação (m)				Média (m)	EMQ (m)
		102	110	116	121		
A	X	0,000	-0,001	-0,004	-0,004	-0,002	0,003
	Y	0,002	0,001	0,003	0,001	0,002	0,002
	Z	0,002	0,001	-0,005	0,000	-0,001	0,003
B	X	0,000	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	0,001
	Y	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001
	Z	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002
C	X	0,002	-0,005	-0,020	0,001	-0,005	0,010
	Y	0,006	0,001	0,009	0,002	0,004	0,006
	Z	0,002	0,000	0,009	-0,019	-0,012	0,019
D	X	0,001	-0,001	-0,007	-0,003	-0,003	0,004
	Y	0,003	0,002	0,004	0,000	0,002	0,003
	Z	0,002	0,001	-0,007	0,000	-0,001	0,004

Pelos valores apresentados na Tabela 13 verifica-se que as calibrações realizadas com as imagens corrigidas da distorção óptica pelo software Flexcolor apresentaram maior acurácia no espaço objeto. Os pontos 116 e 121, que apresentaram em alguns casos maior erro nas componentes de coordenadas, encontram-se localizados nas extremidades do campo de calibração, conforme mostra a Figura 54. Deste modo, estes pontos ficam localizados próximos as bordas das imagens, e sofreram maior influência dos efeitos de distorção óptica. Conseqüentemente, seus resíduos e seus erros no espaço objeto foram mais significativos, fundamentalmente nas imagens que não foram previamente corrigidas da distorção (A e C).



Figura 54: Distribuição dos pontos no campo de calibração da FCT/UNESP. Os pontos em destaque (circulados) correspondem aos pontos de verificação.

Para verificar se os valores obtidos nas calibrações realizadas com as imagens pré-corrigidas (Tabela 12 e Figura 53) são significativos, realizou-se uma fototriangulação no programa CMC com os mesmos conjuntos de imagens fixando os parâmetros de distância focal e coordenadas do ponto principal nos valores calculados (Tabela 12) e os coeficientes de distorção óptica (k_1, k_2) como zero. Deste modo, observaram-se os resultados no espaço objeto, a partir das discrepâncias nos pontos de verificação, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14: Discrepâncias nos pontos de verificação para os testes de Fototriangulação.

		Discrepâncias nos pontos de verificação (m)				Média (m)	EMQ (m)
		102	110	116	121		
Fototriangulação (A)	X	-0,005	-0,004	-0,051	0,028	-0,008	0,029
	Y	0,014	0,005	0,003	-0,021	0,000	0,013
	Z	0,017	0,012	0,014	0,033	0,019	0,021
Fototriangulação (B)	X	0,000	-0,001	-0,001	-0,002	-0,001	0,001
	Y	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001
	Z	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002
Fototriangulação (C)	X	0,002	-0,008	-0,100	0,028	-0,020	0,052
	Y	0,010	0,004	0,000	-0,024	-0,003	0,013
	Z	0,018	0,008	0,011	0,048	0,021	0,027
Fototriangulação (D)	X	0,001	-0,001	-0,008	-0,003	-0,003	0,004
	Y	0,003	0,002	0,004	0,000	0,002	0,003
	Z	0,002	0,001	-0,007	0,000	-0,001	0,004

A partir dos resultados apresentados na Tabela 14, em comparação com os resultados mostrados na Tabela 13, verifica-se que ao se desconsiderar a distorção óptica nas imagens pré-corrigidas (B e D) a acurácia no espaço objeto não foi prejudicada, mostrando que os valores residuais obtidos não foram significativos. Já, no caso das imagens que não foram previamente corrigidas, a distorção foi considerada significativa, uma vez que as discrepâncias nos pontos de verificação foram cerca de 6 a 7 vezes superiores aos valores apresentados na Tabela 13.

Em outra situação analisada foi considerada a distância focal nominal das câmaras Hasselblad (50,3 mm) e as coordenadas do ponto principal e distorções ópticas como nulas. Isso simula a situação em que um usuário não tem acesso à processos de calibração e dispõe apenas dos dados nominais das câmaras.

A partir destes dados, uma fototriangulação dos quatro blocos analisados foi realizada, e a Tabela 15 apresenta os resultados obtidos nos pontos de verificação.

Tabela 15: Discrepâncias nos pontos de verificação para os testes de Fototriangulação com dados nominais.

		Discrepâncias nos pontos de verificação (m)				Média (m)	EMQ (m)
		102	110	116	121		
A	X	-0,005	-0,004	-0,050	0,027	-0,008	0,029
	Y	0,015	0,006	0,002	-0,022	0,000	0,014
	Z	0,018	0,013	0,019	0,037	0,022	0,024
B	X	-0,001	-0,002	0,002	-0,016	-0,004	0,008
	Y	0,006	0,003	0,002	-0,003	0,002	0,004
	Z	0,000	0,005	0,019	0,024	0,012	0,016
C	X	0,000	-0,008	-0,101	0,016	-0,023	0,051
	Y	0,013	0,005	-0,001	-0,023	-0,001	0,013
	Z	0,013	0,010	0,016	0,059	0,025	0,032
D	X	0,004	-0,005	-0,014	-0,030	-0,011	0,017
	Y	0,011	0,005	0,007	-0,002	0,005	0,007
	Z	0,000	0,004	-0,004	0,028	0,007	0,014

Conforme já era esperado, a ausência dos valores calibrados dos parâmetros de orientação interior prejudicou a reconstrução tridimensional dos pontos no espaço objeto, conforme apresentado na Tabela 15.

A degradação de qualidade ficou em torno de 8 vezes para a câmara 1 e 4 vezes para a câmara 2 em comparação com os resultados apresentados na Tabela 13, na qual todos os valores calibrados foram considerados.

Já com relação aos valores da Tabela 14, onde somente a distorção das lentes foi desconsiderada, a degradação de qualidade sobre as imagens pré-corrigidas (B e D) ficou na ordem de 4 vezes.

Nas imagens sem correção prévia (A e C), os resultados apresentados nas Tabelas 14 e 15 foram similares. Isso pode ser explicado pelo fato do valor de distância focal nominal da câmara ser mais próximo do valor calibrado nas situações A e C, o que não ocorre com as imagens pré-refinadas que foram reamostradas e sofreram uma mudança no valor de distância focal. Percebe-se apenas uma pequena variação na componente Z para as situações A e C apresentadas na Tabela 14 em relação a Tabela 15.

Além disso, as coordenadas do ponto principal obtidas na calibração (Tabela 12) não apresentam grande magnitude, principalmente na câmara 1, fato este que não contribui para uma degradação acentuada da acurácia de pontos no espaço objeto nas situações em que estes parâmetros são desconsiderados.

6.4 ESTUDOS E ANÁLISES DE FOTOTRIANGULAÇÃO COM PARÂMETROS ADICIONAIS (FPA)

Para os estudos de fototriangulação com parâmetros adicionais (FPA), cinco conjuntos de experimentos foram realizados. O primeiro refere-se a experimentos realizados com os modelos de parâmetros adicionais disponíveis no software LPS. Os outros quatro conjuntos de testes foram realizados com o programa CMC com blocos de imagens de características distintas:

- CATANDUVA: bloco de imagens coletado com uma câmara Hasselblad H1D (22 Megapixels) na configuração vertical e sem dados de georreferenciamento direto;
- BRVIAS: voo de “corredor” (rodovia) com uma câmara Hasselblad H3D (39 Megapixels) na configuração vertical e com dados de georreferenciamento direto (GPS dupla-freqüência e registro de eventos);
- RESENDE: bloco de imagens coletado com uma câmara Hasselblad H3D (39 Megapixels) na configuração vertical e com dados de georreferenciamento direto (GPS dupla-freqüência e registro de eventos);
- PRESIDENTE PRUDENTE: bloco de imagens coletado com duas câmaras Hasselblad H3D (39 Megapixels) na configuração dual e com dados de georreferenciamento direto (GPS dupla-freqüência e registro de eventos);

6.4.1 Testes de FPA com distintos grupos de parâmetros

Nesta seção apresentam-se testes de fototriangulação de blocos de imagens adquiridos pela câmara digital Hasselblad H1D (22 Megapixels) que inicialmente integrava o sistema SAAPI. Nestes testes, os modelos de FPA foram explorados para se verificar o ganho em exatidão resultante do uso desta técnica em relação à fototriangulação por feixes de raios convencional, sem parâmetros adicionais.

Três blocos de imagens adquiridas pelo sistema SAAPI foram utilizados nos testes. Nestas coletas, o sistema SAAPI foi configurado com uma câmara Hasselblad H1D na posição nadir e sem dados de georreferenciamento direto. A Tabela 16 apresenta as informações básicas de cada um dos blocos de imagens utilizados nos testes, assim como a Figura 55 mostra a distribuição das imagens e dos pontos de apoio e verificação.

Tabela 16. Informações dos blocos de imagens.

BLOCO	Catanduva	SP-270	Ribeirão Pires
Data do voo	05/06/07	04/07/07	20/07/07
Número de imagens	76	299	160
Número de faixas	5	4	9
Aerobase (m)	865,9	432,9	432,9
Altura de voo (m)	2220	1110	1110
Base/Altura	0,29	0,29	0,29
Escala da imagem	1/45000	1/22000	1/22000
GSD (m)*	0,40	0,20	0,20
Superposição (%)	60	60	60
Varição altimétrica do terreno	4%	7%	6%
Número de pontos fotogramétricos	2028	8249	3568
Número de pontos de apoio	24	96	46
Número de pontos de verificação	5	8	5

* GSD (*Ground Sample Distance* – Elemento de Resolução no Terreno).

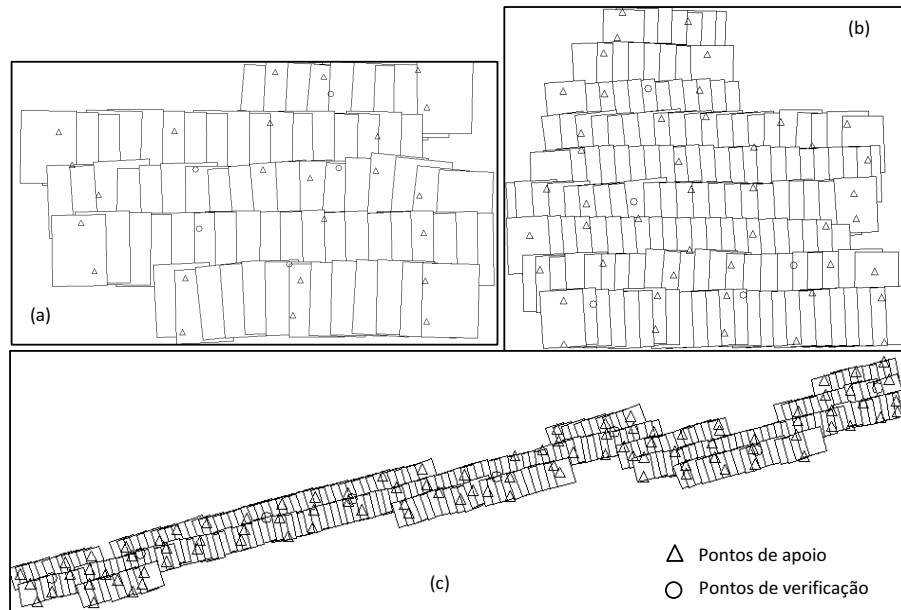


Figura 55: Distribuição dos pontos no campo de calibração da FCT/UNESP. (a) Catanduva; (b) Ribeirão Pires; (c) SP-270.

Os blocos de imagens foram fototriangulados considerando algumas abordagens de processamento, em função dos modelos com parâmetros adicionais disponíveis no software LPS: Bauer, Jacobsen, Ebner, Brown e Modelo de Lentes. Os modelos de Ebner e Brown foram apresentados na Seção 3.3 (Capítulo 3). Os demais modelos, representados por Bauer, Jacobsen e Modelo de Lentes, encontram-se definidos por (LEICA PHOTOGRAMMETRY SUITE PROJECT MANAGER, 2006; MURAI et al, 1984):

- **Bauer**: modelo formado por três parâmetros, resultante de pesquisas realizadas pelo Dr. H. Bauer. O primeiro parâmetro é responsável pela estimação do coeficiente de primeira ordem da distorção radial simétrica. Os outros dois parâmetros definem a deformação afim (não-ortogonalidade e diferença de escala entre os eixos do sistema de coordenadas de imagem - x, y).

$$\begin{aligned}\Delta x &= a_1 x(r^2 - r_0^2) + a_2 x \\ \Delta y &= a_1 y(r^2 - r_0^2) - a_2 y + a_3 x\end{aligned}\quad (39)$$

nos quais (x, y) são as fotocoordenadas, r^2 e r_0^2 as distâncias radiais e (a_1, a_2, a_3) os coeficientes do polinômio de Bauer.

- **Jacobsen**: desenvolvido por K. Jacobsen, o modelo é definido por quatro parâmetros, que correspondem aos coeficientes de primeira e segunda ordem que compensam a deformação afim e o parâmetro que modela a distorção radial simétrica. O parâmetro a_4 visa modelar uma deformação de segunda ordem do plano da imagem, fundamentalmente pertinente às câmaras de filme, e que tem pouco sentido no caso de câmaras digitais, uma vez que o sensor digital é plano.

$$\begin{aligned}\Delta x &= a_1 x(r^2 - r_0^2) + a_2 x + a_3 y \\ \Delta y &= a_1 y(r^2 - r_0^2) - a_2 y + a_3 x + a_4 x^2\end{aligned}\quad (40)$$

sendo (a_1, \dots, a_4) os parâmetros do polinômio de Jacobsen.

- **Modelo de Lentes**: o modelo de distorção das lentes, composto por dois parâmetros, foi projetado para autocalibrar os parâmetros de distorção das lentes.

$$\begin{aligned}\Delta x &= k_1 x r^2 + k_2 x r^4 \\ \Delta y &= k_1 y r^2 + k_2 y r^4\end{aligned}\quad (41)$$

nos quais (k_1, k_2) são os parâmetros de distorção das lentes. Apesar de utilizada a terminologia considerada pelo aplicativo mencionado (LPS), este modelo se refere à distorção radial simétrica, onde o parâmetro k_3 é considerado como sendo nulo.

Nos testes realizados, os blocos foram processados diversas vezes, com os distintos modelos apresentados, procurando-se explorar a influência destes modelos sobre os resultados de fototriangulação. Os experimentos realizados com as diferentes abordagens propostas foram:

- Parâmetros de calibração originais (Tabela 17) e sem considerar parâmetros adicionais (PA);*
- Parâmetros de calibração originais e modelo de **Bauer** (3 parâmetros);*
- Parâmetros de calibração originais e modelo de **Jacobsen** (4 parâmetros);*
- Parâmetros de calibração originais e modelo de **Ebner** (12 parâmetros);*
- Parâmetros de calibração originais e modelo de **Brown** (14 parâmetros);*
- Parâmetros de distorção das lentes (k_1, k_2) inicializados com valor zero e aplicando o modelo **Lens distortion** (2 parâmetros), sem pré-correção da distorção radial simétrica.*

A câmara Hasselblad foi previamente calibrada (em Março de 2007) no campo de calibração da FCT-UNESP de Presidente Prudente. O campo dispõe de 54 alvos, cujas coordenadas foram precisamente determinadas por procedimentos topográficos (precisão: $\sigma = 1-3$ mm – 1 sigma). Os parâmetros de calibração, determinados por Bazan et al. (2007) utilizando o aplicativo CC desenvolvido na unidade, são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Dados de calibração da câmara Hasselblad (Março/2007).

<i>f (mm)</i>	50,1705 ± 0,0051
<i>x₀ (mm)</i>	-0,0816 ± 0,0030
<i>y₀ (mm)</i>	-0,7294 ± 0,0021
<i>k₁ (mm⁻²)</i>	-2,8480 x10 ⁻⁰⁵ ± 0,6909 x10 ⁻⁰⁷
<i>k₂ (mm⁻⁴)</i>	1,3186 x10 ⁻⁰⁸ ± 0,4029 x10 ⁻⁰⁹
<i>px (mm)</i>	0,009
<i>py (mm)</i>	0,009

Em todos os experimentos foram usados os parâmetros de OI determinados na calibração terrestre (Tabela 17), de forma que as fotocoordenadas fossem pré-refinadas. Apenas no experimento F não foram considerados os parâmetros de distorção das lentes previamente conhecidos.

Os pontos de enlace foram medidos automaticamente no software LPS com precisão subpixel (estimada na ordem de 1/3 do pixel), com controle de qualidade posterior. Os resultados dos diferentes experimentos propostos estão apresentados nas Tabelas 18 e 19. A Tabela 18 traz o Erro Médio Quadrático (EMQ) dos resíduos das observações e a variância da observação de peso unitária a posteriori, ($\hat{\sigma}_0^2$), todos expressos em pixels.

Na Tabela 19 são apresentados os valores do EMQ nos pontos de apoio e de verificação, assim como as precisões esperadas (σ_e) no cálculo das coordenadas tridimensionais. Estas precisões foram estimadas em função do erro esperado nas observações (1 pixel – 9 μ m) e das características de coleta das imagens, definidas pela relação entre a aerobase e a altura de vôo (Ver Tabela 16). Esta precisão predita serve apenas como uma referência de valor que deverá ser obtida, no caso de reconstrução tridimensional de pontos, levando-se em conta apenas a geometria de coleta e o erro observacional para imagens verticais e um modelo isolado. Conforme definido em Kraus e

Waldhaus (1993), as equações para o cálculo das precisões esperadas nas coordenadas no espaço objeto são dadas por:

$$\sigma_x = D_{esc} \sqrt{\left(\frac{x_e Z}{fB} \sigma_{px}\right)^2 + \sigma_x^2} \quad (42)$$

$$\sigma_y = D_{esc} \sqrt{\left(\frac{y_e Z}{fB} \sigma_{py}\right)^2 + \sigma_y^2} \quad (43)$$

$$\sigma_z = \frac{Z^2}{fB} \sigma_{pz} \quad (44)$$

sendo:

D_{esc} : denominador da escala da imagem;

x_e, y_e : coordenadas do ponto em relação ao sistema de centro da imagem;

Z : altura de voo;

f : distância focal da câmara;

B : aerobase;

σ_{px} : precisão da medida de paralaxe;

σ_x, σ_y : precisões das coordenadas dos pontos medidos na imagem.

Tabela 18: EMQ dos resíduos das observações e a variância da observação de peso unitário ($\hat{\sigma}_0^2$) para os experimentos realizados. Valores expressos em função da dimensão do pixel na imagem.

	CATANDUVA			SP-270			RIB. PIRES		
	EMQ x	EMQ y	$\hat{\sigma}_0^2$	EMQ x	EMQ y	$\hat{\sigma}_0^2$	EMQ x	EMQ y	$\hat{\sigma}_0^2$
A (Sem PA)	0,33	0,36	0,49	0,15	0,30	0,37	0,16	0,26	0,36
B (Bauer)	0,30	0,33	0,45	0,15	0,28	0,36	0,16	0,26	0,34
C (Jacobsen)	0,30	0,33	0,45	0,15	0,28	0,36	0,16	0,26	0,34
D (Ebner)	0,31	0,34	0,46	0,15	0,28	0,36	0,16	0,26	0,35
E (Brown)	0,28	0,31	0,42	0,14	0,26	0,33	0,15	0,25	0,33
F (Lens Dist)	0,28	0,30	0,41	0,14	0,25	0,32	0,15	0,25	0,32

Tabela 19: EMQ nos pontos de apoio (PA) e verificação (PV), e as precisões esperadas (σ_e) dos pontos no espaço objeto para os experimentos realizados.

		CATANDUVA			SP-270			RIB. PIRES		
		EMQ (PA)	EMQ (PV)	σ_e	EMQ (PA)	EMQ (PV)	σ_e	EMQ (PA)	EMQ (PV)	σ_e
A (Sem PA)	X (m)	0,26	0,36	0,40	0,19	0,20	0,20	0,25	0,37	0,20
	Y (m)	0,23	0,47	0,40	0,21	0,33	0,20	0,24	0,41	0,20
	Z (m)	0,14	1,91	1,36	0,09	0,75	0,68	0,09	0,61	0,68
B (Bauer)	X (m)	0,26	0,33	0,40	0,19	0,21	0,20	0,23	0,33	0,20
	Y (m)	0,23	0,46	0,40	0,21	0,32	0,20	0,23	0,44	0,20
	Z (m)	0,10	0,97	1,36	0,09	0,48	0,68	0,08	0,45	0,68
C (Jacobsen)	X (m)	0,26	0,33	0,40	0,19	0,21	0,20	0,23	0,33	0,20
	Y (m)	0,23	0,46	0,40	0,21	0,32	0,20	0,23	0,44	0,20
	Z (m)	0,10	0,97	1,36	0,09	0,47	0,68	0,08	0,45	0,68
D (Ebner)	X (m)	0,26	0,32	0,40	0,18	0,21	0,20	0,24	0,34	0,20
	Y (m)	0,22	0,47	0,40	0,21	0,31	0,20	0,23	0,45	0,20
	Z (m)	0,10	1,03	1,36	0,09	0,57	0,68	0,08	0,45	0,68
E (Brown)	X (m)	0,25	0,32	0,40	0,18	0,22	0,20	0,24	0,34	0,20
	Y (m)	0,22	0,46	0,40	0,21	0,31	0,20	0,23	0,47	0,20
	Z (m)	0,10	0,74	1,36	0,08	0,42	0,68	0,09	0,38	0,68
F (Lens Dist)	X (m)	0,26	0,34	0,40	0,18	0,19	0,20	0,23	0,37	0,20
	Y (m)	0,23	0,50	0,40	0,21	0,29	0,20	0,23	0,41	0,20
	Z (m)	0,08	0,51	1,36	0,09	0,35	0,68	0,07	0,37	0,68

As Figuras 56 e 57 apresentam os valores dos Erros Médios Quadráticos (EMQ) nas componentes planimétricas (Figura 56) e altimétrica (Figura 57) nos pontos de verificação, sintetizando os resultados mostrados na Tabela 19. Os valores são apresentados em relação ao GSD (*Ground Sample Distance* - elemento de resolução ou tamanho do pixel no terreno) da imagem, para facilitar a comparação e análise dos resultados.

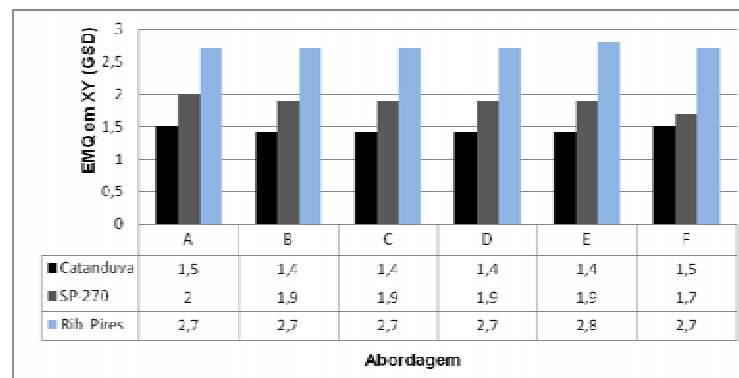


Figura 56: Resumos dos testes com os diversos grupos de parâmetros adicionais: EMQ da resultante planimétrica nos pontos de verificação para as abordagens definidas.

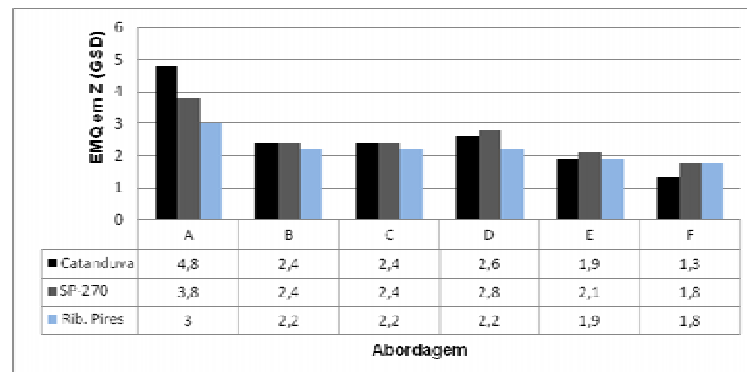


Figura 57: Resumos dos testes com os diversos grupos de parâmetros adicionais: EMQ da componente altimétrica nos pontos de verificação para as abordagens definidas.

Observando a Figura 56 pode-se notar que o uso de parâmetros adicionais na fototriangulação (abordagens B, C, D, E e F) não resultou em melhoria significativa na planimetria, quando comparado com a abordagem A, na qual foram usados os parâmetros determinados em uma calibração prévia.

Com os resultados apresentados na Figura 57 verifica-se que a introdução de parâmetros adicionais, que modelam erros sistemáticos residuais, reduziu significativamente o erro na componente altimétrica. Esta melhoria de acurácia em Z é percebida em todos os blocos de imagens analisados. Isto está em conformidade com resultados de pesquisas realizadas com modelos de FPA em câmaras digitais de grande formato (KORNUS et al, 2006; GRUBER e LADSTADTER, 2006).

Verificou-se que o bloco de Catanduva foi o que apresentou o maior ganho de acurácia altimétrica no espaço objeto, principalmente quando considerada a abordagem F (Modelo de Lentes). Embora as razões base/altura dos blocos sejam equivalentes, neste caso o erro em altimetria foi cerca de 3,5 vezes menor, quando comparado aos resultados obtidos na abordagem A, na qual não foram considerados parâmetros adicionais. O bloco de Catanduva foi coletado com uma altura de vô maior em relação aos demais blocos (Ver Tabela 16) e, como o LPS não possui recurso de correção da refração fotogramétrica, este bloco sofre maior influência deste efeito (Resultados da Abordagem A). Desta forma, com a introdução de parâmetros adicionais, o efeito da refração pode ser absorvido pelos parâmetros de distorção das lentes recalculados, tendo em vista que estes erros proporcionam efeitos similares na imagem.

Nota-se pelos resultados apresentados na Tabela 19, que os valores obtidos com a introdução dos modelos de Bauer e Jacobsen no processo de fototriangulação foram praticamente os mesmos, com pequenas variações na ordem do milímetro. O parâmetro adicional do modelo de Jacobsen (a_4), em relação ao modelo de Bauer, não contribuiu para melhorar a acurácia do processo. Este parâmetro corresponde a um coeficiente para a modelagem de segunda ordem da deformação do sensor em relação ao eixo y . Contudo, como se trata de uma câmara digital, na qual o sensor de coleta é plano e de estado sólido, os valores obtidos para este parâmetro nos testes foram praticamente nulos, como esperado.

Os resultados obtidos com o modelo de Brown com 14 parâmetros foram melhores que os obtidos com os modelos de Bauer e Jacobsen, que são definidos por poucos parâmetros. Já o modelo de Ebner não apresentou resultados substancialmente diferentes dos modelos de Bauer e Jacobsen.

O modelo de distorção das lentes (*Lens Distortion*) foi o modelo de FPA que possibilitou os melhores resultados. Com isto, verificou-se que apenas os dois parâmetros de distorção óptica foram suficientes para absorver os erros residuais do processo, possibilitando melhores resultados que os demais modelos testados. Jacobsen (2003) e Fraser (1982) destacam que a utilização de modelos com grande número de parâmetros pode trazer problemas de correlação entre as variáveis e uma superparametrização que não necessariamente melhoram os resultados.

De modo similar, Murai et al. (1984) verificaram, por meio de experimentos de calibração terrestre com parâmetros adicionais, que modelos físicos como o de Brown e modelos que descrevem a distorção das lentes, mostraram melhor acurácia que modelos polinomiais, tais como os de Ebner e Grün (modelo não considerado neste trabalho). Para o caso de câmaras digitais, os grupos de parâmetros adicionais podem ser simplificados, uma vez que os sensores CCD (ou CMOS) são planos e não apresentam deformações temporais (JACOBSEN, 2003).

Cabe destacar ainda que, quando se calibra uma câmara, as condições de pressão e temperatura do laboratório, ou do campo de teste, geralmente são diferentes das condições climáticas no momento do voo. Este fato pode alterar os valores dos parâmetros de calibração previamente calculados e, conseqüentemente, prejudicar a qualidade na

determinação de coordenadas de pontos no espaço objeto, como discutido por Jacobsen e Wegmann (2002). Jacobsen (2003) relata que os efeitos de distorção das lentes e de afinidade apresentam-se mais estáveis, o que não pode ser garantido para os valores da distância focal e da posição do ponto principal, quando expostos à variações climáticas e movimentos excessivos.

Deste modo, a introdução de parâmetros adicionais ao processo de fototriangulação (ajuste em bloco) pode absorver estas variações residuais dos parâmetros de orientação interior e melhorar a acurácia dos pontos no espaço objeto, fundamentalmente na coordenada Z, conforme verificado nos testes realizados. Além disso, verificou-se, para o tipo de sensor utilizado, que o uso de um modelo que considera apenas a distorção das lentes proporcionou melhores resultados que os modelos polinomiais. Esta constatação direcionou os estudos e análises de FPA para os grupos de parâmetros que modelam de forma explícita os efeitos nas imagens, conforme verificado nos testes seguintes.

6.4.2 Bloco Catanduva

Conforme definido no tópico anterior este bloco de imagens foi coletado com o sistema configurado com uma câmara Hasselblad modelo H1D de 22 Megapixels na posição vertical. A partir das observações de pontos fotogramétricos medidos automaticamente no LPS com precisão subpixel (correspondência pelo método dos Mínimos quadrados, $\sigma \approx 0,2$ pixel - LEICA PHOTOGRAMMETRY SUITE PROJECT MANAGER, 2006; Schenk, 1999), dos pontos de apoio e dos parâmetros de orientação exterior aproximados utilizados neste bloco, os arquivos de entrada do programa CMC foram estruturados.

Com estes dados, diversos estudos em distintas configurações puderam ser realizados com o intuito de analisar a Fototriangulação com parâmetros adicionais. As análises foram realizadas procurando-se comparar com os resultados obtidos a partir do processamento no software LPS (Seção 6.4.1). Conforme discutido na Seção 6.4.1, o software LPS possui um conjunto de parâmetros adicionais denominado *Lens Distortion*, que permite que os parâmetros de distorção radial simétrica (k_1, k_2) sejam determinados no

processo de Fototriangulação, de forma que seus valores sejam recuperados para o ambiente de coleta de imagens.

Para o bloco da cidade de Catanduva, os valores dos coeficientes de distorção radial (k_1, k_2) estimados considerando o modelo *Lens Distortion* no módulo de aerotriangulação do LPS foram: $k_1 = -3,0967 * 10^{-5} mm^{-2}$ e $k_2 = 1,7976 * 10^{-8} mm^{-4}$. As discrepâncias nos pontos de verificação para este teste de fototriangulação do bloco de Catanduva, considerando o modelo *Lens Distortion*, estão apresentadas na Tabela 19 (Abordagem F).

A partir destes valores obtidos com o processamento no software LPS, alguns experimentos foram realizados com o programa CMC, considerando as seguintes abordagens:

- A. Fototriangulação sem a correção prévia da refração atmosférica e os parâmetros de distorção radial simétrica (k_1, k_2) considerados livres;
- B. Fototriangulação considerando a correção prévia da refração atmosférica e os parâmetros de distorção radial simétrica (k_1, k_2) como livres;
- C. Fototriangulação considerando a correção prévia da refração atmosférica e as coordenadas do ponto principal (x_0, y_0) e os parâmetros de distorção radial simétrica (k_1, k_2) como livres.

Foram utilizados os parâmetros de orientação interior estimados na calibração no campo terrestre realizada em Março de 2007, cujos valores estão apresentados na Tabela 17. Os resultados do programa CMC para as abordagens definidas anteriormente seguem apresentados nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 20: Parâmetros adicionais (orientação interior - OI) estimados nos testes de fototriangulação com o programa CMC para as abordagens definidas – Bloco de Catanduva.

Abordagem	Parâmetros de OI
A (Fototri/sem corr. Refr. atm./ k_1, k_2 livres)	$k_1 = -3,0961 * 10^{-5} \text{ mm}^{-2}$ $k_2 = 1,7941 * 10^{-8} \text{ mm}^{-4}$
B (Fototri/com corr. Refr. atm./ k_1, k_2 livres)	$k_1 = -3,1157 * 10^{-5} \text{ mm}^{-2}$ $k_2 = 1,8189 * 10^{-8} \text{ mm}^{-4}$
C (Fototri/com corr. Refr. atm./ x_0, y_0, k_1, k_2 livres)	$x_0 = -0,0453 \text{ mm}$ $y_0 = 0,7159 \text{ mm}$ $k_1 = -3,1004 * 10^{-5} \text{ mm}^{-2}$ $k_2 = 1,7985 * 10^{-8} \text{ mm}^{-4}$

Tabela 21: Discrepâncias nos pontos de verificação para os testes de fototriangulação com o programa CMC para as abordagens definidas – Bloco de Catanduva.

Abordagem		Média (m)	EMQ (m)
A (Fototri/sem corr. Refr. atm./ k_1, k_2 livres)	X	0,000	0,367
	Y	-0,019	0,578
	Z	0,287	0,474
B (Fototri/com corr. Refr. atm./ k_1, k_2 livres)	X	-0,021	0,365
	Y	-0,017	0,591
	Z	0,248	0,416
C (Fototri/com corr. Refr. atm./ x_0, y_0, k_1, k_2 livres)	X	0,002	0,368
	Y	-0,023	0,573
	Z	0,308	0,510

Para uma análise gráfica, a Figura 58 apresenta as curvas de distorção geradas a partir dos valores dos parâmetros de distorção radial estimados nos casos analisados (Tabela 20). Apresentam-se as curvas para os casos A e B e para os coeficientes calculados pelo LPS via modelos *Lens Distortion*.

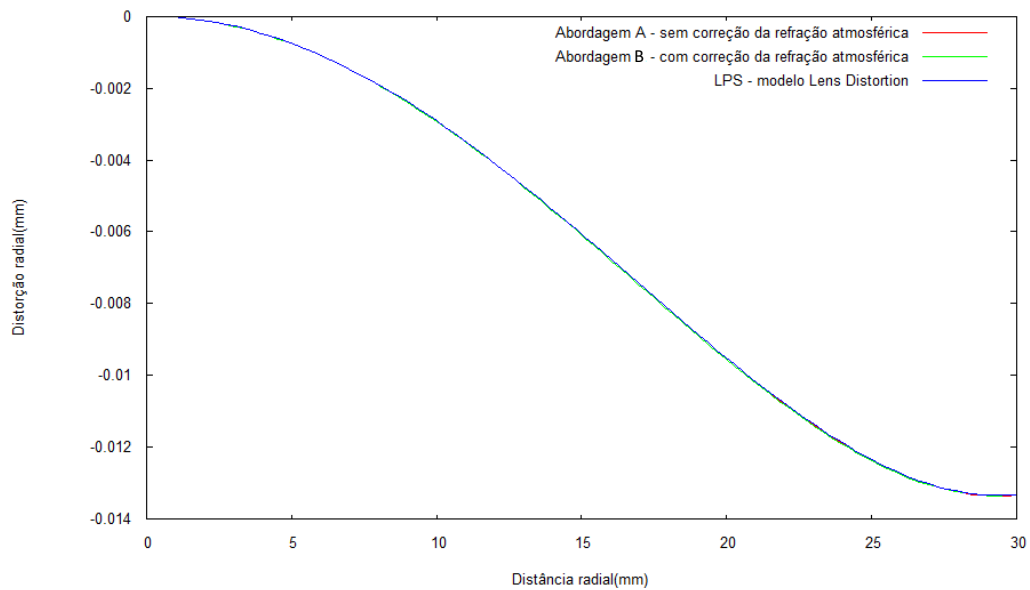


Figura 58: Curvas de distorção das lentes geradas a partir dos coeficientes calculados nas abordagens A, B (determinadas a partir do programa CMC) e pelo LPS (modelo *Lens Distortion*) – Bloco de Catanduva.

Pelos resultados obtidos verifica-se que os parâmetros de distorção óptica determinados com a abordagem A (Tabela 19), onde não se considera a refração atmosférica, são muito similares aos valores dos parâmetros determinados pelo LPS, a partir do modelo *Lens Distortion*. Deste modo, contactou-se que o software LPS na versão 9.1 não corrige previamente as coordenadas de imagem do efeito da refração atmosférica.

Contudo, o efeito da refração atmosférica não é muito significativo para este tipo de câmara com quadro de imagem pequeno (49 x 36,7 mm). O efeito da refração nas bordas da imagem é na ordem de $\frac{1}{4}$ do tamanho do pixel, para a altura de vôo do bloco de Catanduva (2800 m). Isso pode ser verificado pelos resultados obtidos na abordagem B (Tabela 20), onde se considera a correção prévia da refração pelo programa CMC. Os valores dos coeficientes de distorção (k_1, k_2) obtidos na abordagem B foram pouco diferentes dos obtidos na abordagem A (sem correção da refração), e pelas curvas de distorção apresentadas na Figura 58 constata-se esta similaridade de resultados.

De qualquer modo, o efeito da refração atmosférica é geralmente absorvido pelos parâmetros da distorção radial simétrica, desde que os coeficientes que modelam a distorção sejam calculados no ajuste em bloco, uma vez que os efeitos nas coordenadas de imagem são similares, ou seja, radiais.

Comparando-se com os resultados obtidos para uma fototriangulação sem parâmetros adicionais (Tabela 20 – Abordagem A), verificou-se que o erro nas coordenadas do espaço objeto é mais significativo que nos casos em que o modelo de lentes foi considerado (Ver Tabela 21 em relação a Tabela 19). Deste modo, os parâmetros de orientação interior determinados na calibração terrestre não foram adequados para modelar a geometria interna da câmara para o bloco aéreo, uma vez que as condições de coleta das imagens são diferentes das condições ambientais de calibração.

Em outro teste realizado utilizou-se a distância focal nominal da câmara (50,30 mm), adquirida a partir do certificado das lentes na Hasselblad. Este teste objetiva verificar o comportamento do bloco de imagens quando não se tem disponível a calibração terrestre prévia das câmaras. Neste caso, as coordenadas do ponto principal (x_0, y_0) e os coeficientes de distorção das lentes (k_1, k_2) foram considerados com valor zero.

Neste sentido, foram outros dois processamentos:

- D. Fototriangulação considerando a distância focal nominal (50,30 mm), coordenadas do ponto principal (x_0, y_0) nulas, e os parâmetros de distorção radial simétrica (k_1, k_2) como livres;
- E. Fototriangulação considerando a distância focal nominal (50,30 mm) e as coordenadas do ponto principal (x_0, y_0) e os parâmetros de distorção radial simétrica (k_1, k_2) como livres.

Os resultados para as abordagens D e E seguem apresentados nas Tabelas 22 e 23.

Tabela 22: Parâmetros adicionais (orientação interior - OI) estimados nos testes de fototriangulação com o programa CMC para as abordagens D e E – Bloco de Catanduva.

Abordagem	Parâmetros de OI
D (Fototri/f nominal/ $x_0, y_0=0$ / k_1, k_2 livres)	$k_1 = -3,1206 * 10^{-5} \text{ mm}^{-2}$ $k_2 = 1,8306 * 10^{-8} \text{ mm}^{-4}$
E (Fototri/f nominal/ $x_0, y_0, k_1,$ k_2 livres)	$x_0 = -0,0435 \text{ mm}$ $y_0 = 0,7147 \text{ mm}$ $k_1 = -3,1190 * 10^{-5} \text{ mm}^{-2}$ $k_2 = 1,8238 * 10^{-8} \text{ mm}^{-4}$

Tabela 23: Discrepâncias nos pontos de verificação para os testes de fototriangulação com o programa CMC para as abordagens D e E – Bloco de Catanduva.

Abordagem		Média (m)	EMQ (m)
D (Fototri/f nominal/ $x_0, y_0=0/$ k_1, k_2 livres)	X	-0,077	0,524
	Y	-0,113	0,549
	Z	0,487	0,615
E (Fototri/f nominal/ $x_0, y_0, k_1,$ k_2 livres)	X	-0,019	0,366
	Y	-0,021	0,588
	Z	0,261	0,450

Pelos resultados apresentados na Tabela 22 verifica-se que os parâmetros de orientação interior considerados foram recuperados, comparando-se com os valores obtidos na Tabela 17, mesmo quando usado os valores nominais da câmara.

Contudo, quando foram considerados somente os coeficientes de distorção radial (abordagem D), as discrepâncias dos pontos de verificação no espaço objeto foram mais acentuadas, uma vez que os valores das coordenadas do ponto principal foram fixados com valores nulos.

Já, quando se estimou as coordenadas do ponto principal juntamente com os parâmetros de distorção das lentes (abordagem E), a acurácia no espaço objeto foi compatível com a abordagem B, que considerou os parâmetros de orientação interior determinados na calibração terrestre. Deste modo, o programa CMC permitiu flexibilidade no processo de Fototriangulação com parâmetros adicionais, uma vez que distintos conjuntos de parâmetros de orientação interior podem ser estimados no ajustamento em bloco.

6.4.3 Bloco BRVias

O bloco BRVIAS compreende 86 imagens distribuídas em 3 faixas de vôo, sendo duas faixas paralelas e uma cruzada. Este bloco corresponde a um trecho da rodovia BR-153 no estado de São Paulo, que foi levantada pela empresa Engemap com o sistema SAAPI em Maio de 2008. Para este vôo foi utilizada a câmara Hasselblad H3D (39

Megapixels) na configuração nadiral. A altura média de vôo de coleta das imagens foi de 1400 m, proporcionando um elemento de resolução no terreno (GSD) na ordem de 19,5 cm. A altitude média da região é de 441 m, com uma variação do relevo em torno de 5%. Para este conjunto de imagens foi utilizado o recurso de correção de distorção das lentes presente no software Flexcolor, descrito na seção 6.3.

Para este projeto integrou-se também o sistema de georreferenciamento direto com receptor o GPS DL4-Plus do sistema SPAN-Novatel, que proporciona uma sincronização de dados altamente precisa, na ordem do milissegundo. A estação base utilizada foi a estação OURI, na cidade de Ourinhos, que pertence à rede brasileira de monitoramento contínuo. Isso porque, esta área de estudo da rodovia fica no município de Ourinhos, permitindo grande proximidade entre as estações base e móvel.

Os dados foram processados no módulo GrafNav da *Waypoint Inertial Explorer* (Novatel), com uma taxa de coleta de dados de 20Hz e o modelo polinomial de segunda ordem para a interpolação dos CP's, resultando em uma precisão em torno de 8 cm. Foram realizados testes com um modelo de interpolação linear e uma taxa de coleta de 1Hz, e a diferença nas coordenadas dos CP's foram na ordem de 3 cm. Isso pode ser explicado pela trajetória da aeronave na faixa de vôo que é praticamente retilínea e com velocidade constante. Deste modo, nas situações em que se tem um recurso de memória do GPS limitado, pode-se recorrer a uma taxa de coleta menor, que permite resultados ainda com boa qualidade.

Como resultado tem-se as coordenadas dos centros perspectivos (CP's) das imagens com erro estimado em torno de 15-20 cm para o posicionamento diferencial pós-processado, conforme experimentos realizados por KENNEDY et al (2007).

Outra opção que este software permite é o PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), no qual se utilizam as efemérides precisas do IGS (*International GNSS Service*) para o posicionamento preciso de uma estação, sem a necessidade de um processamento diferencial com uma estação base.

Os dados de georreferenciamento direto do bloco BRVIAs foram também processados no modo PPP no módulo GrafNav, e então comparados com os resultados obtidos no modo de processamento diferencial. A diferença obtida entre os dois

processamentos (Diferencial e PPP) foi sistemática e da ordem de 6 cm na componente X e 2 cm nas componentes Y e Z. Deste modo, verificou-se que estas discrepâncias estão dentro do erro esperado de georreferenciamento direto das imagens (~15 cm), podendo-se utilizar a técnica de PPP com grande potencialidade, uma vez que há determinadas áreas com difícil acesso para a instalação de estações bases.

Para este bloco de imagens foram utilizados 22 pontos de terreno cujas coordenadas foram levantadas com receptor GPS de dupla frequência e pós-processados com o método de posicionamento diferencial, resultando numa precisão na ordem do centímetro. Estes pontos foram utilizados como controle e verificação de campo nos testes realizados. Considerando os dados do bloco BRVIAS, diversos estudos e análises de FPA foram desenvolvidos. Inicialmente, um sub-bloco composto por 32 imagens foi selecionado, conforme mostra a Figura 59, e testes com dados simulados e dados reais foram realizados.

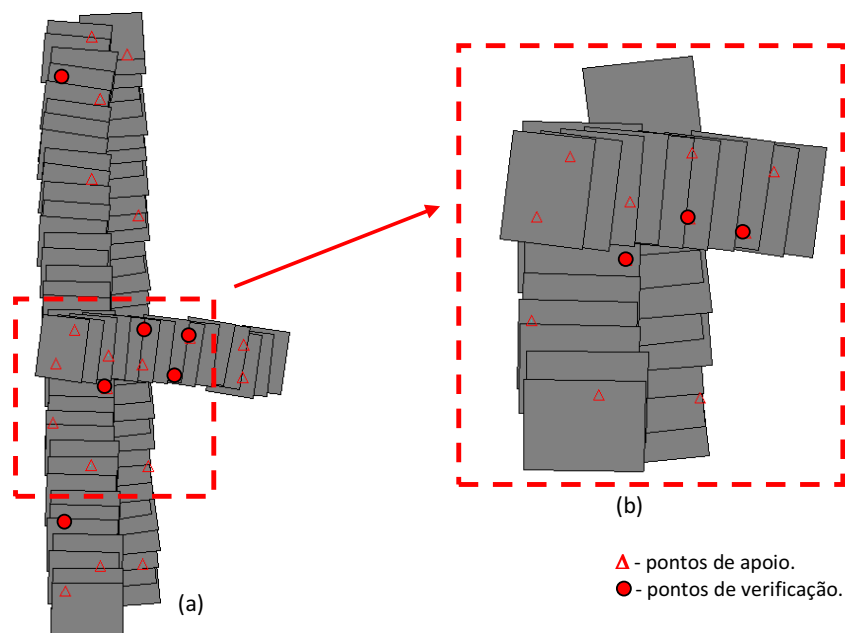


Figura 59: Bloco BRVIAS: (a) bloco completo (86 imagens) com a distribuição dos pontos de apoio e verificação; (b) Sub-bloco de 32 imagens selecionado sobre o bloco completo, com a distribuição dos pontos de apoio e verificação.

6.4.3.1 Experimentos com dados simulados – bloco de 32 imagens

Os dados simulados foram gerados a partir do aplicativo SMC - *Simulação Multi-Câmaras*, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Fotogrametria da FCT/UNESP, sob coordenação do professor Antonio M. G. Tommaselli (MARCATO JR. et al, 2008). Neste aplicativo as foto-coordenadas são geradas para um determinado conjunto de imagens, de forma a simular um bloco de imagens, a partir de suas coordenadas no referencial do espaço objeto (X,Y,Z), dos parâmetros de orientação interior e exterior.

O modelo de colinearidade é usado para projetar as coordenadas do espaço objeto para o espaço imagem. Os efeitos dos erros sistemáticos (deslocamento do ponto principal, distorção das lentes, afinidade e refração) são introduzidos considerando os modelos já discutidos no Capítulo III. São, então, geradas perturbações randômicas que são somadas às coordenadas imagem geradas, simulando erros observacionais, que para o caso estudado têm o desvio padrão de 1/3 pixel ($\sim 2 \mu\text{m}$).

Considerando este aplicativo, os dados para o sub-bloco de 32 imagens foram gerados a partir dos dados da imagem, parâmetros de orientação exterior e coordenadas no espaço objeto obtidos em um processo de fototriangulação, que foram então considerados como verdadeiros. Por se tratar de um conjunto de dados simulados, as coordenadas dos pontos no espaço objeto são conhecidas a priori, o que permite considerar todos os pontos fotogramétricos (373 pontos) como pontos de verificação, ao invés de considerar apenas os três pontos indicados na Figura 59. Estes 373 pontos fotogramétricos geraram 1856 observações nas imagens.

Como parâmetros de orientação interior foram utilizados os dados de uma pré-calibração realizada em Janeiro de 2008 no campo de calibração da FCT/UNESP com as imagens corrigidas pelo software Flexcolor (coluna D – Tabela 12). Para fins de análise, foi realizada a simulação tendo por base a mesma geometria e número de imagens do bloco real. Os dados para este bloco foram gerados com o auxílio do bolsista de Iniciação Científica José Marcato Junior (MARCATO JR. et al, 2008).

Os experimentos foram realizados no programa CMC (Calibração Multi-Câmaras). Conforme já discutido no Capítulo V, o programa CMC permite fazer a seleção dos

parâmetros adicionais e ponderar valores conhecidos a priori por injunções de peso. Além disto, utiliza como método de estimação o Modelo Combinado com injunções, que trata com rigor as propriedades estocásticas das observações e parâmetros envolvidos no processo de ajuste em bloco por feixes de raios.

De forma a melhor sintetizar os experimentos realizados com dados simulados, a Tabela 24 apresenta as características de cada experimento realizado com o programa CMC, observando-se os tratamentos e ponderações aplicadas e o número e distribuição de pontos de apoio considerados.

Tabela 24: Descrição dos experimentos com dados simulados (BRVIAS).

TESTE	Parâmetros de OI	Parâmetros de OE	Pontos de apoio	Pontos de verificação
A	Fixos com valores pré-calibrados (valores verdadeiros)	Livres	11	373
B	Fixos com um erro de 0,1mm nos valores da distância focal e das coordenadas do ponto principal	Livres	11	373
C	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Livres	11	373
D	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 1,0 m (desvio-padrão) nas coordenadas do CP	11	373
E	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	11	373
F	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Erro de 1,0 m na direção da linha de vôo e injunção de 0,2 m, sobre coordenadas do CP	11	373
G	Fixos com valores pré-calibrados (valores verdadeiros)	Erro de 1,0 m na direção da linha de vôo e injunção de 0,2 m, sobre coordenadas do CP.	11	373
H	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	4	373
I	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	1	373
J	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP e 1' nos ângulos de atitude	11	373
K	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP e 1' nos ângulos de atitude	4	373
L	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP e 1' nos ângulos de atitude	1	373

OI: Orientação Interior; OE: Orientação Exterior; FPA: Fototriangulação com Parâmetros Adicionais; CP: Centro Perspectivo

No primeiro experimento (A) foi realizada uma Fototriangulação convencional, a qual foi definida como referência para a análise dos outros testes. No Experimento B objetivou-se verificar a influência na fototriangulação com a utilização de

valores imprecisos para a distância focal (f) e para as coordenadas do ponto principal (x_0, y_0). Isso porque, conforme já discutido, o ambiente em que se realiza a calibração pode diferir do ambiente de coleta das imagens, podendo resultar em diferenças nos parâmetros de orientação interior (POI), principalmente em modelos de câmaras que não foram projetadas para aplicações fotogramétricas. Além disto, pode-se investigar o efeito de uso de valores nominais, fornecidos pelo fabricante, ao invés de valores calibrados.

Nos experimentos C, D e E foram realizadas FPA (Fototriangulação com Parâmetros Adicionais) procurando-se variar o peso na injunção imposta às coordenadas do CP estimadas por georreferenciamento direto. Isso permite avaliar a influência do nível de precisão das coordenadas do CP na recuperação dos parâmetros de orientação interior.

Os experimentos F e G foram desenvolvidos para se verificar o comportamento da solução quando se introduz erros sistemáticos na direção da linha de vôo, de forma a simular um erro de sincronismo entre o disparo da câmara e a coleta do dado GPS. Nos demais experimentos foram realizados processos de FPA variando-se a quantidade de pontos de apoio e analisando-se a influência de se considerar injunções nos ângulos de atitude provenientes de um sistema de navegação inercial (INS) com precisão de 1 minuto ($1'$), que corresponde a um sistema de categoria tática, de mesma qualidade da unidade que foi especificada para o projeto SAAPI.

Como resultados dos experimentos realizados com os dados simulados, as Tabelas 25, 26 e 27 apresentam, respectivamente, as discrepâncias entre os parâmetros de OI estimados e verdadeiros, o EMQ (Erro Médio Quadrático) das discrepâncias entre os parâmetros de OE estimados e verdadeiros, e a média e o EMQ das discrepâncias nas coordenadas dos pontos de verificação. Na última coluna da Tabela 27 apresenta-se o EMQ em relação ao GSD da imagem, para facilitar a comparação e análise dos resultados.

Apresentam-se também, na última linha da Tabela 27, as precisões esperadas (σ_e) no cálculo das coordenadas tridimensionais para um modelo isolado. Estas precisões foram estimadas em função do erro esperado nas observações (1 pixel – $6,8 \mu\text{m}$) e da geometria de coleta, conforme definido em Krauss e Waldhaus (1993). Conforme já descrito anteriormente, esta precisão predita serve apenas como uma referência de valor para as análises dos resultados.

Tabela 25: Discrepâncias (Erro verdadeiro) entre parâmetros de orientação interior estimados e verdadeiros para os testes com dados simulados (BRVIAS).

		Erro Verdadeiro				
Experimento		f (mm)	x ₀ (mm)	y ₀ (mm)	k ₁ (mm ⁻²)	k ₂ (mm ⁻⁴)
C	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/OE livre/ 11 PA/ 373 PV	-0,046	0,014	0,001	-2,0E-07	2,2E-10
D	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/CP 1,0m/ 11 PA/ 373 PV	0,002	-0,007	0,001	-1,9E-07	2,2E-10
E	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/CP 0,2m/ 11 PA/ 373 PV	0,000	0,002	0,003	-1,6E-07	2,2E-10
F	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/CP 0,2m/ erro 1,0m no CP/ 11 PA/ 373 PV	0,101	-0,005	0,032	-1,4E-07	2,2E-10
H	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/CP 0,2m/ 4 PA/ 373 PV	-0,001	0,003	0,003	-1,6E-07	2,2E-10
I	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/CP 0,2m/ 1 PA/ 373 PV	0,002	0,002	0,003	-1,7E-07	2,3E-10
J	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/OE 0,2m e 1/ 11 PA/ 373 PV	-0,000	0,001	0,002	-1,6E-07	2,2E-10
K	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/OE 0,2m e 1/ 4 PA/ 373 PV	-0,002	0,002	0,002	-1,6E-07	2,2E-10
L	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/OE 0,2m e 1/ 1 PA/ 373 PV	0,001	0,002	0,003	-1,7E-07	2,3E-10

Tabela 26: Erro Médio Quadrático das discrepâncias entre parâmetros de orientação exterior estimados e verdadeiros para os testes com dados simulados (BRVIAS).

		EMQ					
Experimento		ω (°)	φ (°)	κ (°)	X ₀ (m)	Y ₀ (m)	Z ₀ (m)
A	OI fixo pré-calibrado/OE livre/ 11 PA/ 373 PV	0,0137	0,0137	0,0039	0,371	0,341	0,127
B	OI fixo pré-calibrado/ erro 0,1mm/ (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/OE livre/ 11 PA/ 373 PV	0,0145	0,0141	0,0039	2,527	2,937	2,768
C	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/OE livre/ 11 PA/ 373 PV	0,0189	0,019	0,0038	0,627	0,660	13,329
D	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/CP 1,0m/ 11 PA/ 373 PV	0,0215	0,0287	0,0047	0,751	0,524	2,963
E	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/CP 0,2m/ 11 PA/ 373 PV	0,0058	0,0061	0,0037	0,131	0,120	0,083
F	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/CP 0,2m/ erro 1,0m no CP/ 11 PA/ 373 PV	0,0090	0,0189	0,0046	0,836	0,810	2,895
G	OI fixo pré-calibrado/ OE livre/ erro 1,0m no CP/ 11 PA/ 373 PV	0,0180	0,0170	0,0124	0,191	0,655	0,727
H	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/CP 0,2m/ 4 PA/ 373 PV	0,0059	0,0074	0,0045	0,127	0,117	0,085
I	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/CP 0,2m/ 1 PA/ 373 PV	0,0060	0,0075	0,0043	0,128	0,118	0,084
J	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/OE 0,2m e 1/ 11 PA/ 373 PV	0,0049	0,0056	0,0029	0,124	0,114	0,082
K	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/OE 0,2m e 1/ 4 PA/ 373 PV	0,0051	0,0068	0,0037	0,118	0,109	0,085
L	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/OE 0,2m e 1/ 1 PA/ 373 PV	0,0054	0,0067	0,0035	0,121	0,111	0,082

Tabela 27: Média e EMQ das discrepâncias nos pontos de verificação, e as precisões esperadas (σ_e) dos pontos no espaço objeto para os testes com dados simulados (BRVIAS).

Experimento			Média (m)	EMQ (m)	EMQ (GSD)
A	<i>OI fixo pré-calibrado/OE livre/ 11 PA/ 373 PV</i>	X	0,025	0,121	0,6
		Y	-0,018	0,097	0,5
		Z	-0,056	0,335	1,7
B	<i>OI fixo pré-calibrado/ erro 0,1mm/ (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/OE livre/ 11 PA/ 373 PV</i>	X	0,022	0,128	0,6
		Y	0,008	0,115	0,6
		Z	-0,045	0,337	1,7
C	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/OE livre/ 11 PA/ 373 PV</i>	X	0,029	0,120	0,6
		Y	-0,015	0,096	0,5
		Z	-0,156	0,384	2,0
D	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/CP 1,0m/ 11 PA/ 373 PV</i>	X	0,019	0,117	0,6
		Y	-0,014	0,094	0,5
		Z	-0,051	0,329	1,7
E	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/CP 0,2m/ 11 PA/ 373 PV</i>	X	0,012	0,109	0,6
		Y	0,009	0,087	0,5
		Z	-0,054	0,321	1,6
F	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/CP 0,2m/ erro 1,0m no CP/ 11 PA/ 373 PV</i>	X	0,037	0,116	0,6
		Y	0,058	0,110	0,6
		Z	-0,005	0,359	1,8
G	<i>OI fixo pré-calibrado/ OE livre/ erro 1,0m no CP/ 11 PA/ 373 PV</i>	X	0,183	0,379	1,9
		Y	0,069	0,450	2,3
		Z	-1,621	1,698	8,7
H	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/CP 0,2m/ 4 PA/ 373 PV</i>	X	0,073	0,135	0,7
		Y	0,060	0,110	0,6
		Z	-0,048	0,335	1,7
I	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/CP 0,2m/ 1 PA/ 373 PV</i>	X	0,059	0,151	0,8
		Y	0,064	0,123	0,6
		Z	0,072	0,361	1,8
J	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/OE 0,2m e 1'/ 11 PA/ 373 PV</i>	X	0,015	0,105	0,6
		Y	0,013	0,083	0,5
		Z	-0,047	0,320	1,6
K	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/OE 0,2m e 1'/ 4 PA/ 373 PV</i>	X	0,071	0,131	0,7
		Y	0,060	0,107	0,6
		Z	-0,054	0,333	1,7
L	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/OE 0,2m e 1'/ 1 PA/ 373 PV</i>	X	0,054	0,146	0,7
		Y	0,069	0,126	0,6
		Z	0,078	0,360	1,8
σ_e	<i>Precisões esperadas</i>	X		0,19	1,0
		Y		0,19	1,0
		Z		0,57	3,3

Ao analisar as discrepâncias apresentadas na Tabela 25, verifica-se que no Experimento C, no qual não foram utilizadas informações GPS na determinação das

coordenadas dos Centros Perspectivos (CP's), houve uma discrepância acentuada (0,046 mm) entre os valores da distância focal estimada e a verdadeira. Isso já era esperado devido à alta correlação entre este parâmetro e a altura de vôo (cerca de 100%). Por conta disso, não se pode estimar com fidelidade os parâmetros de OI sem considerar outras restrições externas, como o conhecimento preciso das coordenadas do CP ou a variação significativa do relevo, que neste caso é somente de 5%. Por outro lado, as coordenadas do ponto principal foram recuperadas no experimento C, uma vez que o bloco é formado por faixas opostas e uma transversal, possibilitando rotações entre os sistemas de imagem e de terreno, o que minimiza a correlação entre as coordenadas do ponto principal e dos CP's.

No experimento F, o erro sistemático de 1 m introduzido na direção de vôo foi absorvido pelos parâmetros de orientação interior (discrepância de 0,1mm na distância focal, 0,005 mm (~1 pixel) em x_0 e 0,03 mm (~5 pixel) em y_0), uma vez que as coordenadas do CP foram fixadas com 0,2 m de desvio-padrão. A discrepância mais acentuada em y_0 em relação a x_0 pode ser explicada pelo fato do eixo y do sistema imagem ser aproximadamente paralelo à linha de vôo, o que fez com que este parâmetro absorvesse parte do erro sistemático aplicado às coordenadas do CP. Com isso, verificou-se que a qualidade dos pontos reconstruídos no espaço objeto foi mantida (Tabela 27), quando comparada ao experimento E, no qual não foi considerado o erro sistemático na direção de vôo.

Nos demais testes os parâmetros de OI foram estimados com grande qualidade, considerando que as discrepâncias ficaram inferiores a 3 μm (aproximadamente 0,5 pixel) – Tabela 25.

Verifica-se pelos resultados do experimento B, na Tabela 26, que o erro aplicado sobre os parâmetros de OI (0,1 mm) foram absorvidos pelos parâmetros de OE (Coordenadas do CP), cujas componentes apresentaram erros próximos a 3 m, em virtude da forte correlação existente entre a distância focal e a altura de vôo e entre as coordenadas do CP (X_0 , Y_0) e as coordenadas do ponto principal (x_0 , y_0). Devido a isto, a qualidade dos pontos no espaço objeto foi mantida (tabela 27), quando comparado ao experimento A, que foi tido como referência.

Nos experimentos D e E foram realizados processos de FPA com restrições impostas às coordenadas do CP com desvios padrão de 1,0 m e 0,2 m, respectivamente. Apesar de apresentarem resultados similares no espaço objeto (Tabela 27), verificou-se que,

ao se considerar um GPS com maior precisão para o georreferenciamento direto (0,2 m – experimento E), os parâmetros de orientação interior foram estimados com maior fidelidade (Tabela 25) e as discrepâncias entre os parâmetros de orientação exterior foram inferiores (Tabela 26). A correlação entre a distância focal e a componente altimétrica do CP ficou em torno de 75% para o experimento D, contra 17% no experimento E. Como o bloco de imagens é formado por faixas opostas e cruzadas entre si, não houve correlação significativa entre as componentes planimétricas do CP com as coordenadas do ponto principal (30% - Experimento D; 9% - Experimento E).

A partir dos resultados obtidos nos experimentos F e G verificou-se a influência em se considerar um erro de sincronismo de dados na direção da linha de vôo. Ao se considerar a introdução de parâmetros adicionais (Experimento F) pôde-se constatar que o erro de sincronismo foi absorvido pelos parâmetros de OI, mantendo a qualidade na determinação das coordenadas no espaço objeto (Tabela 27). Por outro lado, quando os parâmetros de orientação interior foram pré-fixados (Experimento G), o erro aplicado foi propagado para o espaço objeto, prejudicando a solução na determinação das coordenadas tridimensionais.

Nos experimentos H a L analisou-se a quantidade de pontos de apoio utilizada em conjunto com a introdução de informações de atitude providas de um sistema de navegação inercial com precisão de 1 minuto (1'). Ao se analisar os resultados obtidos (Tabelas 25-27) constatou-se que um número maior de pontos de apoio (experimentos E e J) trouxe uma pequena melhoria na qualidade da estimação dos parâmetros de orientação interior e nas coordenadas de pontos no espaço objeto, como já era esperado. Contudo, estas melhorias não foram muito significativas em relação aos experimentos que consideraram 1 ou 4 pontos de apoio (experimentos H, I, K e L), uma vez que a discrepância nos parâmetros de orientação interior para estes experimentos também ficaram inferiores à terça parte do pixel, e a qualidade na determinação das coordenadas no espaço objeto ficou inferior entre 3 a 5 cm (0,1-0,2 pixel no terreno - GSD) em relação aos experimentos com número total de pontos de apoio (experimentos E e J). Cabe destacar também que em todos estes casos o erro no espaço objeto foi inferior ao erro esperado (Tabela 27).

Ao se considerar injunções sobre os ângulos de atitude verificou-se que não houve melhora nos resultados, uma vez que as discrepâncias nos parâmetros de OI e OE

e a exatidão nas coordenadas de pontos no espaço objeto permaneceram similares às obtidas ao se considerar somente o uso do GPS para a determinação das coordenadas dos CP's.

Por fim, destaca-se que foram considerados como parâmetros adicionais somente os parâmetros relacionados à distância focal, coordenadas do ponto principal e coeficientes de primeira e segunda ordem da distorção radial simétrica. Isso porque os parâmetros relacionados ao coeficiente de terceira ordem da distorção radial, aos coeficientes de distorção descentrada e afinidade não foram considerados significativos nos testes realizados, tendo uma influência de 0,1 pixel na borda da imagem (cerca de 3 vezes inferior ao erro de medida - subpixel). A qualidade das coordenadas dos pontos no espaço objeto foi totalmente compatível com o experimento E, no qual foram considerados somente os parâmetros relacionados a distância focal (f), coordenadas do ponto principal (x_0, y_0) e coeficientes de distorção radial simétrica (k_1, k_2). Além disso, verificou-se que os parâmetros de distorção descentrada foram altamente correlacionados às coordenadas do ponto principal (~90%), uma vez que seus efeitos nas coordenadas de imagem são semelhantes.

6.4.3.2 Experimentos com dados reais – bloco de 32 imagens

Nestes testes, o mesmo sub-bloco de 32 imagens foi utilizado, mas agora considerando os dados reais. Os pontos de enlace foram medidos automaticamente no software LPS com precisão subpixel, com controle de qualidade posterior. Foram medidos 365 pontos, gerando 1452 observações nas imagens. Como neste bloco dispõe-se de onze pontos com coordenadas conhecidas no terreno, oito deles foram considerados como apoio e os outros três pontos como de verificação (Ver Figura 59).

Para melhor definir os experimentos realizados com o bloco de 32 imagens, a Tabela 28 apresenta as características definidas destes, no que se refere às injunções aplicadas e a quantidade dos pontos de terreno.

Tabela 28: Descrição dos experimentos com dados reais – bloco de 32 imagens (BRVIAS).

TESTE	Parâmetros de OI	Parâmetros de OE	Pontos de apoio	Pontos de verificação
A	Fixos com valores pré-calibrados	Livre	8	3
B	Fixos com valores pré-calibrados	Injunção de 1,0 m nas coordenadas do CP	8	3
C	Fixos com valores pré-calibrados	Injunção de 0,5 m nas coordenadas do CP	8	3
D	Fixos com valores pré-calibrados	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	8	3
E	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Livre	8	3
F	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 1,0 m nas coordenadas do CP	8	3
G	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,5 m nas coordenadas do CP	8	3
H	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	8	3
I	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	4	3
J	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	11	0
K	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP e modelo de erros do GPS	8	3

OI: Orientação Interior; OE: Orientação Exterior; FPA: Fototriangulação com Parâmetros Adicionais; CP: Centro Perspectivo

No primeiro experimento foi realizada uma Fototriangulação convencional sem o conhecimento prévio das coordenadas dos centros perspectivos (CP's) e com os parâmetros de OI pré-fixados com os valores da pré-calibração realizada em Janeiro de 2008 com as imagens corrigidas da distorção das lentes no software Flexcolor (coluna D – Tabela 12).

Nos Experimentos B, C e D foi realizada uma fototriangulação fixando-se as coordenadas dos CPs, (determinadas por GPS) com diferentes pesos, e considerando ainda os parâmetros de OI pré-calibrados.

Nos experimentos E ao H aplicou-se o processo de Fototriangulação com parâmetros adicionais (FPA) aplicando-se injunções sobre as coordenadas dos CP's com diferentes pesos. Em seguida, dois processos de FPA variando-se a quantidade de pontos de apoio foram realizados (Experimentos I e J). Por fim, uma FPA considerando também o modelo de erros do GPS (Conforme descrito na Seção 5.4) foi realizada no experimento K.

Os experimentos foram realizados no programa CMC e os resultados são apresentados nas Tabelas 29 a 31. A Tabela 29 traz os parâmetros de orientação interior estimados nos experimentos com FPA e seus respectivos desvios padrão, bem como as discrepâncias destes parâmetros em relação aos valores dos parâmetros de OI pré-calibrados (coluna D – Tabela 12). A Tabela 30 apresenta os valores do Erro Médio Quadrático (EMQ) das discrepâncias entre as coordenadas dos CP's estimadas e as obtidas por GPS, enquanto que a Tabela 31 mostra o EMQ (em metros e em função do GSD da imagem) das discrepâncias nas coordenadas dos pontos de verificação. Na última linha da Tabela 31 são também apresentadas as precisões esperadas (σ_e) no cálculo das coordenadas tridimensionais.

Tabela 29: Parâmetros de OI estimados nos experimentos e discrepâncias entre parâmetros de OI estimados e os pré-calibrados para os testes com dados reais – bloco de 32 imagens (BRVIAS).

		Parâmetros de OI				
Experimento		f (mm)	x ₀ (mm)	y ₀ (mm)	k ₁ (mm ⁻²)	k ₂ (mm ⁻⁴)
E	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE livre/ 8 PA/ 3 PV	49,998	-0,205	0,087	-1,29 E-06	1,77 E-09
		+/- 0,301	+/- 0,019	+/- 0,019	+/- 1,50 E-07	+/- 1,55 E-10
F	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 1,0m/ 8 PA/ 3 PV	49,832	-0,223	0,112	-1,23 E-06	1,77 E-09
		+/- 0,006	+/- 0,007	+/- 0,005	+/- 1,34 E-07	+/- 1,51 E-10
G	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,5m/ 8 PA/ 3 PV	49,832	-0,222	0,111	-1,21 E-06	1,75 E-09
		+/- 0,004	+/- 0,005	+/- 0,003	+/- 1,32 E-07	+/- 1,49 E-10
H	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 8 PA/ 3 PV	49,832	-0,222	0,110	-1,20 E-06	1,72 E-09
		+/- 0,003	+/- 0,003	+/- 0,002	+/- 1,30 E-07	+/- 1,47 E-10
I	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 4 PA/ 3 PV	49,834	-0,224	0,107	-1,22 E-06	1,76 E-09
		+/- 0,004	+/- 0,003	+/- 0,002	+/- 1,29 E-07	+/- 1,45 E-10
J	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 11 PA/ 0 PV	49,830	-0,223	0,109	-1,19 E-06	1,71 E-09
		+/- 0,003	+/- 0,003	+/- 0,002	+/- 1,30 E-07	+/- 1,46 E-10
K	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ shift, drift GPS/ 8 PA/ 3 PV	49,832	-0,222	0,109	-1,20 E-06	1,72 E-09
		+/- 0,003	+/- 0,003	+/- 0,002	+/- 1,31 E-07	+/- 1,47 E-10
		Discrepâncias				
Experimento		f (mm)	x ₀ (mm)	y ₀ (mm)	k ₁ (mm ⁻²)	k ₂ (mm ⁻⁴)
E	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE livre/ 8 PA/ 3 PV	0,185	0,059	0,075	-7,4E-07	9,2E-10
F	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 1,0m/ 8 PA/ 3 PV	0,019	0,042	0,099	-6,7E-07	9,2E-10
G	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,5m/ 8 PA/ 3 PV	0,019	0,042	0,099	-6,6E-07	9,0E-10
H	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 8 PA/ 3 PV	0,019	0,042	0,097	-6,5E-07	8,7E-10
I	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 4 PA/ 3 PV	0,021	0,040	0,095	-6,7E-07	9,0E-10
J	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 11 PA/ 0 PV	0,017	0,041	0,097	-6,3E-07	8,6E-10
K	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ shift, drift GPS/ 8 PA/ 3 PV	0,019	0,042	0,097	-6,4E-07	8,7E-10

Tabela 30: Erro Médio Quadrático das discrepâncias entre as coordenadas dos CP's estimadas e as coletadas pelo GPS - testes com dados reais para o bloco de 32 imagens (BRVIAS).

Experimento		EMQ		
		X ₀ (m)	Y ₀ (m)	Z ₀ (m)
A	<i>OI fixo pré-calibrado/OE livre/ 8 PA/ 3 PV</i>	1,921	2,754	0,451
B	<i>OI fixo pré-calibrado/OE 1,0m/ 8 PA/ 3 PV</i>	1,381	2,003	0,462
C	<i>OI fixo pré-calibrado/OE 0,5m/ 8 PA/ 3 PV</i>	1,001	1,537	0,515
D	<i>OI fixo pré-calibrado/OE 0,2m/ 8 PA/ 3 PV</i>	0,503	0,720	0,457
E	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE livre/ 8 PA/ 3 PV</i>	0,949	0,839	4,719
F	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE 1,0m/ 8 PA/ 3 PV</i>	0,358	0,371	0,169
G	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE 0,5m/ 8 PA/ 3 PV</i>	0,218	0,259	0,137
H	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE 0,2m/ 8 PA/ 3 PV</i>	0,087	0,116	0,097
I	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE 0,2m/ 4 PA/ 3 PV</i>	0,085	0,116	0,081
J	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE 0,2m/ 11 PA/ 0 PV</i>	0,086	0,115	0,093
K	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE 0,2m/ shift,drift GPS/ 8 PA/ 3 PV</i>	0,056	0,079	0,093

Tabela 31: Média e EMQ das discrepâncias nos pontos de verificação, e as precisões esperadas (σ_e) dos pontos no espaço objeto para os testes com dados reais – bloco de 32 imagens (BRVIAS).

Experimento			Média (m)	EMQ (m)	EMQ (GSD)
A	<i>OI fixo pré-calibrado/OE livre/ 8 PA/ 3 PV</i>	X	-0,173	0,207	1,1
		Y	0,046	0,092	0,5
		Z	0,211	0,265	1,4
B	<i>OI fixo pré-calibrado/OE 1,0m/ 8 PA/ 3 PV</i>	X	-0,070	0,135	0,7
		Y	-0,029	0,115	0,6
		Z	0,069	0,392	2,0
C	<i>OI fixo pré-calibrado/OE 0,5m/ 8 PA/ 3 PV</i>	X	0,071	0,150	0,8
		Y	-0,105	0,180	0,9
		Z	-0,012	0,411	2,1
D	<i>OI fixo pré-calibrado/OE 0,2m/ 8 PA/ 3 PV</i>	X	0,346	0,392	2,0
		Y	-0,251	0,344	1,8
		Z	-0,006	0,478	2,4
E	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE livre/ 8 PA/ 3 PV</i>	X	-0,182	0,216	1,1
		Y	0,040	0,089	0,5
		Z	0,270	0,298	1,5
F	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE 1,0m/ 8 PA/ 3 PV</i>	X	-0,144	0,176	0,9
		Y	0,039	0,100	0,5
		Z	0,172	0,219	1,1
G	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE 0,5m/ 8 PA/ 3 PV</i>	X	-0,123	0,155	0,8
		Y	0,042	0,102	0,5
		Z	0,163	0,199	1,0
H	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE 0,2m/ 8 PA/ 3 PV</i>	X	-0,095	0,136	0,7
		Y	0,045	0,097	0,5
		Z	0,134	0,171	0,9
I	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE 0,2m/ 4 PA/ 3 PV</i>	X	-0,058	0,144	0,7
		Y	-0,042	0,118	0,6
		Z	0,205	0,230	1,2
J	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE 0,2m/ 11 PA/ 0 PV</i>	X	-	-	-
		Y	-	-	-
		Z	-	-	-
K	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE 0,2m/ shift,drift GPS/ 8 PA/ 3 PV</i>	X	-0,091	0,134	0,7
		Y	0,051	0,097	0,5
		Z	0,121	0,161	0,8
σ_e	<i>Precisões esperadas</i>	X		0,19	1,0
		Y		0,19	1,0
		Z		0,57	3,3

Pelos resultados apresentados na Tabela 29 verificou-se que as discrepâncias entre os parâmetros de OI estimados e pré-calibrados ficaram na ordem de 0,019 mm para a distância focal, 0,042mm (6 pixels) para a coordenada x_0 e 0,097 mm (14 pixels) para a coordenada y_0 . Estas discrepâncias podem estar associadas às variações das

condições ambientais (pressão e temperatura) entre a calibração terrestre da câmara e a coleta das imagens. Além disso, somam-se a este fato os procedimentos de montagem e desmontagem do sistema na fase decorrente de testes, que pode perturbar a geometria interna da câmara.

Contudo, pôde-se verificar também que o experimento E não apresentou boa qualidade na estimação dos parâmetros de OI (Tabela 29), com altos valores de desvios padrão para os parâmetros estimados, principalmente no que se refere à distância focal (0,30 mm). Isso porque, como os parâmetros de OE não foram pré-estabelecidos com precisão, tem-se alta correlação entre os parâmetros de OI e OE (cerca de 100% entre a distância focal e a componente Z_0 e 60% entre as coordenadas do ponto principal e as componentes planimétricas do CP) e, deste modo, não se pode estimar separadamente estes parâmetros com qualidade, exceto em casos em que se tenha variação significativa da configuração de coleta (imagens convergentes, cruzadas e variação de escala - cerca de 20-30%). Neste caso, a variação da altura de vôo foi na ordem de 5%.

No que se refere aos resultados apresentados na Tabela 30 pôde-se verificar que, à medida que as restrições impostas sobre os parâmetros de OE são menos precisas, tem-se um aumento nas discrepâncias entre os valores dos parâmetros de OE estimados e os previamente determinados por GPS. Neste contexto ainda, analisando-se os experimentos de fototriangulação com parâmetros de OI pré-fixados (A a D) na Tabela 31, nota-se que, ao se fixar os parâmetros de OE com maior precisão, o erro no espaço objeto aumenta. Estes dados indicam que há erros sistemáticos nos parâmetros de OI ou nas coordenadas dos CP's, de modo que ao se fixar por meio de injunções ambos os conjuntos de parâmetros (OI e OE), não se obtém a solução esperada para o ajuste em bloco.

Para verificar se a origem destes erros está relacionada às variações nos parâmetros de OI realizou-se graficamente uma comparação (Figuras 60 e 61) entre os experimentos A do bloco com dados reais e o experimento B do bloco com dados simulados, no qual foi aplicado um erro sistemático sobre os parâmetros de OI. Foram comparadas as discrepâncias entre os parâmetros de OE estimados e os valores definidos como referência nestes experimentos (obtidos por GPS no experimento A com dados reais e os valores definidos como reais no bloco com dados simulados).

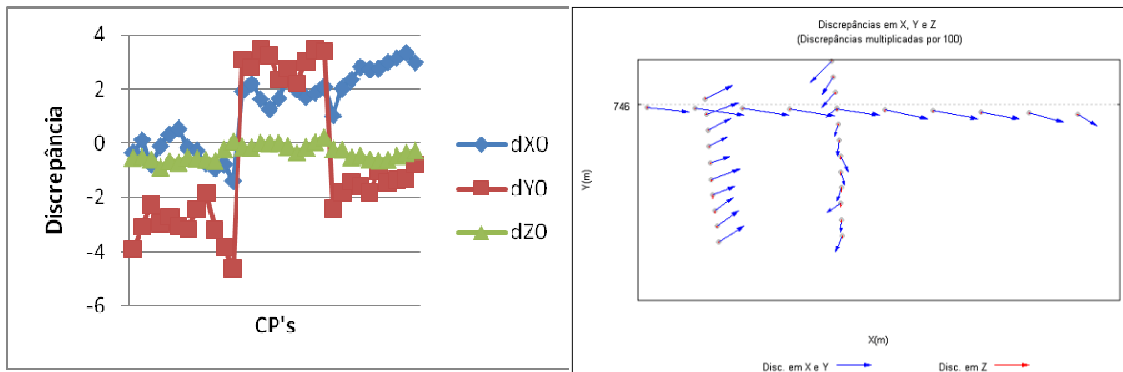


Figura 60: Discrepância entre os parâmetros de OE estimados e obtidos por GPS – Experimento A do bloco de 32 imagens com dados reais (BRVIAS).

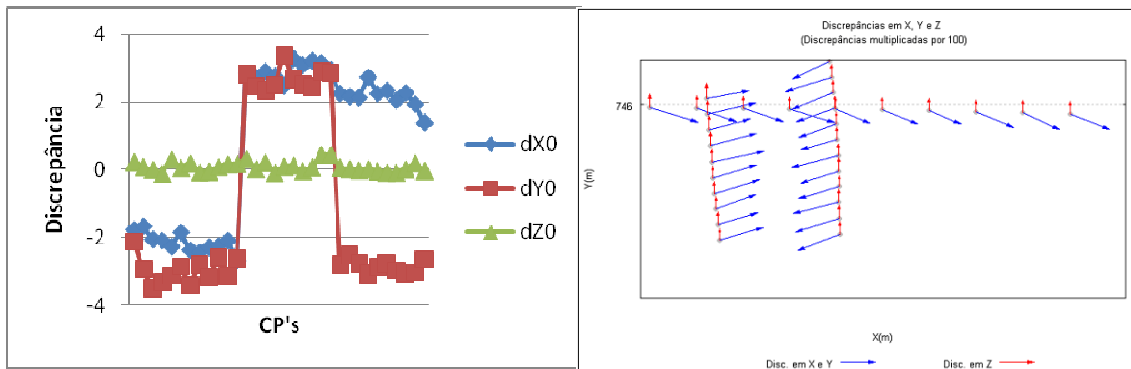


Figura 61: Discrepância entre os parâmetros de OE estimados e verdadeiros – Experimento B do bloco com dados simulados (BRVIAS).

Pelas Figuras 60 e 61 pôde-se verificar que o comportamento das discrepâncias nos parâmetros de OE foi similar para os dois experimentos analisados, indicando assim, que há uma diferença sistemática nos parâmetros de OI pré-calibrados para a condição de coleta das imagens, em relação aos valores pré-calibrados. Deste modo, ao se fixar os parâmetros de OI com os valores incorretos, o erro se propaga aos parâmetros de OE nas situações em que não se considera inunções sobre estes parâmetros (Experimento A – Tabela 30) e, para os casos em que se considera o uso de georreferenciamento direto, o erro se propaga ao espaço objeto (Experimentos B a D – Tabela 31).

As discontinuidades abruptas apresentadas nas Figuras 60 e 61 correspondem às mudanças de faixas de vôo, indicando o efeito inverso dos erros sistemáticos nas coordenadas dos CPs, ao mudar a direção de vôo.

Neste cenário verifica-se a importância de realizar a estimação destes parâmetros em serviço, por meio da Fototriangulação com Parâmetros Adicionais (FPA). Nos experimentos F a H foram testadas diferentes precisões para as coordenadas dos CP's obtidos com GPS, e nota-se que, ao se fixar com maior precisão as coordenadas dos CP's (0,2m – experimento H) tem-se uma solução mais robusta nos parâmetros de OI (Tabela 29) e maior qualidade na determinação de coordenadas tridimensionais no espaço objeto (Tabela 31). A correlação entre os parâmetros de OI e OE foi inferior a 10%. Deste modo, verificou-se que o uso do georreferenciamento direto possibilita a realização da calibração em serviço da câmara, o que traz maior confiabilidade e precisão no ajuste do bloco de imagens.

Os experimentos I e J foram realizados de forma a avaliar o processo de FPA variando-se o número de pontos de apoio considerados no bloco. No experimento I, no qual foram utilizados quatro pontos de apoio, os parâmetros de OI não foram estimados com a mesma precisão que nos experimentos H e J, os quais consideraram um número maior de pontos de apoio. Com isso, a solução no espaço objeto ficou com qualidade um pouco inferior ao experimento H (6 cm em altimetria), conforme mostra a Tabela 31.

No experimento K considerou-se o modelo de erros do GPS no processo de FPA. Verificou-se que os resultados foram melhores que os apresentados no experimento H, no qual este modelo não foi considerado. As discrepâncias nas coordenadas do CP (Tabela 30) foram cerca de 30% menores nas componentes planimétricas e 5% na componente altimétrica. Além disso, o erro altimétrico no espaço objeto foi também reduzido em 9%. Deste modo, ao considerar este modelo adicional pode-se melhorar a confiabilidade na determinação por georreferenciamento direto, visto que estes parâmetros absorvem erros de trajetória.

Os resultados indicam, ainda, que a implementação física de acionamento que foi desenvolvida, permite disparar a câmara e registrar o evento no receptor sem atraso significativo (erro na ordem do microssegundo), proporcionando uma solução de alta qualidade no georreferenciamento direto das imagens.

Como análise dos processos de ajustamento pode-se verificar a qualidade dos dados e parâmetros ajustados por meio de análises estatísticas. Neste trabalho dois testes foram utilizados, realizados a partir dos resultados e valores estatísticos obtidos nos pontos de verificação:

- Teste pela distribuição *Qui-Quadrado* (χ^2), para verificar a discrepância entre o fator de variância da observação unitário a priori (σ_0^2) e o fator a posteriori ($\hat{\sigma}_0^2$), a fim de constatar se esta diferença é significativa a um certo nível de confiança (95%). Para verificar se a hipótese básica não é rejeitada ($\sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2$), o valor amostral, calculado em função dos graus de liberdade e das variâncias a priori e posteriori, deve ser inferior ao valor tabelado. Caso contrário, deve-se verificar se o ajustamento apresenta problemas relacionados a: presença de erros grosseiros, modelo funcional inadequado, mau condicionamento do sistema ou ponderação inadequada das observações;
- Teste *T-Student* (Teste-t), que analisa os resultados em relação aos valores de média e desvio-padrão, verificando a presença de tendências no conjunto de dados analisados, para um determinado nível de significância. Para verificar se a hipótese básica não é rejeitada, o valor amostral, calculado em função dos valores da média e do desvio-padrão, deve ser inferior ao valor tabelado.

Maiores detalhes sobre estes testes estatísticos podem ser encontrados em Gemael (1994). Para os experimentos com este bloco de 32 imagens as análises estatísticas para os testes Qui-quadrado e T-Student foram realizadas, com os resultados apresentados na Tabela 32.

Tabela 32: Dados estatísticos relacionados aos testes *Qui-Quadrado* e *T-Student* – testes com dados reais do bloco de 32 imagens (BRVIAS).

TESTE	σ_0^2	$\hat{\sigma}_0^2$	Teste Qui-quadrado		Teste – t-student			
			Qui-quadrado amostral	Qui-quadrado tabelado	Valor t amostral			Valor t tabelado
					X	Y	Z	
A	2,03E-05	1,36E-05	1083,3	1712	-2,1	0,8	1,9	2,3
B	2,03E-05	1,57E-05	1324,8	1852	-0,9	-0,4	0,3	2,3
C	2,03E-05	2,07E-05	1746,8	1852	0,8	-1,0	0,0	2,3
D	2,03E-05	3,46E-05	2919,7	1852	2,6	-1,5	0,0	2,3
E	2,03E-05	1,30E-05	1032,3	1707	-2,2	0,7	3,0	2,3
F	2,03E-05	1,25E-05	1051,7	1805	-2,0	0,6	1,8	2,3
G	2,03E-05	1,27E-05	1068,6	1805	-1,8	0,6	2,0	2,3
H	2,03E-05	1,31E-05	1102,2	1805	-1,4	0,7	1,8	2,3
I	2,03E-05	1,28E-05	1069,4	1793	-1,4	0,7	1,8	2,3
J	2,03E-05	1,32E-05	1116,5	1815	-	-	-	2,3
K	2,03E-05	1,34E-05	1115,6	1787	-1,2	0,9	1,3	2,3

Pelos valores apresentados na Tabela 32 verificou-se que em quase todos os experimentos realizados as hipóteses básicas não foram rejeitadas, sendo aprovados nos testes estatísticos analisados (Qui-quadrado e T-Student), exceto apenas os experimentos D e E. No experimento D foi realizada uma fototriangulação fixando-se os parâmetros de OI pré-calibrados. Deste modo, os erros nestes parâmetros foram propagados ao espaço objeto, uma vez que se consideraram injunções de OE neste teste; trata-se, portanto de erros sistemáticos não modelados. Já o experimento E apresentou um teste de FPA sem injunções no CP, que mostrou instabilidade nos resultados obtidos devido às correlações entre os parâmetros.

6.4.3.3 Experimentos com dados reais – bloco de 86 imagens

Nesta seção são apresentados os experimentos realizados com todo o bloco de imagens da BRVIAS considerado nesta pesquisa. Conforme já apresentado (Figura 59), o bloco é composto por 86 imagens distribuídas em 3 faixas de vôo, sendo duas faixas em sentidos opostos e uma faixa cruzada. Foram utilizados 22 pontos com coordenadas de terreno conhecidas, dos quais 16 foram considerados pontos de apoio e 6 deles como pontos de verificação. Os pontos de enlace foram medidos automaticamente no software LPS com precisão subpixel, com controle de qualidade posterior pelo operador. Neste bloco

completo o software gerou 965 pontos de enlace, resultando em 3541 observações nas imagens.

Para sintetizar os experimentos realizados com o bloco completo da BRVIAS, a Tabela 33 apresenta as principais características estabelecidas, no que se refere às injunções aplicadas e a quantidade dos pontos de terreno.

Tabela 33: Descrição dos experimentos com dados reais – bloco de 86 imagens (BRVIAS).

TESTE	Parâmetros de OI	Parâmetros de OE	Pontos de apoio	Pontos de verificação
A	Fixos com valores pré-calibrados	Livre	16	6
B	Fixos com valores pré-calibrados	Injunção de 1,0 m nas coordenadas do CP	16	6
C	Fixos com valores pré-calibrados	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	16	6
D	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Livre	16	6
E	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	16	6
F	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	8	6
G	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	3	6
H	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP e modelo de erros GPS	16	6
I	Fixos com valores determinados no bloco de 32 imagens (Experimento J)	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	16	6
J	Fixos com valores determinados no bloco de 32 imagens (Experimento J)	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	8	6
K	Fixos com valores determinados no bloco de 32 imagens (Experimento J)	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	4	6
L	Fixos com valores determinados no bloco de 32 imagens (Experimento J)	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	3	6
M	Fixos com valores determinados no bloco de 32 imagens (Experimento J)	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	1	6

OI: Orientação Interior; OE: Orientação Exterior; FPA: Fototriangulação com Parâmetros Adicionais; CP: Centro Perspectivo

No primeiro experimento realizou-se uma Fototriangulação convencional sem o conhecimento prévio das coordenadas dos CP's e com os parâmetros de OI pré-fixados com os valores da pré-calibração realizada em Janeiro de 2008 com as imagens

corrigidas da distorção das lentes pelo software Flexcolor (coluna D – Tabela 12). Nos dois experimentos seguintes (B e C) foram realizados processos de fototriangulação fixando-se as coordenadas dos CPs (determinadas por GPS) com diferentes pesos, e considerando ainda os parâmetros de OI pré-calibrados.

Nos experimentos D ao H foram aplicadas soluções de FPA com e sem restrições nos parâmetros de OE obtidos por georreferenciamento direto, sendo que os experimentos F e G foram realizados com um número inferior de pontos de apoio. No experimento H considerou-se o modelo de erros do GPS (Ver Seção 5.4)

Já os experimentos I ao M foram realizados considerando o conjunto de parâmetros de OI determinados no bloco de 32 imagens (Experimento J – com todos os pontos de apoio). Isso porque na metodologia deste trabalho estuda-se a idéia em se utilizar um pequeno sub-bloco de imagens, com maior quantidade de pontos de apoio, para a realização da FPA e, com isso, se determinar o conjunto de parâmetros de OI compatíveis com o ambiente de coleta das imagens. Estes parâmetros de OI, mais fidedignos, podem então ser aplicados ao bloco completo de imagens e se realizar a fototriangulação com um número mínimo de pontos de apoio, conforme se estuda nestes experimentos (I ao M).

Os experimentos foram realizados no programa CMC e os resultados são apresentados nas Tabelas 34 a 36. A Tabela 34 traz os parâmetros de orientação interior estimados nos experimentos com FPA, bem como as discrepâncias destes parâmetros em relação aos valores dos parâmetros de OI pré-calibrados (coluna D – Tabela 12). A Tabela 35 apresenta os valores do Erro Médio Quadrático (EMQ) das discrepâncias entre as coordenadas dos CP's estimadas e as obtidos por GPS, enquanto que a Tabela 36 mostra o EMQ das discrepâncias nas coordenadas dos pontos de verificação, com os valores das precisões esperadas (σ_e) nas coordenadas de pontos no espaço objeto.

Tabela 34: Parâmetros de OI estimados nos experimentos e discrepâncias entre parâmetros de OI estimados e os pré-calibrados para os testes com dados reais – bloco de 86 imagens (BRVIAS).

		Parâmetros de OI				
Experimento		f (mm)	x ₀ (mm)	y ₀ (mm)	k ₁ (mm ⁻²)	k ₂ (mm ⁻⁴)
D	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE livre/ 16 PA/ 6 PV	49,964 +/- 0,150	-0,220 +/- 0,014	0,093 +/- 0,012	-1,05 E-06 +/- 8,74 E-08	1,54 E-09 +/- 9,93 E-11
E	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 16 PA/ 6 PV	49,828 +/- 0,002	-0,223 +/- 0,003	0,108 +/- 0,001	-1,00 E-06 +/- 8,27 E-08	1,51 E-09 +/- 9,33 E-11
F	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 8 PA/ 6 PV	49,828 +/- 0,003	-0,223 +/- 0,003	0,109 +/- 0,001	-9,90 E-07 +/- 8,18 E-08	1,50 E-09 +/- 9,23 E-11
G	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 3 PA/ 6 PV	49,805 +/- 0,007	-0,224 +/- 0,003	0,108 +/- 0,001	-9,89 E-07 +/- 8,13 E-08	1,49 E-09 +/- 9,18 E-11
H	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ shift,drift GPS/ 16 PA/ 3 PV	49,831 +/- 0,002	-0,223 +/- 0,003	0,108 +/- 0,001	-1,02 E-06 +/- 8,62 E-08	1,51 E-09 +/- 9,70 E-11
		Discrepâncias				
Experimento		f (mm)	x ₀ (mm)	y ₀ (mm)	k ₁ (mm ⁻²)	k ₂ (mm ⁻⁴)
D	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE livre/ 16 PA/ 6 PV	0,150	0,044	0,081	-4,9E-07	6,9E-10
E	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 16 PA/ 6 PV	0,016	0,041	0,096	-4,5E-07	6,6E-10
F	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 8 PA/ 6 PV	0,014	0,041	0,096	-4,4E-07	6,5E-10
G	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 3 PA/ 6 PV	-0,008	0,040	0,096	-4,4E-07	6,4E-10
H	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ shift,drift GPS/ 16 PA/ 3 PV	0,018	0,041	0,096	-4,7E-07	6,6E-10

Tabela 35: Erro Médio Quadrático das discrepâncias entre as coordenadas dos CP's estimadas e as coletadas pelo GPS - testes com dados reais para o bloco de 86 imagens (BRVIAS).

		EMQ		
Experimento		X ₀ (m)	Y ₀ (m)	Z ₀ (m)
A	OI fixo pré-calibrado/OE livre/ 16 PA/ 6 PV	1,699	2,778	0,491
B	OI fixo pré-calibrado/OE 1,0m/ 16 PA/ 6 PV	0,991	2,205	0,403
C	OI fixo pré-calibrado/OE 0,2m/ 16 PA/ 6 PV	0,380	0,838	0,388
D	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE livre/ 16 PA/ 6 PV	0,748	0,803	3,877
E	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 16 PA/ 6 PV	0,095	0,101	0,096
F	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 8 PA/ 6 PV	0,096	0,097	0,093
G	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 3 PA/ 6 PV	0,095	0,098	0,086
H	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ shift,drift GPS/ 16 PA/ 3 PV	0,064	0,069	0,092
I	OI fixo bloco 32 imagens/OE 0,2m/ 16 PA/ 6 PV	0,096	0,102	0,095
J	OI fixo bloco 32 imagens/OE 0,2m/ 8 PA/ 6 PV	0,096	0,098	0,092
K	OI fixo bloco 32 imagens/OE 0,2m/ 4 PA/ 6 PV	0,095	0,097	0,088
L	OI fixo bloco 32 imagens/OE 0,2m/ 3 PA/ 6 PV	0,096	0,098	0,089
M	OI fixo bloco 32 imagens/OE 0,2m/ 1 PA/ 6 PV	0,096	0,100	0,081

Tabela 36: Média e EMQ das discrepâncias nos pontos de verificação, e as precisões esperadas (σ_e) dos pontos no espaço objeto para os testes com dados reais – bloco de 86 imagens (BRVIAS).

Experimento			Média (m)	EMQ (m)	EMQ (GSD)
A	<i>OI fixo pré-calibrado/OE livre/ 16 PA/ 6 PV</i>	X	0,072	0,240	1,2
		Y	-0,102	0,162	0,8
		Z	0,082	0,365	1,9
B	<i>OI fixo pré-calibrado/OE 1,0m/ 16 PA/ 6 PV</i>	X	0,164	0,287	1,5
		Y	-0,121	0,169	0,9
		Z	-0,122	0,259	1,3
C	<i>OI fixo pré-calibrado/OE 0,2m/ 16 PA/ 6 PV</i>	X	0,520	0,568	2,9
		Y	-0,086	0,147	0,8
		Z	-0,261	0,368	1,9
D	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE livre/ 16 PA/ 6 PV</i>	X	0,072	0,242	1,2
		Y	-0,110	0,165	0,8
		Z	0,113	0,264	1,3
E	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE 0,2m/ 16 PA/ 6 PV</i>	X	0,079	0,194	1,0
		Y	-0,082	0,140	0,7
		Z	0,151	0,220	1,1
F	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE 0,2m/ 8 PA/ 6 PV</i>	X	0,012	0,179	0,9
		Y	-0,060	0,141	0,7
		Z	0,116	0,206	1,1
G	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE 0,2m/ 3 PA/ 6 PV</i>	X	0,137	0,222	1,1
		Y	-0,112	0,191	1,0
		Z	-0,495	0,508	2,6
H	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE 0,2m/ shift,drift GPS/ 16 PA/ 3 PV</i>	X	0,090	0,215	1,1
		Y	-0,030	0,121	0,6
		Z	0,129	0,234	1,1
I	<i>OI fixo bloco 32 imagens/OE 0,2m/ 16 PA/ 6 PV</i>	X	0,072	0,194	1,0
		Y	-0,084	0,142	0,7
		Z	0,145	0,219	1,1
J	<i>OI fixo bloco 32 imagens/OE 0,2m/ 8 PA/ 6 PV</i>	X	0,005	0,182	0,9
		Y	-0,062	0,142	0,7
		Z	0,132	0,218	1,1
K	<i>OI fixo bloco 32 imagens/OE 0,2m/ 4 PA/ 6 PV</i>	X	0,057	0,197	1,0
		Y	-0,065	0,154	0,8
		Z	0,126	0,171	0,9
L	<i>OI fixo bloco 32 imagens/OE 0,2m/ 3 PA/ 6 PV</i>	X	0,046	0,192	1,0
		Y	-0,139	0,203	1,0
		Z	0,169	0,205	1,0
M	<i>OI fixo bloco 32 imagens/OE 0,2m/ 1 PA/ 6 PV</i>	X	0,018	0,238	1,2
		Y	-0,140	0,203	1,0
		Z	0,136	0,222	1,1
σ_e	<i>Precisões esperadas</i>	X		0,19	1,0
		Y		0,19	1,0
		Z		0,57	3,3

A partir dos resultados apresentados na Tabela 34 verificou-se que para os experimentos com FPA houve uma discrepância entre os parâmetros de OI estimados e os valores pré-calibrados na mesma ordem de grandeza que nos experimentos realizados com o bloco de 32 imagens. Isso indica que os parâmetros adicionais calculados para o sub-bloco de imagens (32 imagens) são compatíveis com o bloco completo de imagens e podem ser aplicados como valores pré-fixados (experimentos I ao M).

Conforme já verificado no bloco de 32 imagens, ao se realizar o processo de FPA sem considerar injunções aos parâmetros de OE, não se tem uma solução com confiabilidade para os parâmetros de OI e OE, conforme mostram os resultados para o experimento D nas Tabelas 34 e 35. Isso é devido à correlação entre estes conjuntos de parâmetros (OI e OE), de forma que não se consegue estimar separadamente os parâmetros de OI e OE sem uma configuração de coleta adequada. Conforme mostram os resultados, isso é mais pertinente aos parâmetros relacionados à distância focal e à componente altimétrica do CP, uma vez que nos blocos estudados não há variação significativa da altura de vôo (cerca de 5%). Por outro lado, como se tem faixas em sentidos opostos e cruzadas entre si, foi possível se estimar com melhor qualidade as coordenadas do ponto principal, cujas correlações com as componentes planimétricas do CP ficaram em torno de 50-60% (experimento D).

Com relação aos resultados apresentados na Tabela 35 pôde-se constatar que, conforme observado nos experimentos com o bloco de 32 imagens, à medida que as injunções impostas sobre os parâmetros de OE são menos precisas, tem-se um aumento nas discrepâncias entre os valores dos parâmetros de OE estimados e os determinados com GPS. Da mesma forma, ao se fixar os parâmetros de OE com maior precisão nos experimentos com parâmetros de OI pré-calibrados (experimentos B e C), há um aumento dos erros nas coordenadas dos pontos no espaço objeto como, verificadas anteriormente (bloco de 32 imagens), pelo uso impreciso dos parâmetros de OI que sofreram variação para o ambiente de coleta, em relação aos valores pré-calibrados.

Nos experimentos E, F e G foram realizados processos de FPA variando-se a quantidade de pontos de apoio considerados. Verificou-se pelos resultados do experimento G, quando se utilizou apenas 3 pontos de apoio, que houve uma tendência na componente altimétrica dos pontos de verificação (valores da média – Tabela 36), e com isso, a solução

no espaço objeto não teve o resultado esperado, quando comparada aos resultados dos experimentos E e F. No experimento F foi considerado a metade do número de pontos de apoio (8), e os resultados foram totalmente compatíveis ao experimento E, no qual foram utilizados todos os pontos de apoio. Os resultados mostraram-se também compatíveis ao erro esperado no espaço objeto, conforme valores apresentados na Tabela 36.

No experimento H verificou-se que a introdução do modelo de erros do GPS na FPA trouxe uma redução nas discrepâncias nos CP's ajustados e do GPS em cerca de 30% nas componentes planimétricas e 5% na componente altimétrica (Tabela 35), conforme verificado também no mesmo processamento realizado no bloco de 32 imagens. No que se refere aos parâmetros de OI e as discrepâncias nos pontos de verificação, os resultados foram compatíveis ao experimento E, o qual não considerou o modelo do GPS.

Os experimentos I ao M foram realizados considerando fixos os parâmetros de OI determinados por FPA no bloco de 32 imagens (Experimento J – com todos os pontos de apoio), seguindo a idéia em se realizar a FPA em um sub-bloco com um número inferior de imagens e então aplicar estes parâmetros sobre o bloco completo reduzindo-se o número de pontos de apoio considerados.

Ao analisar os resultados apresentados nas Tabelas 35 e 36 verificou-se que ao se reduzir pela metade a quantidade de pontos de apoio (experimento J), não houve perda de precisão e a solução foi totalmente compatível com os resultados obtidos para o experimento I, no qual foram considerados todos os pontos de apoio. Da mesma forma, no experimento K, quando foram considerados 4 pontos de apoio (nas extremidades das faixas e outro no meio do bloco), a qualidade da solução final foi mantida, com erros nos pontos de verificação abaixo de 1 pixel.

No experimento L considerou-se apenas um ponto na extremidade de cada faixa, e houve uma perda de precisão de aproximadamente 6 cm na componente y, contudo o erro no espaço objeto ficou na ordem de 1 pixel tanto em planimetria quanto em altimetria. Por fim, ao se considerar apenas 1 ponto de apoio (experimento M) houve uma perda de precisão nas componentes planimétricas, em relação aos experimentos I e J, mas, mesmo assim, o EMQ no espaço objeto ficou na ordem de 1 a 1,2 pixel.

Os valores calculados para os testes estatísticos relativos à distribuição Qui-quadrado e T-Student para os experimentos com o bloco de 86 imagens são apresentados na Tabela 37.

Tabela 37: Dados estatísticos relacionados aos testes *Qui-Quadrado* e *T-Student* – testes com o bloco de 86 imagens (BRVIAS).

TESTE	σ_0^2	$\hat{\sigma}_0^2$	Teste Qui-quadrado		Teste – t-student			
			Qui-quadrado amostral	Qui-quadrado tabelado	Valor t amostral			Valor t tabelado
					X	Y	Z	
A	2,03E-05	1,23E-05	2238,8	3838	0,7	-1,8	0,5	2,0
B	2,03E-05	1,48E-05	2882,0	4100	1,6	-1,9	-1,2	2,0
C	2,03E-05	3,88E-05	7555,5	4100	5,1	-1,6	-2,3	2,0
D	2,03E-05	1,20E-05	2181,3	3832	0,7	-2,0	1,1	2,0
E	2,03E-05	1,22E-05	2372,7	4095	1,0	-1,6	1,9	2,0
F	2,03E-05	1,20E-05	2319,6	4071	0,1	-1,1	1,5	2,0
G	2,03E-05	1,18E-05	2272,2	4056	1,8	-1,6	-9,5	2,0
H	2,03E-05	1,36E-05	2640,9	4100	1,0	-0,6	1,4	2,0
I	2,03E-05	1,23E-05	2395,2	4100	0,9	-1,6	1,9	2,0
J	2,03E-05	1,20E-05	2322,6	4076	0,1	-1,1	1,7	2,0
K	2,03E-05	1,19E-05	2296,2	4064	0,7	-1,0	1,9	2,0
L	2,03E-05	1,18E-05	2275,1	4061	0,6	-2,1	3,3	2,0
M	2,03E-05	1,18E-05	2271,6	4055	0,2	-1,9	1,7	2,0

Conforme verificado na Tabela 37 apenas os experimentos C, G e L apresentaram problemas nas análises estatísticas realizadas. No experimento C foi realizada uma fototriangulação fixando-se os parâmetros de OI pré-calibrados e, do mesmo modo que no bloco com 32 imagens, os erros foram propagados ao espaço objeto.

Nos experimentos G e L, apesar de terem sido aceitos no teste Qui-quadrado, apresentaram tendência na componente altimétrica (Tabela 37). O experimento G apresentou uma discrepância sistemática considerável na componente altimétrica, verificando que o uso de somente três pontos de apoio não foi possível para se ter uma solução de boa qualidade na FPA. No experimento L, no qual foram considerados os mesmos três pontos de apoio, mas com parâmetros de OI fixos, houve também problemas de tendência quando realizado o teste T-Student.

6.4.4 Bloco Resende

O bloco Resende, adquirido com o sistema SAAPI em Julho de 2008, é composto por 184 imagens distribuídas em 7 faixas de vôo paralelas, conforme mostra mais adiante a Figura 72. Para este vôo foi utilizada uma câmara Hasselblad H3D (39 Megapixels) na configuração nadir. A altura de vôo para coleta das imagens foi de 1880 m, proporcionando um elemento de resolução no terreno na ordem de 25 cm. A altitude média da região é de 424 m, com uma variação de altitude de aproximadamente 6%. As imagens foram posteriormente corrigidas da distorção das lentes pelo software Flexcolor.

Para este projeto utilizou-se também o sistema de georreferenciamento direto integrado nesta pesquisa, o qual é composto pelo GPS DL4-Plus do sistema SPAN-Novatel e dispositivos de hardware e software. Com este sistema têm-se as coordenadas dos centros perspectivos (CP's) das imagens com a precisão do sistema SPAN, em torno de 15-20 cm para o posicionamento diferencial pós-processado. Para a coleta deste bloco de imagens, uma estação base foi posicionada no local do projeto. Utilizou-se para isso o receptor de dupla-freqüência LEICA GRX 1200, cujos dados foram processados em conjunto com a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). Todos os dados das estações móvel e base foram processados no módulo GrafNav da *Waypoint Inertial Explorer* (Novatel), tendo como resultado as coordenadas dos centros perspectivos das imagens.

Para este bloco de imagens foram utilizados 52 pontos de terreno coletados com receptor GPS de dupla freqüência e pós-processados com o método de posicionamento diferencial, resultando numa precisão na ordem do centímetro. Destes 52 pontos, 46 foram utilizados como pontos de controle e 6 como pontos de verificação em campo nos testes realizados. Os pontos de enlace foram medidos automaticamente no software LPS com precisão subpixel, com controle de qualidade posterior

Considerando os dados do bloco Resende, diversos estudos e análises de calibração foram desenvolvidos. Inicialmente, um sub-bloco composto por 50 imagens foi selecionado, conforme mostra a Figura 62. Esta subárea no bloco possui uma boa distribuição de pontos de apoio e, conforme se estuda nesta pesquisa, as análises iniciais de FPA foram conduzidas neste sub-bloco para posteriormente serem integradas ao bloco completo de imagens.

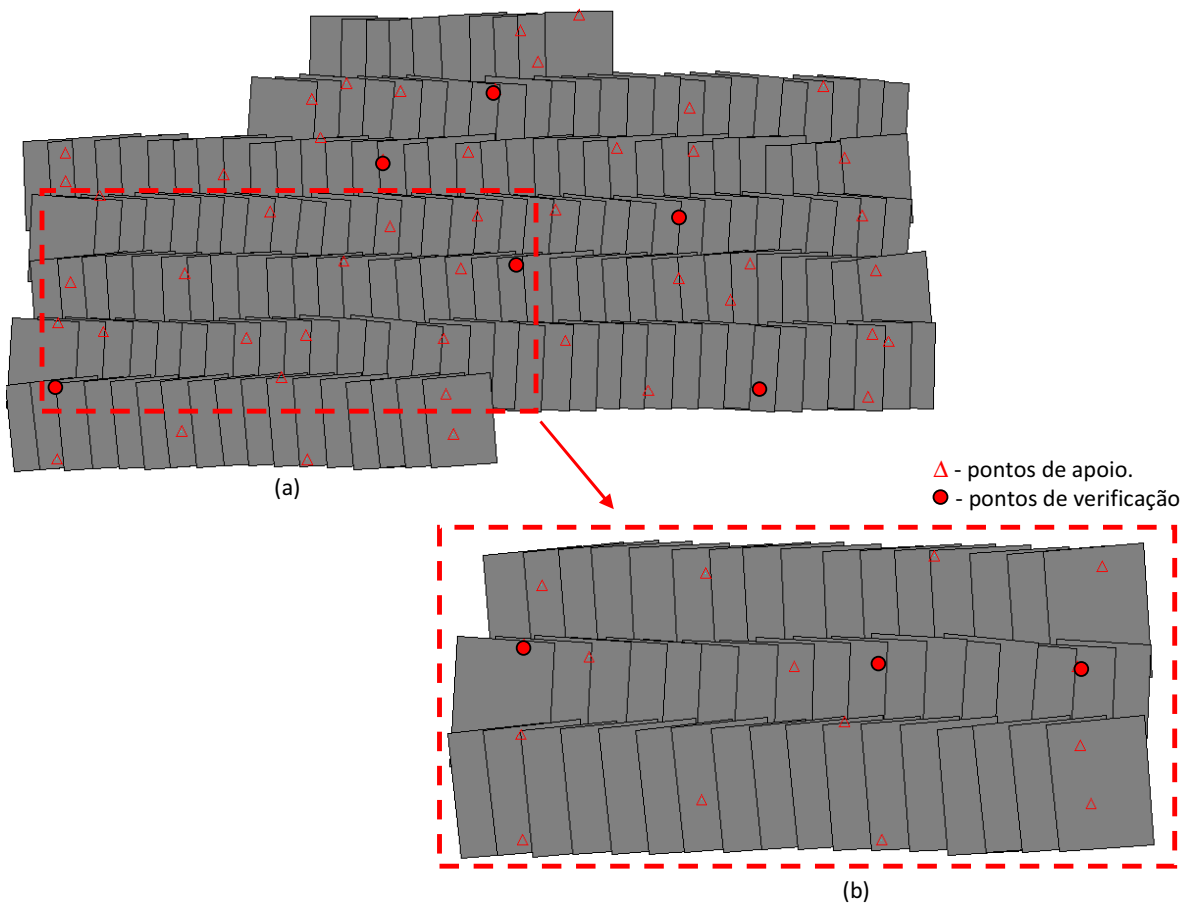


Figura 62: Bloco Resende: (a) bloco completo (184 imagens) com a distribuição dos pontos de apoio e verificação; (b) Sub-bloco de 50 imagens selecionado sobre o bloco completo, com a distribuição dos pontos de apoio e verificação.

6.4.4.1 Experimentos com dados do sub-bloco de 50 imagens

Neste bloco dispõe-se de quinze pontos com coordenadas conhecidas no terreno, sendo que doze deles foram considerados como apoio e os outros três pontos como verificação de campo. Foram gerados automaticamente 705 pontos de enlace, resultando em 2275 observações nas imagens. As características dos experimentos realizados com este bloco de 50 imagens seguem apresentadas na Tabela 38.

Tabela 38: Descrição dos experimentos com dados do bloco de 50 imagens – Bloco Resende.

TESTE	Parâmetros de OI	Parâmetros de OE	Pontos de apoio	Pontos de verificação
A	Fixos com valores pré-calibrados	Livre	12	3
B	Fixos com valores pré-calibrados	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	12	3
C	FPA f, x ₀ , y ₀ , k ₁ , k ₂ livres	Livre	12	3
D	FPA f, x ₀ , y ₀ , k ₁ , k ₂ livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	12	3
E	FPA f, x ₀ , y ₀ , k ₁ , k ₂ livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	15	0
F	FPA f, x ₀ , y ₀ , k ₁ , k ₂ livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	4	3

Neste bloco de imagens foram realizados estudos considerando os parâmetros de OI pré-calibrados e processos de FPA para a estimação dos parâmetros de OI para o ambiente de coleta das imagens em Resende.

Nos experimentos A e B foram realizados processamentos de fototriangulação com os parâmetros de OI pré-calibrados, determinados em campo em Janeiro de 2008 com as imagens corrigidas pelo software Flexcolor (coluna D – Tabela 12). Nos experimentos seguintes foram considerados processos de FPA com e sem injunções nas coordenadas do CP e variando-se a quantidade de pontos de apoio, de forma a buscar a configuração de coleta e dados que proporcione os melhores resultados.

Como resultados dos experimentos realizados (caracterizados na Tabela 38), as tabelas 39, 40 e 41 apresentam, respectivamente, os valores e as discrepâncias nos parâmetros de OI em função dos valores pré-calibrados, o EMQ das discrepâncias nos parâmetros de OE em relação aos valores determinados por georreferenciamento direto, e o EMQ nos pontos de verificação. Na última linha da Tabela 41 são também apresentadas as precisões esperadas (σ_e) no cálculo das coordenadas tridimensionais.

Tabela 39: Parâmetros de OI estimados nos experimentos e discrepâncias entre parâmetros de OI estimados e os pré-calibrados para os testes com dados do bloco de 50 imagens – Bloco Resende.

		Parâmetros de OI				
Experimento		f (mm)	x ₀ (mm)	y ₀ (mm)	k ₁ (mm ⁻²)	k ₂ (mm ⁻⁴)
C	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE livre/ 12 PA/ 3 PV	49,398	-0,479	0,149	-6,03 E-07	1,12 E-09
		+/- 0,332	+/- 0,024	+/- 0,022	+/- 1,16 E-07	+/- 1,21 E-10
D	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 12 PA/ 3 PV	49,814	-0,358	0,137	-6,33 E-07	1,08 E-09
		+/- 0,002	+/- 0,004	+/- 0,01	+/- 1,18 E-07	+/- 1,24 E-10
E	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 15 PA/ 0 PV	49,814	-0,360	0,137	-6,14 E-07	1,06 E-09
		+/- 0,002	+/- 0,004	+/- 0,01	+/- 1,19 E-07	+/- 1,25 E-10
F	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 4 PA/ 3 PV	49,822	-0,381	0,137	-5,63 E-07	9,89 E-10
		+/- 0,006	+/- 0,005	+/- 0,01	+/- 1,12 E-07	+/- 1,18 E-10
		Discrepâncias				
Experimento		f (mm)	x ₀ (mm)	y ₀ (mm)	k ₁ (mm ⁻²)	k ₂ (mm ⁻⁴)
C	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE livre/ 12 PA/ 3 PV	-0,415	-0,215	0,137	-0,5E-07	2,6E-10
D	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 12 PA/ 3 PV	0,001	-0,094	0,125	-0,8E-07	2,2E-10
E	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 15 PA/ 0 PV	0,001	-0,096	0,125	-0,6E-07	2,1E-10
F	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 4 PA/ 3 PV	0,009	-0,116	0,124	-0,0E-07	1,4E-10

Tabela 40: Erro Médio Quadrático das discrepâncias entre as coordenadas dos CP's estimadas e as coletadas pelo GPS - testes com o bloco de 50 imagens (Resende).

		EMQ		
Experimento		X ₀ (m)	Y ₀ (m)	Z ₀ (m)
A	OI fixo pré-calibrado/OE livre/ 12 PA/ 3 PV	4,846	3,838	0,563
B	OI fixo pré-calibrado/OE 0,2m/ 12 PA/ 3 PV	1,216	0,202	0,551
C	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE livre/ 12 PA/ 3 PV	1,878	5,067	15,409
D	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 12 PA/ 3 PV	0,157	0,094	0,138
E	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 15 PA/ 0 PV	0,157	0,094	0,141
F	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 4 PA/ 3 PV	0,140	0,086	0,149

Tabela 41: Média e EMQ das discrepâncias nos pontos de verificação, e as precisões esperadas (σ_e) dos pontos no espaço objeto para os testes com dados reais – bloco de 50 imagens (Resende).

Experimento			Média (m)	EMQ (m)	EMQ (GSD)
A	<i>OI fixo pré-calibrado/OE livre/ 12 PA/ 3 PV</i>	X	0,095	0,220	0,9
		Y	-0,061	0,283	1,1
		Z	0,347	0,799	3,2
B	<i>OI fixo pré-calibrado/OE 0,2m/ 12 PA/ 3 PV</i>	X	-0,087	0,596	2,4
		Y	-0,262	0,419	1,7
		Z	-0,543	1,149	4,6
C	<i>FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2)/ OE livre/ 12 PA/ 3 PV</i>	X	0,115	0,238	1,0
		Y	-0,010	0,257	1,0
		Z	0,370	1,014	4,1
D	<i>FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2)/ OE 0,2m/ 12 PA/ 3 PV</i>	X	0,088	0,136	0,5
		Y	-0,045	0,259	1,0
		Z	-0,067	0,200	0,8
E	<i>FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2)/ OE 0,2m/ 15 PA/ 0 PV</i>	X	-	-	-
		Y	-	-	-
		Z	-	-	-
F	<i>FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2)/ OE 0,2m/ 4 PA/ 3 PV</i>	X	-0,015	0,157	0,6
		Y	-0,104	0,207	0,8
		Z	0,659	0,706	2,8
σ_e	<i>Precisões esperadas</i>	X		0,25	1,0
		Y		0,25	1,0
		Z		0,88	3,5

Pelos resultados apresentados na Tabela 39 verificou-se que as discrepâncias entre os parâmetros de OI estimados e pré-calibrados ficaram na ordem de 0,001 mm para a distância focal, 0,094mm (14 pixels) para a coordenada x_0 e 0,125 mm (18 pixels) para a coordenada y_0 . Nota-se que estas discrepâncias foram consideravelmente diferentes das discrepâncias encontradas nos experimentos com o bloco da BRVIAS (Tabela 29). Além de se considerar ambientes distintos de coleta das imagens, soma-se o fato de as câmaras Hasselblad terem passado por uma manutenção de lentes e *back* digital no mês de Junho de 2008, entre os projetos da BRVIAS e de Resende. Neste caso, as câmaras são desmontadas e perdem-se as calibrações realizadas.

Assim como nos experimentos realizados com o Bloco BRVIAS verificou-se que no experimento de FPA sem considerar injunções ao CP (experimento C), não houve solução de boa qualidade na estimação dos parâmetros de OI (Tabela 39), com altos valores de desvio-padrão para os parâmetros estimados, principalmente no que se refere à distância

focal (0,33 mm). Isso porque, conforme já discutido, tem-se alta correlação entre os parâmetros de OI e OE (cerca de 100% entre a distância focal e a componente Z_0 e 60-70% entre as coordenadas do ponto principal e as componentes planimétricas do CP) e, deste modo, não se pode estimar separadamente estes parâmetros com qualidade, uma vez que não se tem variação significativa da configuração de coleta (imagens convergentes, cruzadas e variação de escala - cerca de 20-30%). Como as faixas do bloco Resende foram coletadas na direção leste-oeste, a correlação entre as coordenadas do ponto principal e as coordenadas do CP ficou entre os parâmetros $x_0 \leftrightarrow Y_0$ e $y_0 \leftrightarrow X_0$.

Além disso, verificou-se que no bloco BRVIAS os parâmetros relacionados às coordenadas do ponto principal no experimento sem injunções no CP (Experimento E – Tabela 29) foram estimados com melhor qualidade do que no experimento de mesma característica realizado com o Bloco Resende (experimento C – Tabela 39). Pode-se associar este fato à faixa cruzada presente no bloco BRVIAS, que melhorou a configuração de coleta para calibração, com uma faixa no sentido perpendicular às outras duas. Deste modo, pelos resultados obtidos para o experimento E do bloco BRVIAS verificou-se que não houve correlação entre a componente x_0 e a coordenada X_0 do CP na faixa cruzada, uma vez que os sistemas de imagem e de terreno ficaram rotacionados, permitindo melhor estimação das coordenadas do ponto principal nas situações em que não se dispõe de sistema de georreferenciamento direto.

Também se pôde verificar na Tabela 39 que a utilização de um número substancialmente inferior de pontos de apoio (experimento F – quatro pontos de apoio) não permitiu a mesma qualidade na estimação dos parâmetros de OI, quando comparado aos experimentos D e E, nos quais foram utilizados doze e quinze pontos de apoio, respectivamente. Um fato a ser considerado neste caso é a ausência de faixas cruzadas, que melhoraria a geometria do bloco.

No que se refere aos resultados apresentados nas Tabelas 40 e 41 verificou-se que ao se considerar injunções impostas às coordenadas do CP e a solução com FPA, tem-se os melhores resultados no ajuste em bloco, com pequenas discrepâncias nos parâmetros de OE e melhor qualidade na determinação de coordenadas tridimensionais no terreno. Conforme se discute neste trabalho, procede-se à estimação dos parâmetros de OI por FPA para um sub-bloco de imagens no qual se dispõe de uma rede de pontos de apoio,

para em seguida serem aplicados ao bloco completo, que pode ser processado com um número mínimo de pontos de apoio.

Os valores calculados para os testes estatísticos relativos à distribuição Qui-quadrado e T-Student para os experimentos realizados são apresentados na Tabela 42.

Tabela 42: Dados estatísticos relacionados aos testes *Qui-Quadrado* e *T-Student* – testes com o bloco de 50 imagens (Resende).

TESTE	σ_0^2	$\hat{\sigma}_0^2$	Teste Qui-quadrado		Teste – t-student			Valor t tabelado
			Qui-quadrado amostral	Qui-quadrado tabelado	Valor t amostral			
					X	Y	Z	
A	2,03E-05	1,14E-05	1212,4	2052	0,7	-0,3	0,7	2,3
B	2,03E-05	7,44E-05	8462,5	2198	-0,2	-1,1	-0,8	2,3
C	2,03E-05	1,03E-05	1092,9	2047	0,8	-0,1	0,6	2,3
D	2,03E-05	1,19E-05	1350,6	2193	1,2	-0,2	-0,5	2,3
E	2,03E-05	1,20E-05	1367,3	2202	-	-	-	2,3
F	2,03E-05	1,04E-05	1168,1	2170	-0,1	-0,8	3,7	2,3

De acordo com os resultados dos testes estatísticos Qui-quadrado e T-Student apresentados na Tabela 42 verificou-se que o experimento B foi rejeitado no teste Qui-quadrado. Neste experimento foi realizada a fototriangulação com os parâmetros de OI pré-fixados na calibração terrestre e injunções impostas sobre as coordenadas dos CP's. Deste modo, com a restrição fixa sobre estes parâmetros com valores discrepantes do ambiente de coleta prejudicou a solução do ajustamento, tendo em vista que as ponderações sobre parâmetros se mostraram inadequadas.

No experimento F, apesar de ter sido aceito no teste Qui-quadrado, apresentou tendência na componente altimétrica, conforme mostra a Tabela 42. Da mesma forma que se verificou no bloco BRVIAS, o uso de um número reduzido de pontos de apoio não se mostrou adequado para se ter uma solução de boa qualidade na FPA.

6.4.4.2 Experimentos com dados do bloco completo – 184 imagens

Nesta seção são apresentados os experimentos realizados com o bloco completo de imagens de Resende. Conforme mostrado na Figura 62, o bloco é formado por

184 imagens distribuídas em 7 faixas de vôo paralelas. Foram utilizados 52 pontos com coordenadas de terreno conhecidas, dos quais 46 foram considerados pontos de apoio e 6 deles como pontos de verificação. Neste bloco completo foram automaticamente medidos 2171 pontos de enlace, proporcionando 7746 observações nas imagens. Os experimentos realizados com este bloco de imagens encontram-se descritos na Tabela 43.

Tabela 43: Descrição dos experimentos com dados do bloco de 184 imagens – Bloco Resende.

TESTE	Parâmetros de OI	Parâmetros de OE	Pontos de apoio	Pontos de verificação
A	Fixos com valores pré-calibrados	Livre	46	6
B	Fixos com valores pré-calibrados	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	46	6
C	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Livre	46	6
D	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	46	6
E	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	20	6
F	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	4	6
G	Fixos com valores determinados no bloco de 50 imagens (Experimento J)	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	46	6
H	Fixos com valores determinados no bloco de 50 imagens (Experimento J)	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	10	6
I	Fixos com valores determinados no bloco de 50 imagens (Experimento J)	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	4	6
J	Fixos com valores determinados no bloco de 50 imagens (Experimento J)	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	2	6

Conforme apresentado na Tabela 43, nos experimentos A e B são realizados processamentos de fototriangulação considerando os parâmetros de OI pré-calibrados com as imagens pré-corrigidas pelo software Flexcolor (coluna D – Tabela 12), com e sem injunções nas coordenadas do CP providas pelo sistema de georreferenciamento direto.

No experimento C foi efetuada uma FPA sem considerar restrições de peso sobre as coordenadas do CP, a fim de verificar a possibilidade de recuperar os parâmetros de

OI em tal situação. Já nos experimentos D ao F foram realizados processos de FPA com diferenciação na quantidade de pontos de apoio considerados.

Os experimentos G ao J foram desenvolvidos com os parâmetros de OI pré-fixados nos valores determinados no sub-bloco de 50 imagens, e variando-se a quantidade de pontos de apoio utilizada no ajuste em bloco.

Os experimentos foram realizados com o programa CMC e os resultados são apresentados nas Tabelas 44 a 46. A Tabela 44 traz os parâmetros de orientação interior estimados nos experimentos com FPA, bem como as discrepâncias destes parâmetros em relação aos valores dos parâmetros de OI pré-calibrados (coluna D – Tabela 12). A Tabela 45 apresenta os valores do Erro Médio Quadrático (EMQ) das discrepâncias entre as coordenadas dos CP's estimadas e as obtidos por GPS, enquanto que a Tabela 46 mostra o EMQ das discrepâncias nas coordenadas dos pontos de verificação, com os valores das precisões esperadas (σ_e) nas coordenadas de pontos no espaço objeto.

Tabela 44: Parâmetros de OI estimados nos experimentos e discrepâncias entre parâmetros de OI estimados e os pré-calibrados para os testes com dados do bloco de 184 imagens – Bloco Resende.

Parâmetros de OI						
Experimento		f (mm)	x ₀ (mm)	y ₀ (mm)	k ₁ (mm ⁻²)	k ₂ (mm ⁻⁴)
C	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE livre/ 46 PA/ 6 PV	49,778	-0,402	0,151	-7,66 E-07	1,26 E-09
		+/- 0,151	+/- 0,011	+/- 0,010	+/- 6,65 E-08	+/- 7,12 E-11
D	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV	49,816	-0,362	0,147	-7,97 E-07	1,28 E-09
		+/- 0,001	+/- 0,002	+/- 0,001	+/- 6,75 E-08	+/- 7,19 E-11
E	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 20 PA/ 6 PV	49,815	-0,368	0,146	-7,91 E-07	1,28 E-09
		+/- 0,001	+/- 0,002	+/- 0,001	+/- 6,45 E-08	+/- 6,86 E-11
F	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 4 PA/ 6 PV	49,816	-0,380	0,146	-7,78 E-07	1,26 E-09
		+/- 0,003	+/- 0,002	+/- 0,001	+/- 6,31 E-08	+/- 6,71 E-11
Discrepâncias						
Experimento		f (mm)	x ₀ (mm)	y ₀ (mm)	k ₁ (mm ⁻²)	k ₂ (mm ⁻⁴)
C	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE livre/ 46 PA/ 6 PV	-0,035	-0,138	0,138	-2,1E-07	4,0E-10
D	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV	0,003	-0,097	0,134	-2,4E-07	4,3E-10
E	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 20 PA/ 6 PV	0,002	-0,104	0,134	-2,4E-07	4,3E-10
F	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂)/ OE 0,2m/ 4 PA/ 6 PV	0,003	-0,115	0,134	-2,2E-07	4,0E-10

Tabela 45: Erro Médio Quadrático das discrepâncias entre as coordenadas dos CP's estimadas e as coletadas pelo GPS - testes com o bloco de 184 imagens (Resende).

Experimento		EMQ		
		X ₀ (m)	Y ₀ (m)	Z ₀ (m)
A	<i>OI fixo pré-calibrado/OE livre/ 46 PA/ 6 PV</i>	5,210	3,758	0,620
B	<i>OI fixo pré-calibrado/OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV</i>	1,397	0,265	0,485
C	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE livre/ 46 PA/ 6 PV</i>	1,150	1,797	1,492
D	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV</i>	0,165	0,097	0,155
E	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE 0,2m/ 20 PA/ 6 PV</i>	0,160	0,091	0,155
F	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂)/ OE 0,2m/ 4 PA/ 6 PV</i>	0,153	0,088	0,148
G	<i>OI fixo bloco 50 imagens/OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV</i>	0,190	0,100	0,161
H	<i>OI fixo bloco 50 imagens/OE 0,2m/ 10 PA/ 6 PV</i>	0,180	0,093	0,159
I	<i>OI fixo bloco 50 imagens/OE 0,2m/ 4 PA/ 6 PV</i>	0,177	0,093	0,156
J	<i>OI fixo bloco 50 imagens/OE 0,2m/ 2 PA/ 6 PV</i>	0,172	0,095	0,158

Tabela 46: Média e EMQ das discrepâncias nos pontos de verificação, e as precisões esperadas (σ_e) dos pontos no espaço objeto para os testes com o bloco de 184 imagens (Resende).

Experimento			Média (m)	EMQ (m)	EMQ (GSD)
A	<i>OI fixo pré-calibrado/OE livre/ 46 PA/ 6 PV</i>	X	-0,001	0,331	1,3
		Y	0,037	0,178	0,7
		Z	0,089	0,579	2,3
B	<i>OI fixo pré-calibrado/OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV</i>	X	0,225	0,441	1,8
		Y	0,005	0,144	0,6
		Z	0,293	1,063	4,3
C	<i>FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2)/ OE livre/ 46 PA/ 6 PV</i>	X	0,065	0,290	1,2
		Y	0,030	0,199	0,8
		Z	0,229	0,645	2,6
D	<i>FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2)/ OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV</i>	X	0,089	0,230	0,9
		Y	0,043	0,159	0,6
		Z	0,115	0,234	0,9
E	<i>FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2)/ OE 0,2m/ 20 PA/ 6 PV</i>	X	0,043	0,207	0,8
		Y	0,095	0,141	0,6
		Z	0,030	0,163	0,7
F	<i>FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2)/ OE 0,2m/ 4 PA/ 6 PV</i>	X	0,080	0,234	0,9
		Y	0,088	0,116	0,5
		Z	0,056	0,275	1,1
G	<i>OI fixo bloco 50 imagens/OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV</i>	X	0,097	0,237	0,9
		Y	0,043	0,152	0,6
		Z	0,070	0,215	0,9
H	<i>OI fixo bloco 50 imagens/OE 0,2m/ 10 PA/ 6 PV</i>	X	0,096	0,234	0,9
		Y	0,063	0,108	0,4
		Z	0,020	0,194	0,8
I	<i>OI fixo bloco 50 imagens/OE 0,2m/ 4 PA/ 6 PV</i>	X	0,124	0,242	1,0
		Y	0,088	0,132	0,5
		Z	-0,032	0,293	1,2
J	<i>OI fixo bloco 50 imagens/OE 0,2m/ 2 PA/ 6 PV</i>	X	0,162	0,255	1,0
		Y	0,010	0,124	0,5
		Z	-0,086	0,290	1,2
σ_e	<i>Precisões esperadas</i>	X		0,25	1,0
		Y		0,25	1,0
		Z		0,88	3,5

Com base nos resultados apresentados na Tabela 44 verificou-se que para os experimentos D ao F os parâmetros de OI foram recuperados de forma precisa, mesmo quando foi utilizado um número pequeno de pontos de apoio (4 pontos – experimento F). Verificou-se que no experimento C, no qual não foi considerada restrição sobre as coordenadas do CP, a solução de FPA não apresentou boa precisão, uma vez que não foi possível estimar separadamente os parâmetros de OI e OE, tendo em vista a correlação

entre estes parâmetros. Ressalta-se também, conforme já discutido nos resultados para o bloco de 50 imagens, que nem mesmo as componentes do ponto principal foram estimadas com confiabilidade, provavelmente devido à ausência da faixa cruzada no bloco de Resende.

Como não foram impostas injunções de OE no experimento C, as discrepâncias nos parâmetros de OE e nas coordenadas de pontos no espaço objeto (Tabelas 45 e 46) foram mais significativas, quando comparadas aos demais experimentos com georreferenciamento direto. No experimento F, o qual considerou 4 pontos de apoio na FPA, apresentou erro nas coordenadas dos pontos no espaço objeto maior que nos experimentos D e E, conforme já havia sido verificado nos demais experimentos. A partir destes experimentos conclui-se que a FPA deve ser aplicada em regiões com maior distribuição de pontos, proporcionando maior confiabilidade na determinação dos parâmetros de orientação interior. Mesmo com o uso de faixas cruzadas, verificado nos experimentos com o Bloco BRVIAS, a solução de FPA com um número reduzido de pontos de apoio não apresentou a mesma qualidade que nas soluções com uma distribuição mais densa de pontos.

Os experimentos G ao J foram realizados considerando fixos os parâmetros de OI determinados por FPA no bloco de 50 imagens, conforme a metodologia proposta de se realizar a FPA em um sub-bloco com um número inferior de imagens e então aplicar estes parâmetros sobre o bloco completo, de forma a reduzir a quantidade de pontos de apoio necessários.

Pelos resultados apresentados nas Tabelas 45 e 46 verificou-se que ao se reduzir em quatro vezes a quantidade de pontos de apoio (experimento H), não houve perda de precisão e a solução foi totalmente compatível com os resultados obtidos para o experimento G, no qual foram considerados todos os pontos de apoio. Ao se considerar um número mínimo de pontos de apoio (experimentos I e J), a solução no espaço objeto foi pouco prejudicada (em torno de 7 cm na componente altimétrica) em relação aos experimentos G e H. Pelos resultados obtidos neste e nos demais blocos analisados verificou-se que, ao se considerar os parâmetros de orientação interior determinados por FPA em um sub-bloco de imagens, pode-se reduzir consideravelmente a quantidade de pontos de apoio no bloco completo de imagens com dados de georreferenciamento direto,

introduzindo apenas pontos nas extremidades somados a pontos isolados no centro do bloco.

Os valores calculados para os testes estatísticos relativos à distribuição Qui-quadrado e T-Student para os experimentos realizados com este bloco de Resende são apresentados na Tabela 47.

Tabela 47: Dados estatísticos relacionados aos testes *Qui-Quadrado* e *T-Student* – testes com o bloco de 184 imagens (Resende).

TESTE	σ_0^2	σ_0^2	Teste Qui-quadrado		Teste – t-student			Valor t tabelado
			Qui-quadrado amostral	Qui-quadrado tabelado	Valor t amostral			
					X	Y	Z	
A	2,03E-05	1,29E-05	5072,9	8192	-0,3	-1,2	0,2	2,0
B	2,03E-05	9,31E-05	39143,3	8751	1,5	0,4	4,5	2,0
C	2,03E-05	1,20E-05	4184,0	7175	-0,1	-0,2	0,6	2,0
D	2,03E-05	1,36E-05	5714,7	8746	-0,1	0,0	0,4	2,0
E	2,03E-05	1,23E-05	5121,2	8667	-0,9	0,9	-0,7	2,0
F	2,03E-05	1,17E-05	4843,7	8224	1,6	0,2	-0,7	2,0
G	2,03E-05	1,40E-05	5886,2	8751	0,1	0,1	0,3	2,0
H	2,03E-05	1,23E-05	5106,0	8642	0,0	-0,1	-0,6	2,0
I	2,03E-05	1,22E-05	5053,7	8623	0,0	1,5	-0,8	2,0
J	2,03E-05	1,21E-05	5008,7	8488	0,8	1,9	0,5	2,0

Do mesmo modo que foi verificado nos testes realizados com o bloco de Resende com 50 imagens, o experimento no qual foi realizada a fototriangulação com os parâmetros de OI pré-fixados na calibração terrestre e com injunções impostas sobre as coordenadas dos CP's (experimento B) não foi aceito nos testes estatísticos realizados. Isso porque se aplicou uma injunção absoluta sobre os parâmetros de OI com valores não realísticos, tornando as ponderações sobre parâmetros inadequadas.

6.4.4.2.1 Testes com os modelos de Brown e Ebner – Bloco de 184 imagens (Resende)

Como experimentos adicionais com o bloco de imagens de Resende, nesta seção apresentam-se testes de FPA com os modelos de Brown e Ebner. Estes modelos são comumente usados em processamentos de fototriangulação com parâmetros adicionais em

câmaras analógicas e digitais, e foram realizados para se verificar os resultados obtidos nos modelos de câmaras digitais de médio formato, conforme estudados neste trabalho.

Conforme apresentado no Capítulo III, os modelos de Brown e Ebner constituem-se de polinômios cujos coeficientes modelam os efeitos de distorção das lentes e demais erros sistemáticos provenientes do processo de aquisição e digitalização das imagens, como erros de deformação do filme, distorção de afinidade e outros erros residuais, como a parte não modelada da refração fotogramétrica.

Os testes foram realizados no software LPS com os mesmos conjuntos de dados utilizados nos experimentos com o bloco de Resende, apresentados na seção anterior (6.4.4.2). A Tabela 48 apresenta os experimentos que foram realizados com os modelos de Brown e Ebner para o bloco de Resende.

Tabela 48: Descrição dos experimentos com os modelos de Brown e Ebner - dados do bloco de 184 imagens (Resende).

TESTE	Parâmetros adicionais	Parâmetros de OE	Pontos de apoio	Pontos de verificação
A	FPA Modelo de Brown (14 parâmetros)	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	46	6
B	FPA Modelo de Ebner (12 parâmetros)	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	46	6
C	FPA f, x_0, y_0 + Modelo de Brown (14 parâmetros)	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	46	6
D	FPA f, x_0, y_0 + Modelo de Ebner (12 parâmetros)	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	46	6
E	FPA f, x_0, y_0 + Modelo de Brown (14 parâmetros)	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	4	6
F	FPA f, x_0, y_0 + Modelo de Ebner (12 parâmetros)	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	4	6

Os experimentos A e B foram realizados considerando somente os modelos polinomiais de Brown e Ebner na FPA, respectivamente. Foram utilizados os parâmetros de OI pré-calibrados (coluna D – Tabela 12).

Já nos demais experimentos (C ao F), os parâmetros relativos à distância focal e as coordenadas do ponto principal foram também calculados, sendo que os experimentos E e F foram realizados com um número inferior de pontos de apoio.

Os resultados são apresentados nas Tabelas 49 a 51. A Tabela 49 traz os parâmetros de orientação interior estimados nos experimentos C ao F, bem como as discrepâncias destes parâmetros em relação aos valores dos parâmetros de OI pré-calibrados (coluna D – Tabela 12). A Tabela 50 apresenta os valores do Erro Médio Quadrático (EMQ) das discrepâncias entre as coordenadas dos CP's estimadas e as obtidos por GPS, enquanto que a Tabela 51 mostra o EMQ das discrepâncias nas coordenadas dos pontos de verificação.

Tabela 49: Parâmetros de OI estimados nos experimentos e discrepâncias entre parâmetros de OI estimados e os pré-calibrados para os testes com dados do bloco de 184 imagens – Bloco Resende.

Experimento		Parâmetros de OI		
		f (mm)	x_0 (mm)	y_0 (mm)
C	<i>FPA (f,x₀,y₀)+Brown/ OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV</i>	49,807	-0,358	0,134
D	<i>FPA (f,x₀,y₀)+Ebner/ OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV</i>	49,813	-0,371	0,147
E	<i>FPA (f,x₀,y₀)+Brown/ OE 0,2m/ 4 PA/ 6 PV</i>	49,811	-0,362	0,134
F	<i>FPA (f,x₀,y₀)+Ebner/ OE 0,2m/ 4 PA/ 6 PV</i>	49,815	-0,387	0,146
Experimento		Discrepâncias		
		f (mm)	x_0 (mm)	y_0 (mm)
C	<i>FPA (f,x₀,y₀)+Brown/ OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV</i>	0,006	-0,094	0,122
D	<i>FPA (f,x₀,y₀)+Ebner/ OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV</i>	0,000	-0,107	0,135
E	<i>FPA (f,x₀,y₀)+Brown/ OE 0,2m/ 4 PA/ 6 PV</i>	-0,002	-0,098	0,122
F	<i>FPA (f,x₀,y₀)+Ebner/ OE 0,2m/ 4 PA/ 6 PV</i>	0,002	-0,123	0,134

Tabela 50: Erro Médio Quadrático das discrepâncias entre as coordenadas dos CP's estimadas e as coletadas pelo GPS - testes com os modelos de Ebner e Brown - bloco de 184 imagens (Resende).

Experimento		EMQ		
		X ₀ (m)	Y ₀ (m)	Z ₀ (m)
A	FPA Brown/ OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV	0,466	0,166	0,201
B	FPA Ebner/ OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV	2,168	0,393	0,521
C	FPA (f,x ₀ ,y ₀)+Brown/ OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV	0,270	0,151	0,181
D	FPA (f,x ₀ ,y ₀)+Ebner/ OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV	0,273	0,153	0,184
E	FPA (f,x ₀ ,y ₀)+Brown/ OE 0,2m/ 4 PA/ 6 PV	0,241	0,138	0,181
F	FPA (f,x ₀ ,y ₀)+Ebner/ OE 0,2m/ 4 PA/ 6 PV	0,246	0,140	0,185

Tabela 51: Média e EMQ das discrepâncias nos pontos de verificação para os testes com o bloco de 184 imagens (Resende) - testes com os modelos de Ebner e Brown.

Experimento			Média (m)	EMQ (m)	EMQ (GSD)
A	FPA Brown/ OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV	X	-0,171	0,322	1,3
		Y	-0,070	0,226	0,9
		Z	-0,152	0,260	1,0
B	FPA Ebner/ OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV	X	-0,262	0,428	1,7
		Y	-0,167	0,226	0,9
		Z	-0,176	0,773	3,1
C	FPA (f,x ₀ ,y ₀)+Brown/ OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV	X	-0,081	0,235	0,9
		Y	-0,027	0,152	0,6
		Z	-0,030	0,270	1,1
D	FPA (f,x ₀ ,y ₀)+Ebner/ OE 0,2m/ 46 PA/ 6 PV	X	-0,083	0,240	1,0
		Y	-0,013	0,159	0,6
		Z	-0,033	0,228	0,9
E	FPA (f,x ₀ ,y ₀)+Brown/ OE 0,2m/ 4 PA/ 6 PV	X	-0,067	0,246	1,0
		Y	-0,055	0,079	0,3
		Z	-0,095	0,368	1,5
F	FPA (f,x ₀ ,y ₀)+Ebner/ OE 0,2m/ 4 PA/ 6 PV	X	-0,055	0,238	1,0
		Y	-0,042	0,071	0,3
		Z	-0,089	0,349	1,4
σ_e	Precisões esperadas	X		0,25	1,0
		Y		0,25	1,0
		Z		0,88	3,5

Pelos resultados apresentados nas Tabelas 49 e 50 verificou-se que ao se considerar apenas os modelos polinomiais e os parâmetros de OI nominais (experimentos A e B), os resultados não se mostraram com boa qualidade, principalmente para o modelo de

Ebner, que apresentou discrepâncias entre os CP's ajustados e originais superiores a 50 cm e discrepâncias altimétricas nos pontos de verificação em torno de três vezes o GSD.

Ao se considerar os parâmetros de OI na solução de FPA (experimentos C ao F), os resultados apresentaram maior qualidade, tanto nas discrepâncias nos CP's quanto na determinação de coordenadas no espaço objeto.

Quando se comparou os resultados dos experimentos C e D aos resultados do experimento D da seção anterior (f, x_0, y_0, k_1, k_2 – Tabela 46), verificou-se que os valores nas discrepâncias no espaço objeto foram muito próximos. Contudo, as discrepâncias nas coordenadas dos CP's no experimento D da seção anterior (Tabela 45) foram inferiores em cerca de 40% em planimetria e 15% em altimetria, quando comparados aos experimentos C e D.

Nos experimentos com apenas quatro pontos de apoio (experimentos E e F – Tabela 48; experimento F – Tabela 46) verificou-se que o uso de um número reduzido de parâmetros adicionais proporcionou melhores resultados. No experimento F da seção anterior pôde-se verificar que o erro na componente altimétrica dos pontos de verificação foi cerca de 20% inferior que nos experimentos realizados com os modelos de Brown e Ebner (experimentos E e F – Tabela 51). Além disso, do mesmo modo que foi verificado nos experimentos com 46 pontos de apoio, as discrepâncias entre os CP's ajustados e originais foram inferiores em torno de 40% em planimetria e 15% em altimetria para o experimento com os parâmetros de OI explícitos em relação aos experimentos com os modelos de Brown e Ebner.

6.4.5 Bloco Presidente Prudente – Arranjo dual

No dia 09 de Outubro de 2008 realizou-se um vôo teste na cidade de Presidente Prudente-SP com o sistema dual, no qual as câmaras digitais Hasselblad são dispostas de modo convergente na plataforma de coleta, conforme definido no Capítulo V. Deste conjunto coletado, selecionou-se um bloco de 22 imagens (11 de cada câmara), dispostas em três faixas de vôo, sendo duas faixas paralelas e uma cruzada, conforme

apresentado na Figura 63. A altura de vôo foi na ordem de 1100 m, proporcionando um elemento de resolução no terreno na ordem de 15 cm na direção nadir. A altitude média da região imageada é de 416 m, com uma variação do terreno na ordem de 4%.

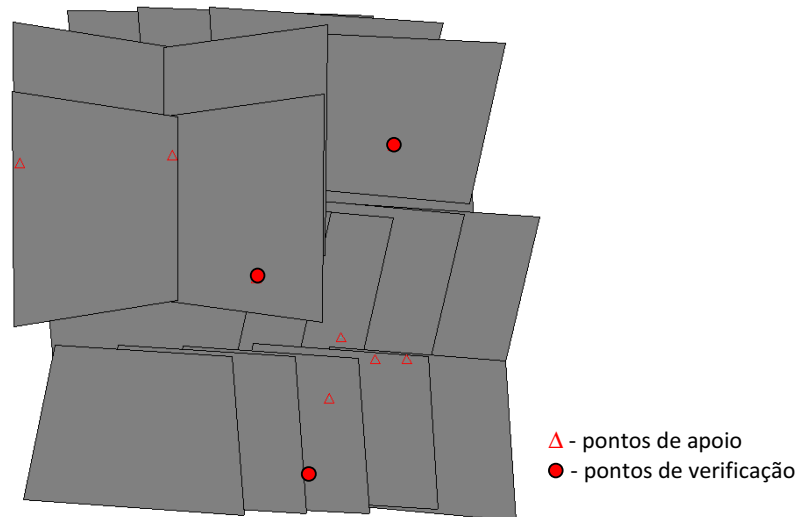


Figura 63: Bloco Presidente Prudente coletado com o sistema dual.

Neste experimento utilizou-se também o sistema de georreferenciamento direto integrado nesta pesquisa, o qual é composto pelo GPS DL4-Plus do sistema SPAN-Novatel e dispositivos de hardware e software. Com este sistema têm-se as coordenadas dos centros perspectivos (CP's) das imagens com a precisão obtida pelo sistema SPAN, em torno de 15-20 cm para o posicionamento diferencial pós-processado. Utilizou-se a estação base da RBMC, localizada na UNESP de Presidente Prudente. Todos os dados das estações móvel e base foram processados no módulo GrafNav da *Waypoint Inertial Explorer* (Novatel), tendo como resultado as coordenadas dos centros perspectivos das imagens.

Para este bloco de imagens coletados na configuração dual foram utilizados 9 pontos de terreno coletados com receptor GPS de dupla frequência e pós-processados com o método de posicionamento diferencial, resultando numa precisão na ordem do centímetro. Destes 9 pontos, 6 foram utilizados como pontos de controle e 3 como pontos de verificação. Os pontos de enlace foram medidos automaticamente no software LPS com precisão subpixel, com controle de qualidade posterior pelo operador. Foram medidos 507 pontos de enlace, resultando em 1502 observações nas imagens. Verificou-se que, alguns pontos medidos automaticamente apresentaram erros de

correspondências nas imagens vizinhas, principalmente os pontos que apareceram em diversas imagens e quando se utilizou a faixa cruzada, devido à convergência das fotos e a diferença de geometria do quadro no terreno entre estas faixas. Nestas condições, o uso de uma unidade de navegação inercial para o pré-conhecimento preciso dos ângulos de atitude das imagens torna-se muito relevante. Somado a isso, pode-se recorrer à retificação prévia das imagens para a atenuação das diferenças de escala e melhor estimativa dos pontos de enlace.

Antes da realização do voo com o sistema dual, um conjunto de imagens com a plataforma de coleta já montada na configuração do voo foi adquirido no campo de calibração da FCT/UNESP. Foram coletadas 16 imagens de cada câmara, com variações de escala, ângulo de visada e rotacionadas entre si. Além disso, alguns alvos novos foram posicionados na parte superior do campo de calibração. Isso porque quando se realiza a coleta com a plataforma de coleta dual, tem-se uma extensa área de cobertura no espaço objeto e os alvos do campo de calibração se concentram em maior número nas regiões centrais das imagens, conforme mostra a Figura 64 (os novos alvos estão destacados pelos círculos). Com os novos alvos há uma melhoria na distribuição dos pontos nas imagens, proporcionando uma solução mais robusta de orientação interior.



Figura 64: Cobertura obtida a partir de uma aquisição com a plataforma de coleta dual do sistema SAAP, com os novos alvos do campo de calibração da FCT/UNESP destacados na parte superior.

As coordenadas de imagem dos alvos do campo de calibração foram medidas no software MID com precisão subpixel. Foram considerados 60 alvos de controle e mais de 20 pontos fotogramétricos. Os conjuntos de imagens foram processados no programa CMC considerando duas abordagens:

- 1) Sem injunção de orientação relativa: as imagens coletadas pelas duas câmaras são processadas simultaneamente no programa CMC para o cálculo dos parâmetros de OI. Os parâmetros de orientação relativa entre as câmaras na plataforma de coleta são calculados posteriormente a partir das equações apresentadas na Seção 5.4, após a determinação dos parâmetros de OE das imagens;
- 2) Com injunção de orientação relativa: neste caso, considerou-se o uso das equações de injunção de orientação relativa com a garantia de estabilidade geométrica da configuração de câmaras na plataforma de coleta. Além do cálculo dos parâmetros de OI, tem-se a estimação simultânea dos parâmetros de orientação relativa a partir da rigidez da geometria imposta sobre os parâmetros. Para este experimento considerou-se uma variação (desvio-padrão) no arranjo de câmaras na ordem de 30'' para os ângulos e 1 mm para a distância entre os CP's.

Os resultados para estes dois processamentos de calibração são apresentados nas Tabelas 52 e 53. Foram considerados os parâmetros relacionados à distância focal (f), coordenadas do ponto principal (x_0, y_0) e os coeficientes k_1 e k_2 de distorção radial simétrica. Neste conjunto de imagens com o sistema dual, assim como no bloco aéreo, o recurso de correção da distorção das lentes do software Flexcolor da Hasselblad não foi considerado.

Tabela 52: Parâmetros de orientação interior para as duas câmaras Hasselblad obtidos nos testes de calibração com o sistema dual.

	<i>Teste 1 – sem injeção de OR</i>		<i>Teste 2 – com injeção de OR</i>	
	<i>Câmara 1</i>	<i>Câmara 2</i>	<i>Câmara 1</i>	<i>Câmara 2</i>
<i>f (mm)</i>	50,146 +/- 0,004	50,181 +/- 0,003	50,138 +/- 0,008	50,025 +/- 0,008
<i>x₀ (mm)</i>	-0,138 +/- 0,002	-0,359 +/- 0,003	-0,127 +/- 0,004	-0,320 +/- 0,004
<i>y₀ (mm)</i>	-0,001 +/- 0,002	0,224 +/- 0,002	-0,005 +/- 0,006	0,196 +/- 0,005
<i>k₁ (mm⁻²)</i>	-2,931 * 10⁻⁵ +/- 1,153 * 10 ⁻⁷	-3,013 * 10⁻⁵ +/- 7,945 * 10 ⁻⁸	-2,736 * 10⁻⁵ +/- 4,545 * 10 ⁻⁷	-2,968 * 10⁻⁵ +/- 2,577 * 10 ⁻⁷
<i>k₂ (mm⁻⁴)</i>	1,612 * 10⁻⁸ +/- 2,176 * 10 ⁻¹⁰	1,765 * 10⁻⁸ +/- 1,268 * 10 ⁻¹⁰	1,254 * 10⁻⁸ +/- 8,740 * 10 ⁻¹⁰	1,640 * 10⁻⁸ +/- 4,171 * 10 ⁻¹⁰

Tabela 53: Parâmetros de orientação relativa entre as câmaras Hasselblad na plataforma de coleta estimados no experimento com imagens adquiridas sobre o campo de calibração da FCT/UNESP.

	<i>Dω</i>	<i>Dϕ</i>	<i>Dκ</i>	<i>D (Distância entre os Cp's)</i>
<i>Teste 1 – sem injeção de OR</i>	-35° 54' 47,93" +/- 0° 1' 3,58"	-0° 31' 11,39" +/- 0° 1' 26,12"	179° 48' 9,78" +/- 0° 2' 14,15"	11,041 cm +/- 0,593 cm
<i>Teste 2 – com injeção de OR</i>	-35° 53' 7,45" +/- 0° 0' 48,96"	-0° 29' 35,16" +/- 0° 0' 45,42"	179° 49' 17,05" +/- 0° 0' 52,18"	11,247 cm +/- 0,032 cm

Pelos dados apresentados na Tabela 52 verificou-se que os parâmetros de OI estimados nos dois testes de calibração apresentaram diferenças nos valores e um aumento nos desvios padrão dos parâmetros, decorrente da alteração do modelo estocástico na solução do ajustamento pelos mínimos quadrados e da imposição da condição de estabilidade da geometria entre as câmaras. Os parâmetros de orientação relativa estimados (Teste 2 – Tabela 53) são usados nos testes de FPA com o sistema dual de câmaras, apresentados ainda nesta seção.

Considerando os dados de calibração terrestre (Tabelas 52 e 53) e a realização do voo com o sistema dual, descrito anteriormente, alguns estudos e análises de calibração foram desenvolvidos. Os processamentos de calibração foram realizados simultaneamente para as duas câmaras Hasselblad, incluindo análises de orientação relativa entre elas. Os experimentos realizados encontram-se apresentados na Tabela 54.

Tabela 54: Descrição dos experimentos com dados do bloco de Presidente Prudente.

TESTE	Parâmetros de OI	Parâmetros de OE	Pontos de apoio	Pontos de verificação
A	Fixo com valores pré-calibrados	Livre	6	3
B	Fixo com valores pré-calibrados	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	6	3
C	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres para as duas câmaras	Livre	6	3
D	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres para as duas câmaras	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	6	3
E	FPA $f, x_0, y_0, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2, A, B$ livres para as duas câmaras	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	6	3
F	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres para a câmara 1	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	6	3
G	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres para a câmara 2	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	6	3
H	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres (1 conjunto para as duas câmaras)	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	6	3
I	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres para as duas câmaras	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP e modelo de erros GPS	6	3
J	FPA f, k_1, k_2 livres para as duas câmaras	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP e modelo de erros GPS	6	3
K	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres para as duas câmaras	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	2	3
L	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 livres para as duas câmaras	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP e injunção de orientação relativa	6	3
M	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 + Modelo de Brown -14 parâmetros (1 conjunto para as duas câmaras)	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	6	3
N	FPA f, x_0, y_0, k_1, k_2 + Modelo de Ebner -12 parâmetros (1 conjunto para as duas câmaras)	Injunção de 0,2 m nas coordenadas do CP	6	3

Conforme apresentado na Tabela 54, nos experimentos A e B são realizados processamentos de fototriangulação considerando os parâmetros de OI pré-

calibrados (Tabela 52), com e sem injunções nas coordenadas do CP providas pelo sistema de georreferenciamento direto.

No experimento C foi efetuada uma FPA sem considerar restrições de peso sobre as coordenadas do CP, a fim de verificar a possibilidade em recuperar os parâmetros de OI, tendo como geometria as imagens convergentes. Já os experimentos D e E foram realizados processos de FPA com diferenciação nos parâmetros de OI considerados.

Nos experimentos F e G foram desenvolvidos processamentos nos quais os parâmetros de OI de uma das câmaras foram considerados como incógnitas, sendo o conjunto da outra câmara fixado com os valores pré-calibrados. Já no experimento H, apenas um conjunto de parâmetros de OI foi calculado para as duas câmaras.

Os experimentos I e J apresentaram os processamentos de FPA considerando o modelo de erros do GPS. No experimento J os parâmetros relacionados às coordenadas do ponto principal (x_0 , y_0) foram fixados com os valores pré-calibrados, visto que os parâmetros de *shift* e *drift* apresentam efeitos similares ao deslocamento do ponto principal.

No experimento K foi realizada a FPA com um número inferior de pontos de apoio. O experimento L apresenta um teste considerando as equações de injunção de orientação relativa entre as câmaras na plataforma de coleta.

Por fim, os experimentos M e N apresentam testes de FPA realizados no software LPS com os modelos polinomiais de Brown e Ebner.

Os experimentos foram realizados no programa CMC e os resultados são apresentados nas Tabelas 55 a 60. As Tabelas 55 a 58 trazem os parâmetros de orientação interior estimados nos experimentos com FPA, bem como as discrepâncias destes parâmetros em relação aos valores dos parâmetros de OI pré-calibrados (Tabela 52). A Tabela 59 apresenta os valores do Erro Médio Quadrático (EMQ) das discrepâncias entre as coordenadas dos CP's estimadas e as obtidos por GPS, enquanto que a Tabela 60 mostra o EMQ das discrepâncias nas coordenadas dos pontos de verificação.

Tabela 55: Parâmetros de OI estimados nos experimentos para os testes com dados do bloco de Presidente Prudente – câmara 1.

Experimento		Parâmetros de OI				
		f (mm)	x_0 (mm) y_0 (mm)	k_1 (mm ⁻²) k_2 (mm ⁻⁴) k_3 (mm ⁻⁶)	p_1 (mm ⁻¹) p_2 (mm ⁻¹)	A B
C	FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2) para as 2 câmaras/ OE livre/ 6 PA/ 3 PV	50,179 +/- 0,095	-0,133 +/- 0,011	-2,99 E-05 +/- 2,91 E-07	-	-
			0,023 +/- 0,037	1,71 E-08 +/- 3,86 E-10	-	-
D	FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2) para as 2 câmaras/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	50,190 +/- 0,005	-0,131 +/- 0,004	-2,99 E-05 +/- 2,72 E-07	-	-
			0,014 +/- 0,006	1,72 E-08 +/- 3,69 E-10	-	-
E	FPA ($f, x_0, y_0, k_1, k_2,$ k_3, p_1, p_2, A, B) para as 2 câmaras/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	50,192 +/- 0,005	-0,155 +/- 0,010	-3,03 E-05 +/- 7,22 E-07	-3,78 E-06 +/- 1,37 E-06	1,02 E-05 +/- 3,22 E-05
			0,019 +/- 0,009	1,86 E-08 +/- 2,10 E-09	6,04 E-07 +/- 1,00 E-06	-9,50 E-05 +/- 5,53 E-05
F	FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2) para a câmara 1/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	50,114 +/- 0,007	-0,129 +/- 0,005	-2,94 E-05 +/- 3,98 E-07	-	-
			-0,038 +/- 0,019	1,64 E-08 +/- 5,69 E-10	-	-
H	FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2) - 1 conjunto para as 2 câmaras/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	50,191 +/- 0,005	-0,187 +/- 0,004	-2,91 E-05 +/- 2,63 E-07	-	-
			0,053 +/- 0,007	1,58 E-08 +/- 3,56 E-10	-	-
I	FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + shift drift GPS/ 6 PA/ 3 PV	50,190 +/- 0,005	-0,132 +/- 0,004	-2,99 E-05 +/- 2,73 E-07	-	-
			0,014 +/- 0,006	1,72 E-08 +/- 3,70 E-10	-	-
J	FPA (f, k_1, k_2) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + shift drift GPS/ 6 PA/ 3 PV	50,189 +/- 0,005	-	-3,01 E-05 +/- 2,74 E-07	-	-
			-	1,74 E-08 +/- 3,72 E-10	-	-
K	FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + shift drift GPS/ 2 PA/ 3 PV	50,184 +/- 0,007	-0,131 +/- 0,004	-2,99 E-05 +/- 2,72 E-07	-	-
			0,008 +/- 0,007	1,72 E-08 +/- 3,69 E-10	-	-
L	FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + OR/ 6 PA/ 3 PV	50,190 +/- 0,004	-0,131 +/- 0,004	-2,99 E-05 +/- 2,72 E-07	-	-
			0,014 +/- 0,006	1,72 E-08 +/- 3,69 E-10	-	-
M	FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2) + Brown - 1 conjunto para as 2 câmaras / OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	50,114	-0,178 -	-	-	-
			0,011 -	-	-	-
N	FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2) + Ebner - 1 conjunto para as 2 câmaras / OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	49,739	-0,147 -	-	-	-
			-0,127 -	-	-	-

Tabela 56: Discrepâncias entre parâmetros de OI estimados e os pré-calibrados para os testes com dados do bloco de Presidente Prudente – câmara 1.

Experimento		Discrepâncias				
		f (mm)	x ₀ (mm)	y ₀ (mm)	k ₁ (mm ⁻²)	k ₂ (mm ⁻⁴)
C	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂) para as 2 câmaras/ OE livre/ 6 PA/ 3 PV	0,050	0,008	0,024	0,0 E-05	0,1 E-08
D	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂) para as 2 câmaras/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	0,060	0,009	0,015	0,0 E-05	0,1 E-08
E	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂ , k ₃ , p ₁ , p ₂ , A, B) para as 2 câmaras/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	0,060	0,009	0,020	-0,1 E-05	0,2 E-08
F	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂) para a câmara 1/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	-0,016	0,012	0,037	-0,1 E-05	0,2 E-08
H	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂) - 1 conjunto para as 2 câmaras/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	0,061	-0,047	0,054	0,0 E-05	0,0 E-08
I	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + shift drift GPS/ 6 PA/ 3 PV	0,060	0,009	0,015	0,0 E-05	0,1 E-08
J	FPA (f,k ₁ ,k ₂) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + shift drift GPS/ 6 PA/ 3 PV	0,059	-	-	-0,1 E-05	0,1 E-08
K	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + shift drift GPS/ 2 PA/ 3 PV	0,054	0,009	0,015	0,0 E-05	0,1 E-08
L	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + OR/ 6 PA/ 3 PV	0,060	0,009	0,015	0,0 E-05	0,1 E-08
M	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂) + Brown - 1 conjunto para as 2 câmaras / OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	-0,016	-0,038	0,012	-	-
N	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂) + Ebner - 1 conjunto para as 2 câmaras / OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	-0,391	-0,007	-0,126	-	-

Tabela 57: Parâmetros de OI estimados nos experimentos para os testes com dados do bloco de Presidente Prudente – câmara 2.

Experimento		Parâmetros de OI				
		f (mm)	x_0 (mm) y_0 (mm)	k_1 (mm ⁻²) k_2 (mm ⁻⁴) k_3 (mm ⁻⁶)	p_1 (mm ⁻¹) p_2 (mm ⁻¹)	A B
C	FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2) para as 2 câmaras/ OE livre/ 6 PA/ 3 PV	50,024 +/- 0,129	-0,310 +/- 0,015	-2,89 E-05 +/- 3,24 E-07	-	-
			0,117 +/- 0,047	1,50 E-08 +/- 4,15 E-10	-	-
D	FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2) para as 2 câmaras/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	50,192 +/- 0,005	-0,336 +/- 0,006	-2,87 E-05 +/- 2,99 E-07	-	-
			0,238 +/- 0,011	1,51 E-08 +/- 4,04 E-10	-	-
E	FPA ($f, x_0, y_0, k_1, k_2,$ k_3, p_1, p_2, A, B) para as 2 câmaras/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	50,207 +/- 0,006	-0,382 +/- 0,014	-3,17 E-05 +/- 7,65 E-07	-6,45 E-06 +/- 1,97 E-06	-5,10 E-05 +/- 4,35 E-05
			0,216 +/- 0,017	2,44 E-08 +/- 2,21 E-09	-2,19 E-07 +/- 1,47 E-06	1,39 E-04 +/- 7,80 E-05
G	FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2) para a câmara 2/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	50,194 +/- 0,007	-0,350 +/- 0,009	-2,87 E-05 +/- 4,63 E-07	-	-
			0,221 +/- 0,018	1,50 E-08 +/- 6,25 E-10	-	-
H	FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2) - 1 conjunto para as 2 câmaras/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	50,191 +/- 0,005	-0,187 +/- 0,004	-2,91 E-05 +/- 2,63 E-07	-	-
			0,053 +/- 0,007	1,58 E-08 +/- 3,56 E-10	-	-
I	FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + shift drift GPS/ 6 PA/ 3 PV	50,192 +/- 0,005	-0,337 +/- 0,006	-2,87 E-05 +/- 3,00 E-07	-	-
			0,241 +/- 0,011	1,51 E-08 +/- 4,05 E-10	-	-
J	FPA (f, k_1, k_2) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + shift drift GPS/ 6 PA/ 3 PV	50,191 +/- 0,005	-	-2,87 E-05 +/- 3,00 E-07	-	-
			-	1,50 E-08 +/- 4,04 E-10	-	-
K	FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + shift drift GPS/ 2 PA/ 3 PV	50,186 +/- 0,008	-0,337 +/- 0,006	-2,87 E-05 +/- 2,99 E-07	-	-
			0,237 +/- 0,013	1,50 E-08 +/- 4,04 E-10	-	-
L	FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + OR/ 6 PA/ 3 PV	50,194 +/- 0,005	-0,339 +/- 0,005	-2,87 E-05 +/- 3,00 E-07	-	-
			0,238 +/- 0,011	1,51 E-08 +/- 4,04 E-10	-	-
M	FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2) + Brown - 1 conjunto para as 2 câmaras / OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	50,114	-0,178 0,011	-	-	-
			-	-	-	-
N	FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2) + Ebner - 1 conjunto para as 2 câmaras / OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	49,739	-0,147 -0,127	-	-	-
			-	-	-	-

Tabela 58: Discrepâncias entre parâmetros de OI estimados e os pré-calibrados para os testes com dados do bloco de Presidente Prudente – câmara 2.

Experimento		Discrepâncias				
		f (mm)	x ₀ (mm)	y ₀ (mm)	k ₁ (mm ⁻²)	k ₂ (mm ⁻⁴)
C	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂) para as 2 câmaras/ OE livre/ 6 PA/ 3 PV	0,141	0,050	-0,108	0,1 E-05	-0,2 E-08
D	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂) para as 2 câmaras/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	0,027	0,024	0,012	0,1 E-05	-0,2 E-08
E	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂ , k ₃ , p ₁ , p ₂ , A, B) para as 2 câmaras/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	0,041	-0,021	0,009	-0,1 E-05	0,7 E-08
G	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂) para a câmara 2/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	0,029	0,010	0,009	0,2 E-05	-0,3 E-08
H	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂) - 1 conjunto para as 2 câmaras/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	0,026	-0,173	-0,172	0,1 E-05	-0,2 E-08
I	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + shift drift GPS/ 6 PA/ 3 PV	0,027	0,024	0,015	0,1 E-05	-0,2 E-08
J	FPA (f,k ₁ ,k ₂) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + shift drift GPS/ 6 PA/ 3 PV	0,026	-	-	0,1 E-05	-0,2 E-08
K	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + shift drift GPS/ 2 PA/ 3 PV	0,021	0,023	0,012	0,1 E-05	-0,2 E-08
L	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + OR/ 6 PA/ 3 PV	0,027	0,024	0,012	0,1 E-05	-0,2 E-08
M	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂) + Brown - 1 conjunto para as 2 câmaras / OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	-0,051	0,182	-0,214	-	-
N	FPA (f,x ₀ ,y ₀ ,k ₁ ,k ₂) + Ebner - 1 conjunto para as 2 câmaras / OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV	-0,426	0,213	-0,352	-	-

Tabela 59: Erro Médio Quadrático das discrepâncias entre as coordenadas dos CP's estimadas e as coletadas pelo GPS - testes com o bloco de Presidente Prudente.

Experimento		EMQ		
		X ₀ (m)	Y ₀ (m)	Z ₀ (m)
A	<i>OI fixo pré-calibrado/OE livre/ 6 PA/ 3 PV</i>	0,437	1,018	1,148
B	<i>OI fixo pré-calibrado/OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV</i>	0,152	0,208	0,291
C	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) para as 2 câmaras/ OE livre/ 6 PA/ 3 PV</i>	0,644	0,787	3,060
D	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) para as 2 câmaras/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV</i>	0,085	0,086	0,093
E	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂, k₃, p₁, p₂, A, B) para as 2 câmaras/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV</i>	0,086	0,084	0,088
F	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) para a câmara 1/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV</i>	0,798	0,444	1,184
G	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) para a câmara 2/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV</i>	0,757	0,276	0,256
H	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) - 1 conjunto para as 2 câmaras/ OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV</i>	0,541	0,308	0,584
I	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + shift drift GPS/ 6 PA/ 3 PV</i>	0,065	0,075	0,087
J	<i>FPA (f,k₁,k₂) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + shift drift GPS/ 6 PA/ 3 PV</i>	0,084	0,087	0,093
K	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + shift drift GPS/ 2 PA/ 3 PV</i>	0,085	0,090	0,095
L	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) para as 2 câmaras/ OE 0,2m + OR/ 6 PA/ 3 PV</i>	0,104	0,071	0,083
M	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) + Brown - 1 conjunto para as 2 câmaras / OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV</i>	0,726	0,328	0,661
N	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) + Ebner - 1 conjunto para as 2 câmaras / OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV</i>	4,272	2,143	1,105

Tabela 60: Média e EMQ das discrepâncias nos pontos de verificação para os testes com o bloco de P Prudente.

Experimento			Média (m)	EMQ (m)	EMQ (GSD)
A	<i>OI fixo pré-calibrado/OE livre/ 6 PA/ 3 PV</i>	X	0,036	0,110	0,7
		Y	-0,085	0,131	0,9
		Z	0,120	0,270	1,8
B	<i>OI fixo pré-calibrado/OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV</i>	X	-0,040	0,059	0,4
		Y	-0,024	0,036	0,3
		Z	-0,540	0,555	3,7
C	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) para as 2 câmaras/OE livre/ 6 PA/ 3 PV</i>	X	0,064	0,128	0,8
		Y	-0,089	0,104	0,7
		Z	0,301	0,311	2,1
D	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) para as 2 câmaras/OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV</i>	X	0,038	0,076	0,5
		Y	-0,055	0,075	0,5
		Z	0,141	0,220	1,4
E	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂, k₃, p₁, p₂, A, B) para as 2 câmaras/OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV</i>	X	0,051	0,093	0,6
		Y	-0,033	0,043	0,3
		Z	0,174	0,210	1,4
F	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) para a câmara 1/OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV</i>	X	0,088	0,103	0,7
		Y	0,106	0,252	1,7
		Z	-1,172	1,187	7,8
G	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) para a câmara 2/OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV</i>	X	0,154	0,175	1,2
		Y	-0,025	0,074	0,5
		Z	0,353	0,569	3,8
H	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) - 1 conjunto para as 2 câmaras/OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV</i>	X	0,079	0,113	0,8
		Y	-0,062	0,176	1,2
		Z	-0,034	0,191	1,3
I	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) para as 2 câmaras/OE 0,2m + shift drift GPS/ 6 PA/ 3 PV</i>	X	0,038	0,075	0,5
		Y	-0,052	0,074	0,5
		Z	0,145	0,223	1,5
J	<i>FPA (f,k₁,k₂) para as 2 câmaras/OE 0,2m + shiftdrift GPS/ 6 PA/ 3 PV</i>	X	0,046	0,081	0,5
		Y	-0,035	0,051	0,3
		Z	0,054	0,193	1,3
K	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) para as 2 câmaras/OE 0,2m + shift drift GPS/ 2 PA/ 3 PV</i>	X	0,113	0,145	1,0
		Y	0,005	0,067	0,5
		Z	-0,110	0,215	1,4
L	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) para as 2 câmaras/OE 0,2m+OR/ 6 PA/ 3 PV</i>	X	0,028	0,061	0,4
		Y	-0,052	0,073	0,5
		Z	0,141	0,221	1,4
M	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) + Brown - 1 conjunto para as 2 câmaras / OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV</i>	X	-0,017	0,097	0,7
		Y	0,107	0,160	1,1
		Z	0,035	0,289	1,9
N	<i>FPA (f,x₀,y₀,k₁,k₂) + Ebner - 1 conjunto para as 2 câmaras / OE 0,2m/ 6 PA/ 3 PV</i>	X	-0,994	1,098	7,3
		Y	1,493	1,669	11,1
		Z	4,872	5,707	38,0
σ_e	<i>Precisões esperadas</i>	X		0,25	1,0
		Y		0,25	1,0
		Z		0,88	3,5

Considerando os resultados apresentados nas Tabelas 55 a 58 pôde-se verificar que para os experimentos D, E e J os parâmetros de OI foram recuperados de forma precisa, mesmo quando foi considerado um número pequeno de pontos de apoio (2 pontos – experimento k). A introdução de um número superior de parâmetros adicionais (experimento E), relativos à distorção descentrada e ao modelo de afinidade, não trouxe ganho de qualidade na coordenadas de pontos no espaço objeto em relação ao experimento D. Verificou-se correlação superior a 90% entre os parâmetros de distorção descentrada e as coordenadas do ponto principal, visto que ambos proporcionam um efeito de deslocamento na imagem causado pelo não-alinhamento do eixo óptico. Os parâmetros de afinidade apresentaram pequena influência sobre as coordenadas de imagem, com efeito na ordem de 0,05-0,15 pixel nas bordas da imagem (cerca de metade do erro de medida de pontos nas imagens).

No experimento C, no qual não foram impostas injunções sobre as coordenadas dos CP's, os parâmetros de orientação interior obtidos tiveram menor confiabilidade, com valores de desvios padrão mais elevados e correlações mais significativas entre os parâmetros de OI e OE, em relação aos demais experimentos nos quais foram impostas restrições de posição. Contudo, conforme verificado também no bloco BRVIAS, o processamento de FPA com a faixa cruzada contribuiu para uma solução mais precisa nas coordenadas do ponto principal para os casos em que não se considera injunções sobre as coordenadas dos CP's, o que não foi possível aplicar para o bloco Resende, apenas com faixas paralelas. Ressalta-se, ainda, que os coeficientes de correlação entre as coordenadas do ponto principal e as componentes planimétricas dos CP's ficaram na ordem dos 20-30% para o bloco dual, enquanto que nos blocos BRVIAS e Resende estiveram em torno dos 60-70%, o que se deve provavelmente à configuração de imagens convergentes que permite uma melhoria da solução de calibração.

Para o caso do experimento F foi realizada uma FPA determinando-se apenas os parâmetros de OI relacionado à câmara 1, sendo os parâmetros de OI da câmara 2 fixados com os valores pré-calibrados. Já no experimento G, os parâmetros calculados na FPA foram os da câmara 2, e os parâmetros da câmara 1 foram pré-fixados. Verificou-se nestes experimentos que não foi possível se obter uma solução de boa qualidade, com

discrepâncias acentuadas nas coordenadas dos centros perspectivos e nos pontos no espaço objeto, conforme verificado nos resultados apresentados nas Tabelas 59 e 60.

Verificou-se que no experimento H, quando se calculou apenas um conjunto de parâmetros de OI para as duas câmaras, obteve-se uma solução intermediária de FPA, tomando-se como base os parâmetros de OI calculados no experimento D para as duas câmaras (Tabelas 55 a 58). Verifica-se que o valor calculado da distância focal para as duas câmaras no experimento D são praticamente os mesmos (50,19 mm) e, desta forma, a distância focal calculada no experimento H ficou nesta mesma ordem de grandeza, resultando numa solução altimétrica compatível com os resultados obtidos no experimento D. De outro modo, como as coordenadas do ponto principal das duas câmaras calculadas no experimento D diferem, e o valor intermediário calculado no experimento H não proporcionou a mesma precisão planimétrica no espaço objeto. Além disso, pôde-se notar que ao se considerar apenas um conjunto de parâmetros de OI no experimento H, parte dos erros foram absorvidos pelos parâmetros de OE, resultando em uma discrepância mais acentuada nas coordenadas do CP (em torno de seis vezes maior em relação ao experimento D - Tabela 59).

Nos experimentos I e J o modelo de erros do GPS (*shift/drift*) foi considerado em conjunto com a FPA. Verificou-se que no experimento I os parâmetros de OI e a qualidade na determinação de pontos no espaço objeto obtidos foram totalmente compatíveis com os resultados obtidos no experimento D (Tabelas 55 a 60), no qual não se considerou o modelo de erros GPS/INS. Contudo, as discrepâncias nas coordenadas dos CP's foram cerca de 15-20% menores no experimento I (Tabela 59), tendo em vista que os parâmetros do modelo de erros do GPS absorveram os erros não modelados na determinação por georreferenciamento direto. No experimento J as coordenadas do ponto principal não foram calculadas no processo de FPA, e verificou-se que a discrepância relacionada ao uso dos valores pré-calibrados para as coordenadas do ponto principal das câmaras foi absorvida pelas coordenadas dos CP's e pelos parâmetros do GPS, resultando em parâmetros de OI e precisão no espaço objeto compatíveis aos experimentos D e I.

O experimento K foi realizado com um número inferior de pontos de apoio (2 pontos). Pelos resultados obtidos, apresentados nas Tabelas 55 a 60, verificou-se que os parâmetros de OI calculados apresentaram compatibilidade com os parâmetros calculados

nos experimentos com maior número de pontos (Experimentos D, I e J), assim como as discrepâncias nas coordenadas dos CP's (Tabela 59). Pela Tabela 60 pôde-se notar que o EMQ no espaço objeto ficou dentro do esperado (em torno de 1,0 GSD), sendo que somente o erro na componente X foi mais elevado em cerca de 7 cm em relação aos demais experimentos com maior quantidade de pontos de apoio (Experimentos D, I e J).

O experimento L foi realizado considerando as equações de inunção de orientação relativa entre as câmaras. A tolerância aplicada foi de 30" para as rotações e 1 mm para a distância. Os resultados obtidos para este experimento foram equivalentes aos valores calculados para o experimento D, que consiste no mesmo experimento sem considerar as inunções de orientação relativa, conforme mostram as Tabelas 55 a 60. Os resultados mostraram grande estabilidade do conjunto de câmaras, tendo os parâmetros de orientação relativa calculados os seguintes valores:

$$\begin{aligned} \omega &= -35^{\circ} 54' 59,45'' \pm 0^{\circ} 0' 5,172'' \\ \phi &= -0^{\circ} 30' 32,407'' \pm 0^{\circ} 0' 12,385'' \\ \kappa &= 179^{\circ} 48' 46,655'' \pm 0^{\circ} 0' 5,883'' \\ d &= 15,26 \text{ cm} \pm 0,008 \text{ cm} \end{aligned}$$

Verificou-se que os parâmetros de orientação relativa tiveram seus valores estimados com grande precisão, cujos desvios padrão ficaram na ordem de 5-12" para os ângulos e na casa do décimo do milímetro para a informação de distância entre os CP's, mantendo a qualidade na determinação dos parâmetros de orientação interior e coordenadas no espaço objeto. Apesar da alta precisão na informação de distância, seu valor ficou discrepante em aproximadamente 3 cm em relação ao valor pré-calibrado. Isso pode estar associado a inunção também imposta às coordenadas dos CP's, que foram ajustadas para este novo valor de distância.

Nos experimentos M e N foram realizados processos de FPA considerando os modelos polinomiais de Brown e Ebner. Conforme permite o software LPS, considerou-se apenas um conjunto de parâmetros (f , x_0 , y_0 , polinômio) para as duas câmaras. No experimento N, no qual se considerou o modelo de Ebner, verificaram-se erros extremamente acentuados nos resultados (na ordem de metros – Tabelas 59 e 60), podendo-se concluir que esta configuração não se mostrou adequada para a situação analisada.

Com relação ao experimento M, que considerou o modelo de Brown na FPA, os resultados mostraram também que o uso de somente um conjunto de parâmetros adicionais não é adequado para um arranjo com duas câmaras, mesmo que de modelos iguais. As discrepâncias entre os CP's ajustados e originais apresentaram valores superiores a 50 cm e nos pontos de verificação o erro altimétrico ficou próximo a duas vezes o GSD. No experimento H realizou-se também a FPA com somente um conjunto de parâmetros adicionais para as duas câmaras (realizado no programa CMC), mas considerando somente os parâmetros relativos à distância focal, coordenadas do ponto principal e distorção das lentes. Apesar de ter proporcionado um resultado melhor que no experimento com o modelo de Brown, principalmente na altimetria, verificou-se também que considerar apenas um conjunto de parâmetros não proporciona um resultado de boa qualidade.

Deste modo, a melhor solução foi encontrada no experimento D, no qual foi considerado um conjunto de parâmetros adicionais por câmara. Neste caso cada câmara é tratada com parâmetros particulares e os resultados apresentam maior precisão, tanto nos parâmetros de OE estimados quanto nas coordenadas no espaço objeto.

Os valores calculados para os testes estatísticos relativos à distribuição Qui-quadrado e T-Student para os experimentos realizados com este bloco de Presidente Prudente são apresentados na Tabela 61.

Tabela 61: Dados estatísticos relacionados aos testes *Qui-Quadrado* e *T-Student* – testes com o bloco de Presidente Prudente.

TESTE	σ_0^2	$\hat{\sigma}_0^2$	Teste Qui-quadrado		Teste – t-student			
			Qui-quadrado amostral	Qui-quadrado tabelado	Valor t amostral			Valor t tabelado
					X	Y	Z	
A	2,03E-05	1,79E-05	1191,3	1438	0,6	-1,1	0,8	2,3
B	2,03E-05	2,04E-05	1424,0	1506	-1,2	-1,2	-1,7	2,3
C	2,03E-05	1,69E-05	1116,4	1427	0,9	-1,5	1,7	2,3
D	2,03E-05	1,67E-05	1154,2	1491	1,0	-1,4	1,2	2,3
E	2,03E-05	1,64E-05	1128,6	1485	0,9	-1,3	1,4	2,3
F	2,03E-05	6,71E-05	4667,3	1501	1,5	0,7	-1,7	2,3
G	2,03E-05	4,02E-05	2796,2	1501	1,5	-0,6	1,1	2,3
H	2,03E-05	2,91E-05	2024,1	1501	1,2	-0,6	-0,3	2,3
I	2,03E-05	1,71E-05	1170,0	1477	0,9	-1,2	1,1	2,3
J	2,03E-05	1,75E-05	1200,9	1481	1,0	-1,2	0,5	2,3
K	2,03E-05	1,66E-05	1140,7	1483	1,3	0,1	-0,9	2,3
L	2,03E-05	1,68E-05	1184,3	1520	0,8	-1,2	1,1	2,3
M	-	-	-	-	-0,3	1,2	0,2	2,3
N	-	-	-	-	-1,6	1,5	1,5	2,3

Pelos valores apresentados na Tabela 61 verificou-se que os experimentos F, G e H não foram aceitos no Teste Qui-Quadrado. Nestes experimentos apenas um conjunto de parâmetros adicionais foi considerado, ou seja, o modelo não é adequado à realidade física. Nos experimentos F e G, considerou-se o conjunto de parâmetros para uma câmara e os valores nominais para a outra câmara. Já no experimento H, verificou-se a possibilidade de se modelar um conjunto de parâmetros adicionais para as duas câmaras. De qualquer forma, verificou-se que nenhum destes testes possibilitaram resultados precisos, conforme verificado nas Tabelas 55 a 60. Deste modo, considerar apenas um grupo de parâmetros não é adequado na solução de FPA para um sistema dual.

6.4.6 Síntese dos Resultados

Conforme verificado nos testes realizados, ao se utilizar a FPA – Fototriangulação com Parâmetros Adicionais, com as posições dos Centros Perspectivos fornecidos por GPS de dupla frequência, obteve-se uma melhoria na qualidade e na confiabilidade no uso de câmaras digitais de médio formato em aplicações fotogramétricas. Considerando todos os experimentos apresentados, algumas considerações de caráter geral puderam ser realizadas, de forma a sintetizar as análises:

- Ao considerar os parâmetros adicionais, que modelam os parâmetros de OI e as distorções das lentes, em conjunto com injunções impostas sobre as coordenadas dos CP's, verificou-se um aumento de acurácia significativo no espaço objeto, em torno de 30% em planimetria e 40% em altimetria, em relação à um processo de fototriangulação convencional.

Para mostrar estas conclusões, as Figuras 65 e 66 apresentam, respectivamente, o EMQ das discrepâncias nas coordenadas dos pontos de verificação no espaço objeto (em GSD) dos experimentos de fototriangulação convencional (parâmetros de OI pré-calibrados e sem georreferenciamento direto) e dos experimentos considerando FPA (f, x_0, y_0, k_1, k_2) e georreferenciamento direto para os blocos de imagens analisados.

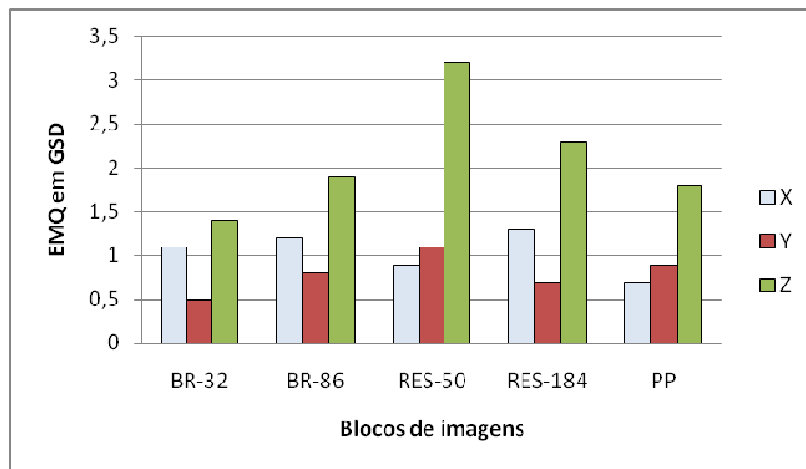


Figura 65: EMQ das discrepâncias nas coordenadas dos pontos de verificação nos experimentos de Fototriangulação convencional - parâmetros de OI pré-calibrados e sem georreferenciamento direto.

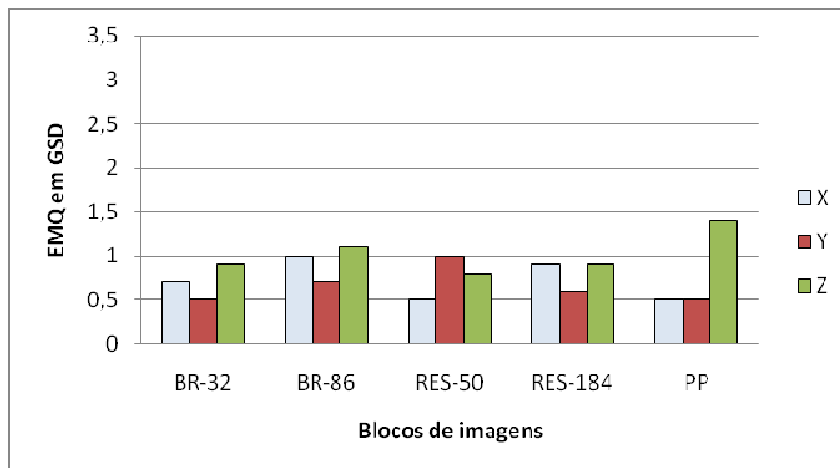


Figura 66: EMQ das discrepâncias nas coordenadas dos pontos de verificação nos Experimentos de FPA (f , x_0 , y_0 , k_1 , k_2) com georreferenciamento direto.

Kornus et al (2006) e Gruber e Ladstadter (2006) também verificaram que o uso de parâmetros adicionais contribuíram significativamente para a melhoria de acurácia no espaço objeto (principalmente em altimetria) com imagens coletadas pelas câmaras digitais de grande formato.

- O modelo de FPA que considera a distância focal, coordenadas do ponto principal e parâmetros de distorção radial simétrica, foi o que proporcionou os melhores resultados. Os demais parâmetros, relativos à distorção descentrada e afinidade, não proporcionaram melhoria na solução. Os parâmetros de distorção descentrada

apresentaram alta correlação com as coordenadas do ponto principal (superior a 90%), visto que ambos proporcionam efeito similar na imagem. Os parâmetros de afinidade apresentaram mínima influência sobre as coordenadas de imagem, com efeito na ordem do décimo do pixel nas bordas da imagem.

Além disso, verificou-se que o modelo explícito com os parâmetros de distorção radial proporcionou melhores resultados que os modelos polinomiais: Bauer, Jacobsen, Ebner e Brown. Estes modelos foram inicialmente analisados em cinco blocos de imagens sem georreferenciamento direto, conforme mostrado na Seção 5.4, em confronto com o modelo explícito de distorção das lentes. A partir dos resultados obtidos constatou-se que ao considerar o modelo com apenas os parâmetros de distorção das lentes (radial simétrica) obteve-se uma melhoria em acurácia altimétrica no espaço objeto em cerca de 40%, comparando com os resultados da fototriangulação sem parâmetros adicionais. Ao comparar os resultados (EMQ nos pontos de verificação em campo) obtidos pelo modelo de distorção das lentes e pelos modelos polinomiais, verificou-se que o modelo de lentes proporcionou maior acurácia altimétrica que os demais (23% melhor que os modelos de Bauer, Jacobsen e Ebner; 11% melhor que o modelo de Brown).

Experimentos com os modelos de Brown e Ebner foram também realizados com os blocos de Resende e Presidente Prudente, os quais foram coletados com georreferenciamento direto (GPS). Nestes blocos verificou-se também que o uso do modelo de FPA com os parâmetros de OI e distorção radial simétrica permitiu melhores resultados que os modelos polinomiais, principalmente nos testes com um número inferior de pontos de apoio (Bloco de Resende).

Estes polinômios (Brown, Ebner, entre outros) foram desenvolvidos com coeficientes para a modelagem das distorções das lentes, erros de afinidade e deformações dos filmes. Para o caso de câmaras digitais, estes grupos de parâmetros adicionais podem ser simplificados, uma vez que os sensores CCD (ou CMOS) são planos e não apresentam deformações temporais, conforme destacado por Jacobsen (2003).

- Os testes de FPA sem considerar injunções nas coordenadas dos CP's não apresentaram resultados satisfatórios, com discrepâncias mais significativas entre os CP's estimados e os obtidos de forma direta por GPS e erros acentuados na

determinação de coordenadas no espaço objeto, em relação aos testes com injunção no CP. Os parâmetros de OI estimados nestes testes ficaram discrepantes dos parâmetros de OI estimados nas situações em que o georreferenciamento direto foi considerado. Os desvios padrão dos parâmetros de OI foram significativos, mostrando imprecisão na estimação dos parâmetros, e houve alta correlação entre os parâmetros de OI e OE (em torno de 99% entre a distância focal e a componente altimétrica dos CP's e 50-60% entre as coordenadas do ponto principal e as componentes planimétricas dos CP's), uma vez que não é possível estimar separadamente estes parâmetros sem o uso de restrições impostas ao processo.

Verificou-se que nos blocos nos quais foram coletadas faixas cruzadas (BRVIAS e Presidente Prudente), a determinação das coordenadas do ponto principal foi mais precisa, tendo uma diminuição na correlação com as coordenadas dos CP's em torno de 30%. Já a distância focal apresentou sempre correlação alta com a altitude de vôo (próxima a 100%) verificando que a geometria de aquisição e a variação de relevo (em torno de 5%) não foram suficientes para a estimação precisa destes parâmetros. Isso mostra a importância do uso de sensores de georreferenciamento direto para a fototriangulação com parâmetros adicionais.

- A partir dos testes realizados com a configuração dual de câmaras verificou-se que, com o uso de um conjunto particulares de parâmetros adicionais para as câmaras, a acurácia na determinação de coordenadas no espaço objeto melhorou cerca de 30%, em relação aos resultados obtidos na fototriangulação convencional, conforme também verificado nos testes com as imagens obtidas na configuração nadiral. Os modelos de Brown e Ebner também foram testados e não apresentaram soluções de boa qualidade, tendo em vista que foi utilizado apenas um conjunto de parâmetros para as duas câmaras.

Os testes com injunção de orientação relativa mostraram grande estabilidade do conjunto desenvolvido, com valores estimados com precisão na ordem de poucos segundos para os ângulos de rotação e inferior ao décimo do milímetro para a distância entre os CP's.

- Adotou-se como estratégia nos experimentos o desenvolvimento da FPA em sub-blocos de imagens da área imageada do projeto. Nestes blocos de menor dimensão, que pode ser uma área de fácil acesso, faz-se um adensamento de pontos de apoio. Com os dados de georreferenciamento direto e dados de terreno deste sub-bloco de imagens, pode-se realizar a FPA e se determinar os parâmetros de OI pertinentes ao ambiente de coleta do projeto. Estes parâmetros estimados para o sub-bloco podem então ser aplicados na fototriangulação das imagens de toda a área do bloco, considerando também os dados de georreferenciamento direto e um número reduzido de pontos de apoio. Os experimentos com os blocos da BRVIAS e Resende mostraram que esta estratégia pode ser usada com sucesso, e com pontos de apoio apenas nas extremidades do bloco obteve-se o resultado compatível ao se aplicar a FPA sobre o bloco todo com uma grande densidade de pontos de apoio.
- Na concepção do sistema, tem-se uma unidade de navegação inercial que deveria estar integrada à plataforma de coleta. Contudo, devido à problemas burocráticos no processo de importação, esta unidade somente estará disponível no fim do mês de Novembro, e os estudos e análises de FPA foram realizados somente com o GPS do sistema SPAN-Novatel.

No entanto, vale ressaltar que nos experimentos de FPA com o Bloco BRVIAS (Seção 6.3.3.1), os parâmetros de atitude foram simulados para uma IMU de mesma categoria da unidade que será integrada no sistema de coleta. Verificou-se que o uso de informações precisas de atitude não trouxe benefícios à solução de FPA na estimação dos parâmetros de OI e na qualidade da determinação de pontos no espaço objeto, quando comparado aos experimentos em que somente o uso do GPS para a determinação das coordenadas dos CP's foi considerado (Tabelas 24 e 26 – experimentos J, K e L comparados aos experimentos E, H e I).

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foram apresentados os estudos, análises e desenvolvimentos físicos e lógicos que foram realizados com o objetivo de verificar a viabilidade e implementar o uso produtivo de câmaras digitais de médio formato em aplicações de Fotogrametria, especialmente a aquisição a partir de plataformas aéreas. Foram realizadas pesquisas sobre os conceitos e técnicas envolvidas, com análises do estado da arte em sistemas digitais de aquisição de imagens aéreas e modelagem da geometria interna de câmaras digitais por fototriangulação com parâmetros adicionais.

Foi desenvolvido concomitantemente o projeto PIPE (Programa de Inovação Tecnológica em Pequenas Empresas), por meio de uma parceria entre a empresa Engemap Engenharia, Mapeamento e Aerolevante Ltda. e o Departamento de Cartografia da FCT/UNESP e financiado parcialmente pela FAPESP. Este projeto tratou do desenvolvimento da parte física do sistema de coleta de imagens, com o suporte financeiro para a aquisição dos equipamentos e veículos utilizados nesta pesquisa, bem como de todos os experimentos.

O escopo inicial deste trabalho consistia no desenvolvimento de uma plataforma de coleta formada por câmaras digitais de pequeno formato e sistema de georreferenciamento direto de baixa precisão (em torno de 3 m para as informações de posição e 10' para atitude), para aplicações em escalas médias. Contudo, com a disponibilidade dos recursos do projeto PIPE e o apoio da empresa Engemap, algumas melhorias e avanços tecnológicos foram implementados, com a aquisição de duas câmaras profissionais Hasselblad de 22 Megapixels, que posteriormente foram atualizadas para 39 Megapixels de resolução, a possibilidade de introdução de uma terceira câmara

(infravermelha) para aplicações ambientais, e a integração de um sistema de georreferenciamento direto de alta precisão (SPAN - NovAtel).

Entretanto, com este incremento na qualidade dos equipamentos adquiridos, algumas questões se tornaram mais críticas no desenvolvimento do sistema de coleta. Com o sistema de georreferenciamento anteriormente previsto, não era necessário o sincronismo de alta precisão entre as câmaras e o GPS, uma vez que o erro decorrente do atraso entre o envio do sinal e o disparo real das câmaras é pequeno se comparado à precisão dos sensores de posicionamento (erro superior a 1m). Esta hipótese não pode ser aplicada para o atual sistema (SPAN - NovAtel), tendo em vista que a qualidade no posicionamento é da ordem de 15-20 cm. Deste modo, o sincronismo entre os dispositivos passou a ser um item de extrema importância no sistema, para que este erro não interferisse na acurácia do georreferenciamento direto. No sistema desenvolvido, o erro de sincronismo ficou na ordem do microssegundo, permitindo alta qualidade e precisão na coleta de dados, conforme verificado nos experimentos realizados.

Além disso, foram investidos esforços substanciais no desenvolvimento do suporte das câmaras, o qual foi projetado e desenvolvido com exoesqueletos individuais e travamentos especiais para a garantia de estabilidade da geometria de aquisição dos dados. O suporte desenvolvido permite flexibilidade na permuta entre as configurações dual e vertical (com somente uma câmara Hasselblad), sem que o exoesqueleto das câmaras seja removido, o que evita que a calibração da câmara tenha que ser refeita.

Conforme o contexto apresentado, uma contribuição significativa deste trabalho foi a concepção, desenvolvimento e implementação para produção do sistema de aquisição com câmaras digitais integradas a sensores de georreferenciamento direto. As estruturas físicas com travamentos especiais para os sensores e o sistema de controle e gerenciamento dos dados agregaram confiabilidade e qualidade ao sistema, de modo que se tornasse uma referência em sistemas de aerolevanteamento desta categoria no país.

Além disso, este trabalho procurou contribuir com estudos e análises de conjuntos de parâmetros adicionais, que são introduzidos ao processo de fototriangulação para a modelagem da geometria interna de câmaras digitais em serviço. A ênfase do estudo foi dada ao uso de câmaras digitais de médio formato com dados de georreferenciamento

direto, de forma que os modelos de calibração em serviço pudessem ser empregados com confiabilidade.

Desenvolveu-se uma técnica, a partir de estudos de modelos matemáticos para a calibração em serviço das câmaras que formam a plataforma de coleta, que utiliza injunções de orientação relativa entre as câmaras para o sistema dual, bem como modelos de erros do sistema GPS/INS, permitindo uma modelagem rigorosa dos erros que possam ocorrer durante a aquisição das imagens. Para estes estudos e análises, um programa computacional que permite a calibração simultânea de três câmaras foi desenvolvido (CMC – Calibração Multi-Câmaras), com grande flexibilidade quanto à estrutura de dados e aos parâmetros e injunções consideradas.

Os estudos de FPA realizados mostraram que o uso de parâmetros que modelam a orientação interior e distorção das lentes no processo de fototriangulação com dados de georreferenciamento direto permitiu um aumento de acurácia em torno de 30-40% na determinação de coordenadas no espaço objeto, quando comparado aos resultados obtidos em uma fototriangulação convencional.

Verificou-se experimentalmente, com calibrações em ambiente terrestre e aéreo, que os parâmetros de orientação interior estimados não podem ser considerados estáveis, principalmente quando ocorre alguma manipulação mecânica da câmara, como a troca de lentes ou a remoção do magazine eletrônico (*back digital*). Outros fatores que afetam a estabilidade da OI são as variações de temperatura e a vibração na aeronave. Isto reforça importância de se modelar em serviço os parâmetros de OI.

Pelos testes com os modelos de parâmetros adicionais verificou-se que o modelo de FPA que considera a distância focal, as coordenadas do ponto principal e os parâmetros de distorção das lentes, foi o que proporcionou melhores resultados, quando comparado aos modelos polinomiais, como os de Brown e Ebner. Estes últimos foram desenvolvidos principalmente voltados às câmaras analógicas, com parâmetros que modelam deformações de primeira e segunda ordem e erros de trabalho dos filmes. Como nas câmaras digitais o sensor é plano e não apresenta deformações temporais, verificou-se que o grupo de parâmetros adicionais pôde ser simplificado.

Para projetos com grandes blocos de imagens, foi proposta, ainda, a realização da FPA em um sub-bloco menor de imagens cuja área permita uma distribuição maior de pontos de apoio. Os parâmetros de OI determinados para este bloco mostraram-se adequados ao bloco completo, que pôde ser fototriangulado com dados de georreferenciamento direto e um conjunto mínimo de pontos de apoio, fundamentalmente nas extremidades e no centro do bloco. A eficácia desta técnica, mostrada experimentalmente neste trabalho, tem grande impacto na operação do sistema em produção, pois minimiza o controle de campo, sem abdicar da precisão e da modelagem dos erros na orientação interior, agregando confiabilidade e qualidade.

Originalmente o trabalho previa a integração da unidade de medida inercial ao sistema de aquisição. Contudo, devido aos atrasos e aspectos burocráticos do processo de importação, isto não foi possível neste trabalho. No entanto, os estudos e análises de FPA com dados simulados (Bloco BRVIAS) mostraram que o conhecimento preciso dos dados de atitude não contribuiu no cálculo dos parâmetros adicionais, em comparação com os estudos e análises que foram realizados considerando somente as injunções nas coordenadas dos CP's determinadas por GPS. Isto indica que a integração de uma IMU será importante no levantamento de corredores, quando são realizadas extensas faixas de imagens.

Por fim, vale ressaltar que a concepção deste sistema de aquisição fomentou o desenvolvimento de quatro dissertações de mestrado, no que se refere à análises e implementações computacionais para ajustes radiométricos de blocos de imagens, retificação e fusão de imagens, orientação relativa de um sistema dual e estudos de técnicas de sincronismos de dispositivos com dados de georreferenciamento direto. Deste modo, promove-se a pesquisa em conjunto com foco no desenvolvimento de uma solução completa de interesse à sociedade.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o desenvolvimento deste trabalho, alguns problemas em aberto foram verificados, que podem fomentar a realização de trabalhos futuros neste campo da pesquisa. Destaca-se que alguns dos itens listados a seguir já estão em fase de estudo para a continuidade da pesquisa:

- Realizar a integração de uma unidade de medida inercial, de forma a tornar o sistema de aquisição completo;
- Promover testes e ensaios em voo, com análises de FPA principalmente no sistema com a configuração dual, de forma a verificar o ganho de qualidade nos estudos com imagens convergentes;
- Desenvolver rotinas automáticas de análises dos resíduos e dados estatísticos no programa CMC, de forma que o programa se torne mais autônomo quanto à seleção de dados e detecção e eliminação automática de erros grosseiros;
- Realizar testes de fototriangulação com parâmetros adicionais em grandes blocos de imagens, como o de Presidente Prudente apresentado na seção 6.1.2. Neste bloco propõe-se a análise da relação entre a variação de temperatura e os parâmetros de orientação interior, tendo em vista o grande intervalo de tempo decorrente entre o início e o término da coleta de imagens;
- Analisar a estabilidade dos parâmetros de OI ao longo do tempo e as causas de sua variação, bem como a magnitude desta variação. Isso foi iniciado no presente trabalho, contudo devido à manipulação mecânica nas câmaras durante o processo de desenvolvimento do sistema não foi possível a realização de análises mais precisas.
- Desenvolver testes e adaptações do algoritmo de estimação da orientação relativa entre as câmaras, para os estudos de retificação e fusão de imagens no processo de geração de imagens de grande formato;

- Analisar o efeito do erro de medida dos pontos de apoio nas imagens e o estudo de técnicas para medição subpixel destes pontos, comparando-se com resultados realizados sem o uso de pontos de apoio;
- Realizar um estudo mais detalhado sobre o efeito da refração atmosférica em diferentes altitudes e para os casos de usos de imagens inclinadas;
- Ampliar os experimentos simulados com diferentes classes de IMU e o impacto na FPA, bem realizar estudos com dados reais;

REFERÊNCIAS

ANDRADE, J. B. Refração Fotogramétrica. **Boletim da Universidade Federal do Paraná**, Curitiba, n. 24, p. 1-37, 1980.

ANDRADE, J. B.; OLIVAS, M. A. A. Calibração de câmaras aerofotogramétricas. **Boletim da Universidade Federal do Paraná**, Curitiba, n. 26, p. 1-40, 1981.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998, 258p.

BAUMKER, M.; HEIMES, F. J. New Calibration and Computing Method for Direct Georeferencing of Image and Scanner Data Using the Position and Angular Data of an Hybrid Inertial Navigation System. In: **OEEPE – Integrated Sensor Orientation: Test Report and Workshop Proceedings**, 2002, Frankfurt. Proceedings of OEEPE Kartographie und Geodasie: OEEPE, Frankfurt, 2002.

BAZAN, W. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M. Calibração de um sistema dual de câmaras digitais convergentes. In: **II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2007**, Presidente Prudente. Anais... Presidente Prudente: Universidade Estadual Paulista, 2007. v. 1. p. 726-734.

BAZAN, W. S., 2008. Calibração de um sistema dual de câmaras digitais. **Dissertação** (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

CLARKE, T. A.; FRYER, J. G. The development of camera calibration methods and models. **Photogrammetric Record**, 16 (91), 1998, pp. 51-66.

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

CRAMER, M. GPS/INS Integration. In: **Photogrammetric Week 97**, 1997, Heidelberg. Proceedings of Photogrammetric Week 97, Heidelberg: Wichmann Verlag, 1997.

CRAMER, M. **EuroSDR network on digital camera calibration**. Report phase I. Institute for Photogrammetry. University of Stuttgart, 2004a.

CRAMER, M.; Performance of medium format digital aerial sensor systems. In: **XXth ISPRS Congress**, 2004, Istanbul. Proceedings of XXth ISPRS Congress Istanbul: ISPRS, 2004b.

CRAMER, M.; SCHADE, H. Orientation of Photogrammetric Sensors with an Integrated Multi-Antena GPS/Low-cost INS System. In: COLOMINA, I.; NAVARRO, J. **Integrated Sensor Orientation: theory, algorithms and systems**. Heidelberg: Wichmann, p.101-111, 1995.

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.

DIGICAM. Germany: IGI-Systems, 2008. Apresenta informações sobre o sistema DigiCAM. Disponível em: < <http://www.igi-systems.com/products/digicam.htm>>. Acesso em: 03 Mar. 2008.

DÖRTSEL, C.; JACOBSEN, K.; STALLMANN, D. DMC – Photogrammetric Accuracy – Calibration Aspects and Generation of synthetic DMC images. In: **Optical 3D Measurement Techniques VI**, 2003, Zurich. Proceedings of Optical 3D Measurement Techniques VI Zurich, 2003, pp. 74-82.

DORSTEL, C.; TANG, L.; MADANI, M. Automatic Aerial Triangulation Software of Z/I Imaging. In: **Photogrammetric Week 01**, 2001, Heidelberg. Proceedings of Photogrammetric Week 97, Heidelberg: Wichmann Verlag, 2001.

EL-SHEIMY, N. Integrated Systems and their Impact on the Future of Positioning, navigation and Mapping applications. **Report of the Department of Geomatic Engineering**. The University of Calgary, 2000.

EL-SHEIMY, N.; OSMAN, A.; NASSAR, S. NOURELDIN, A. Wavelet Multiresolution Analysis: A new way to integrate GPS and INS. **GPS World**. Oct. 1, 2003.

FONSECA, J. M. **Sistemas Sensoriais**. Tutorial. Departamento de Engenharia Eletrotécnica. Universidade Nova de Lisboa, 2005.

FORTES, L. P. S. **Posicionamento Cinemático Convencional e no Contexto de Redes**. Notas de aula. UNESP – Presidente Prudente, Agosto, 2004.

FRICKER, P. et al. Multispectral Sensor with photogrammetric precision – ‘Airborne Digital Three-lines Sensor’. **GIM International**. *Feature*. May, 2000.

FRYER, J. G. Camera Calibration. In: ATKINSON, K. B. **Close Range Photogrammetry and Machine Vision**. Department of Photogrammetry and Surveying: University College London. Whittles Publishing, 1996, 371p.

GALO, M. **Calibração e aplicação de câmaras digitais**. 1993. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

GALO, M.; HASEGAWA, J. K.; TOMMASELLI, A. M. G.; IMAI, N. N. Registration analysis and inner calibration of a three CCD multispectral frame camera. In: **EUROCOW 2006** - International Calibration and Orientation Workshop, 2006, 25-27 January, Castelldefels, 2006.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: UFPR, 1994, 319p.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E.; **Processamento de Imagens Digitais**, Tradução: Roberto Marcondes César Junior e Luciano da Fontoura Costa, Ed, Edgard Blücher, São Paulo, 2000, 509p.

GREJNER-BRZEZINSKA, D. A. Direct sensor orientation in airborne and land-based mapping applications. **Report n. 461**. The Ohio State University – Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, Ohio, 2001.

GRUBER, M.; LADSTADTER, R. Geometric issues of the digital large format aerial camera Ultracam_D. In: **International Calibration and Orientation Workshop (EuroCOW), 2006**, Castelldefels-Barcelona. Proceedings of EuroCow 2006. Castelldefels-Barcelona: ISPRS Commission I, 25-27 Enero 2006.

HAALA, N. Concepts of image collection and evaluation. In: FRITSCH, D. **Digital aerial camera systems – state-of-the-art – expectations and visions**. Tutorial Photo 2001. Stuttgart, 2001.

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

HABIB, A. F.; MORGAN, M. F. Automatic calibration of low cost digital cameras. **SPIE Journal of Optical Engineering**, 42(4): 948-955, 2003.

HABIB, A. F.; PULLIVELLI, A. M.; MORGAN, M. F. Quantitative measures for the evaluation of camera stability. In: **XXth ISPRS Congress – Comission 1**. 2004, Istanbul. Proceedings of XXth ISPRS Congress Istambul: ISPRS, 2004.

HASEGAWA, J.K. Mapeamento Fotogramétrico com Sensores Digitais, **Projeto Fapesp-98/10062-1**, 1998.

HC50 Technical info. EUA: Hasselblad, 2009. Documento que apresenta informações técnicas sobre a lente 50 mm da Hasselblad. Disponível em: <<http://www.hasselbladusa.com/downloads/datasheets.aspx>>. Acesso em: 15 de Dezembro de 2008.

HEFELE, J. Calibration Experience with the DMC. In: **International Calibration and Orientation Workshop (EuroCOW) 2006**, Castelldefels-Barcelona. Proceedings of EuroCow 2006. Castelldefels-Barcelona: ISPRS Commission I, 25-27 Enero, 2006.

HEIER, H.; KIEFNER, M.; ZEITLER, W. Calibration of the digital modular camera. In: **FIG XXII International Congress**, 2002, Washington, D.C. USA. Proceedings of FIG XXII International Congress USA: FIG, April, 2002.

HINZ, O. A. The Z/I Imaging Digital Aerial Camera System. In: **Photogrammetric Week 99**, 1999, Heidelberg Proceedings of Photogrammetric Week 99, Heidelberg: Wichmann Verlag, 1999, pp. 109 – 115.

ILMB – Integrated land Management Bureau. *Small and Medium format digital camera specifications*. Canadian: British Columbia, March-2007, v. 0.11. Disponível em: <<http://ilmbwww.gov.bc.ca/bmgs/pba/trim/specs/#digitalcam>>. Acesso em: 27 jan. 2008.

IMAI, N.N. Recursos não convencionais de levantamento de dados da superfície para aquisição de informações cartográficas, **Projeto Fapesp-97/10956-0**, 1997.

JACOBSEN, K. Issues and method for in-flight and on-orbit calibration. In: **Workshop on Radiometric and Geometric Calibration**, 2003, Gulfport. Proceedings of Workshop on Radiometric and Geometric Calibration, Gulfport, 2003.

JACOBSEN, K.; WEGMANN, H. Dependencies and problems of direct sensor orientation. In: C. HEIPKE, K. JACOBSEN and H. WEGMANN (Eds.), **Integrated Sensor Orientation**, OEEPE Official Publication N°. 43 Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, Germany, pp. 73-84, 2002.

KENNEDY, S.; COSANDIER, D.; HAMILTON, J. GPS/INS Integration in real-time and post-processing with NovAtel's SPAN system. In: **International Global Navigation Satellite Systems Society IGSS Symposium 2007**, Sydney, Australia. Proceedings of IGSS Symposium, 4-6 December, 2007.

KING, A. D.; FRIN, B. Sc. Inertial Navigations – Forty years of evolution. **GEC Review**, vol. 13, n. 3, 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.

KORNUS, W.; ALAMÚS, R.; TALAYA, J. Tests and performance analysis of the DMC at the Cartographic Institute of Catalonia (ICC). In: **International Calibration and Orientation Workshop (EuroCOW) 2006**, Castelldefels-Barcelona. Proceedings of EuroCOW 2006. Castelldefels-Barcelona: ISPRS Commission I, 25-27 Enero, 2006.

KRAUS, K.; WALDHAUSL, P. **Photogrammetry – Fundamentals and Standard Processes**. UMMLER/BONN, 1993. v.1.

KROPFL, M; KRUCK, E; GRUBER, M. Geometric calibration of the digital large format aerial camera ULTRACAM_D. In: **XXth ISPRS Congress – Comission I**, 2004, Istanbul. Proceedings of XXth ISPRS Congress Istambul: ISPRS Comission I, WGI/2, 2004.

LEBERL, F.; GRUBER, M. Flying the new large format digital aerial camera Ultracam. In: **Photogrammetric Week 2003**, 2003. Proceeding of Photogrammetric Week 2003: Wichmann Verlag, 2003, pp 67-76.

LEHMANN, F., HOFFMANN, A. RENOUARD, L., VEGT, W. V. D. Fully Digital and Automatic Production of Accurate Geodata – 'The High Resolution Stereo Camera (HRSC-A)'. **GIM International**. *Feature*, July 2000.

LEICA PHOTOGRAMMETRY SUITE PROJECT MANAGER, **Leica Geosystems Geospatial Imaging, LLC**. Copyright 2006, Norcross, GA 30092-2500, USA, 2006.

LIMA, S. R. S. **Integração GPS/INS utilizando sensores inerciais baseados em sistemas microeletromecânicos (MEMS)**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005. 136p.

LIMA, S. R. S.; FREITAS, S. R. C.; KRUEGER, C. P. Estimativa de Desempenho da Integração GPS/INS na Execução de Levantamentos Geodésicos Utilizando Plataforma de Baixo Custo. In: **II Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**, 2001, Curitiba. Anais do II Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas Curitiba: UFPR, 2001.

LIMA, S. R. S.; FREITAS, S. R. C.; KRUEGER, C. P. Estudos para a Integração de Observações GPS com Sinais de Sensores MENS em Levantamentos Geodésicos Cinemáticos. In: **III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**, 2003, Curitiba. Anais do III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas Curitiba: UFPR, 2003.

LOPES, R. F.; RUY, R.S.; TOMMASELLI, A. M. G. Geração de imagens de alta resolução por retificação e fusão de imagens. In: **II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, 2008, Recife. Anais eletrônicos – CD-ROM Recife: SIMGEO, 2008.

LU, G.; CANNON, M. E.; LACHAPELLE, G. Attitude determination in a Survey Launch using multi-antenna GPS technologies. **National Technical Meeting, ION**, San Francisco, Jan, 1993.

LU, G. **Development of a GPS Multi-antena System for Attitude Determination**. PHD thesis. Department of Geomatics Engineering. University of Calgary, Calgary, 1995.

MACHADO, A. M. L. et al. Verificação da estabilidade geométrica dos parâmetros de calibração uma câmara digital não métrica de pequeno formato Sony Dsc-f717, **Série em Ciências Geodésicas**. Curitiba, 2003, v. 3.

MARCATO JR., J. TOMMASELLI, A. M. G.; RUY, R. S.; GALO, M. Estudos de Fototriangulação com Parâmetros Adicionais para Câmaras Digitais: experimentos e análises. In: **Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário COBRAC 2008**, Florianópolis. Anais eletrônicos – CD-ROM. Florianópolis: COBRAC, 2008.

MIKHAIL, E. M.; ACKERMAN, F. **Observations and Least Squares**. New York: IEP, 1976. 497p.

MIKHAIL, E. M., BETHEL, J. S. MCGLONE, J. C. **Introduction to Modern Photogrammetry**. Inc. New York : John Wiley & Sons, 2001, 479p.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR – GPS: Descrições, fundamentos e aplicações**. São Paulo. Editora UNESP, 2000, 287p.

MOSTAFA, M. M. R.; HUTTON, J. Direct Positioning and Orientation Systems How do They Work? What is the Attainable Accuracy? In: **ASPRS**, 2001.

MOSTAFA, M. M. R.; SCHWARZ, K. P. Digital Image Georeferencing from a Multiple Camera System by GPS/INS. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing** **56**, p. 1-12, 2001.

MURAY, S; MATSUOKA, R; OKUDA T. A study on Analytical Calibration for non Metric Camera and Accuracy of Three Dimensional Measurement. In: In: **XVth ISPRS Congress – Comission 5**, 1984, Rio de Janeiro. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 1984**. Rio de Janeiro: ISPRS, 1984. Vol.25, Part V p. 570-579.

NEUKUM, G. The airborne HRSC-A: Performance results and applications potential. In: **Photogrammetric Week 99**, 1999, Heidelberg. Proceedings of Photogrammetric Week 99, Heidelberg: Wichmann Verlag, 1999. pp 83-88

OMERBASHICH, M. Integrated INS/GPS navigation from a popular perspective. **Journal of Air Transportation**. Vol. 7, n. 1, 2002.

PARÉS, M.E.; GIMENEZ, M.; ROSALES, J. J.; WIS, M.; COLOMINA, I. TERRA: a Cooperative Feasibility Analysis of Airborne INS/GNSS Gravimetry for Geoid Determination in Bolivia. In: **6th Geomatic Week**, 2005, Barcelona. Proceedings of 6th Geomatic Week Barcelona, 2005.

PETRIE, G. The Configurations of the New Airborne Digital Imagers – ‘Déjà Vu’. **Geo Informatics**, July/August, 2000.

POLI, D. Sensor model for airborne CCD linear scanners. In: **Optical 3-D Measurement Techniques VI** (Gruen/Kahmen, eds.), Wichmann Verlag Karlsruhe, September 2003, pp. 386-393.

REIS, T. T.; TOMMASELLI, A. M. G.; RUY, R. S. Módulo Computacional para Geração Semi-Automática de Planos de Vãos Fotogramétricos. In: **Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário COBRAC 2006**, Florianópolis. Anais eletrônicos – CD-ROM. Florianópolis: COBRAC, 2006.

REISS, M.L.L. Restituição **Fotogramétrica Flexível de Imagens à Curta Distância: Estudo de Método e Desenvolvimento de Protótipo**. 2002. 161 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

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

RUY, R. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; LOPES, R. F.; MENOSSI, R. C. Um estudo comparativo entre câmaras digitais não métricas e câmaras analógicas. In: **XXII Congresso Brasileiro de Cartografia**, 2005, Macaé. Anais do XXII CBC: SBC, 2005.

RUY, R. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; HASSEGAWA, J. K.; GALO, M.; IMAI, N. N.; CAMARGO, P. O. SAAPI – A Lightweight Airborne Image Acquisition System: Design and Preliminary Tests. In: **7th Geomatic Week**, 2007, Barcelona. Proceedings of 7th Geomatic Week Barcelona, 2007.

RUY, R. S.; TOMMASELLI, A. M. G.; GALO, M. HASEGAWA, J. K. MENOSSI, R. C. Fototriangulação com parâmetros adicionais para câmaras digitais: uma avaliação experimental. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, vol.14, n. 4, p. 571-587, Out.-Dez. 2008.

SANTOS, D. R.; DAINES, R.; RODRIGUES, Z. J.; TOMMASELLI, A. M.G.; HASEGAWA, J.K.; GALO, M. Aplicação de Câmaras Digitais na produção de Ortofotocarta. In: **Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário COBRAC 2000**, Florianópolis. Anais eletrônicos – CD-ROM. Florianópolis: COBRAC, 2000.

SARTORI, L. R.; IMAI, N. N.; TOMMASELLI, A. M. G.; RUY, R. S.; GALO, M.; HASSEGAWA, J. K.; CAMARGO, P. O. Potencial do Uso da Banda do Infravermelho Próximo na Classificação de Imagens Adquiridas por Câmaras Digitais. IN: **XXII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2007, Florianópolis. Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007.

SCHENK, T. **Digital Photogrammetry**. Ohio: TerraScience, 1999. v.1, 428p.

SCHERZINGER, B. M. History of Inertial Navigation Systems in Survey Applications. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. November, 2001.

SCHWARZ, K. P. The Changing World of Geodesy and Surveying. In: **Quo-Vadis-International Conference, FIG Working Week 2000**, 2000, Praga. Proceedings of FIG Working Week 2000: FIG, 2000.

SCHWARZ, K. P.; EL-SHEIMY, N. **KINGSPAD manual users guide**. Version 3.0. The University of Calgary – Department of Geomatics Engineering, 2000.

SEARA, A. Comparison Between Direct Camera Orientation Measurement and Bundle Block Adjustment Determination. **OEEPE – Integrated Sensor Orientation: Test Report and Workshop Proceedings**. Kartographie und Geodäsie. Frankfurt, 2002.

SEEBER, G. **Satellite geodesy: foundations, methods and applications**. 2 ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003.

SHORTIS, M. R.; ROBSON, S.; BEYER, H. A. Principal Point Behavior And Calibration Parameter Models For Kodak DCS Cameras. **The Photogrammetric Record**, v.16, n° 92, October 1998. pp. 165 – 186.

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

TANG, L. DORSTEL, C.; JACOBSEN, K.; HEIPKE, C.; HINZ, A. Geometric accuracy potential of the digital modular camera. **IAPRS**, Amsterdam, vol. XXXIII, 2000.

TELLES, S.S.; TOMMASELLI, A.M.G.. Calibração de câmaras digitais usando linhas retas. In: **Série em Ciências Geodésicas**. Curitiba, 2002, v. 2, p. 289-314.

THURGOOD, J. The Vexcel ULTRACAM large format digital aerial camera system. **Vexcel**, Salt Lake City, November, 2004.

TOMMASELLI, A.M.G. Implantação de recursos de Fotogrametria Digital na FCT- **Projeto Fapesp-97/10749-4**, 1997.

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

TOMMASELI, A. M. G., RUY, R. S. Avaliação experimental de uma metodologia automática para a geração de estereomodelos a partir de dados de orientação direta. **Revista Brasileira de Cartografia**, 2004.

WACKROW, R.; CHANDLER, J. H.; BRYAN, P. Geometric consistency and stability of consumer-grade digital cameras for accurate spatial measurement. **Photogrammetric Record**, USA, v. 22, Issue 118, p. 121-134, June 2007.

WIS, M.; SAMSÓ, L.; AIGNER, E.; COLOMINA, I. Current Status and Capabilities of the 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.

ZEITLER, W.; DOERSTEL, C. Geometric calibration of the DMC: method and results. In: **I/FIEOS 2002 Conference proceedings**. IV/ISPRS commission, 2002.

APÊNDICE A

MÉTODO COMBINADO DE AJUSTAMENTO

A.1 MÉTODO COMBINADO

O Método Combinado é adotado para o tratamento de equações que reúnem parâmetros e observações, sendo o modelo matemático expresso por:

$$F(L_a, X_a) = 0 \quad (\text{A.1})$$

Tendo n valores observados, u parâmetros e r equações, o modelo linearizado para o Método Combinado é dado por:

$${}_r A_u X_1 + {}_r B_n V_1 + {}_r W_1 = 0 \quad (\text{A.2})$$

com:

$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_0}$: matriz das derivadas parciais da função em relação aos parâmetros;

$B = \left. \frac{\partial F}{\partial L_a} \right|_{L_b}$: matriz das derivadas parciais da função em relação aos valores observados

ajustados;

$$W = [F(L^0, X^0) + B^*(L_b - L^0)], \quad (\text{A.3})$$

sendo L_b os valores observados e, L^0 e X^0 os vetores aproximados para as observações e parâmetros, respectivamente.

Segundo Mikhail (1976), a solução para o Método dos Mínimos Quadrados com u restrições sobre os parâmetros é da forma:

$$X = N^{-1} * U \quad (\text{A.4})$$

com:

$$N = A^T M^{-1} A \quad (\text{A.5})$$

$$U = A^T M^{-1} W \quad (\text{A.6})$$

$$M = (B P^{-1} B^T) \quad (\text{A.7})$$

$P = \frac{\sigma_0^2}{\sigma^2}$: Matriz de peso das observações, calculada em função dos desvios padrão das observações (σ);

σ_0^2 : variância da unidade de peso *a priori*.

Para o caso de modelos não lineares, tem-se o ajustamento com iterações e a necessidade de adoção de valores aproximados aos parâmetros (X_0). Com isto, o vetor para os parâmetros ajustados (X_a) é dado por:

$$X_a = X_0 + X \quad (\text{A.8})$$

As observações ajustadas são estimadas por:

$$L_a = L_0 + V \quad (\text{A.9})$$

sendo V o vetor dos resíduos das observações:

$$V = P^{-1} B^T M^{-1} (W - AX) \quad (\text{A.10})$$

Os parâmetros e observações ajustados na iteração anterior ($i-1$) são adotados como valores aproximados na iteração seguinte (i): $X_{0_i} = X_{a_{i-1}}$; $L_{0_i} = L_{a_{i-1}}$. O processo iterativo é concluído quando o critério de convergência é atingido, que pode ser baseado nas correções aos parâmetros (X_i) ou no vetor dos resíduos (V_i). Quando há convergência no

ajustamento, o vetor X_i e o vetor V_i tendem a se estabilizar e, deste modo, o vetor de correções X_i tende a zero.

Ao final do ajustamento, a matriz variância-covariância (MVC) dos parâmetros pode ser calculada como segue:

$$\Sigma_X = \hat{\sigma}_0^2 N^{-1} \quad (\text{A.11})$$

sendo $\hat{\sigma}_0^2$ a variância da unidade de peso *a posteriori*:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{S} \quad (\text{A.12})$$

$S = r - u$: graus de liberdade no ajustamento.

A.2 MÉTODO COMBINADO COM INJUNÇÕES

Quando se adota injunções, que se referem à restrições impostas aos parâmetros, a solução para o Método Combinado resulta em (MIKHAIL, 1976):

$$X = (N + N_c + P_{xx})^{-1} * (U + U_c - f_x * P_{xx}) \quad (\text{A.13})$$

sendo:

$$N_c = C^T M_c^{-1} C \quad (\text{A.14})$$

$$U_c = C^T M_c^{-1} W_c \quad (\text{A.15})$$

$$M_c = (B_c P_c^{-1} B_c^T) \quad (\text{A.16})$$

$C = \left. \frac{\partial F_c}{\partial X} \right|_{X_0}$: matriz das derivadas parciais das equações de injunção em relação aos parâmetros;

$B_c = \frac{\partial F_c}{\partial L_{a_c}} \Big|_{L_{b_c}}$: matriz das derivadas parciais das equações de injunção em relação aos valores

observados das injunções ajustados;

$$W_c = [F_c(L_c^0, X^0) + B_c * (L_{b_c} - L_c^0)], \quad (\text{A.17})$$

sendo L_{b_c} os valores observados das equações de injunção e L_c^0 o vetor dos valores aproximados para as observações.

$P_c = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_c^2}$: Matriz Peso das equações de injunção, calculada em função dos desvios padrão

(σ_c) das observações de injunção;

$P_{xx} = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{xx}^2}$: Matriz Peso dos parâmetros, calculada em função dos desvios padrão (σ_{xx}) dos

parâmetros.

A função f_x é igual a zero na primeira iteração, pois assume-se que as aproximações aos parâmetros são iguais à seus valores estimados a priori ($X^0 = X$). Após a primeira iteração, o vetor X_1 é calculado, o qual é adicionado ao vetor dos valores aproximados X^0 , a fim de obter os parâmetros ajustados (X_a). Conseqüentemente, na segunda iteração o valor de f_x não é mais zero, e sim equivalente a $X^0 + X_1 - X = X_1$, desde que $X_0 = X$. Na iteração seguinte, $f_x = X_1 + X_2$, e assim sucessivamente, até que o processo iterativo atinja o ponto de convergência estabelecido (MIKHAIL, 1976). Sendo assim, tem-se que:

$$f_x = \sum_i X_{(i)} \quad (\text{A.18})$$

sendo i o número de iterações no ajustamento.

As observações das equações de injunção ajustadas são estimadas por:

$$L_{a_c} = L_c^0 + V_c \quad (\text{A.19})$$

sendo V_c o vetor dos resíduos das observações de injeção:

$$V_c = P_c^{-1} B_c^T M_c^{-1} (W_c - CX) \quad (\text{A.20})$$

Ao final do processo iterativo, a matriz variância-covariância (MVC) dos parâmetros agora é dada por:

$$\Sigma_X = \hat{\sigma}_0^2 (N + N_c + P_{xx})^{-1} \quad (\text{A.21})$$

sendo $\hat{\sigma}_0^2$ a variância da unidade de peso *a posteriori*, que agora é dada por:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V + V_c^T P_c V_c + V_x^T P_{xx} V_x}{S} \quad (\text{A.22})$$

com:

$S = r + s - u$, sendo s o número de equações de injeção;

V_x : vetor dos resíduos dos parâmetros:

$$V_x = f_x + X. \quad (\text{A.23})$$

ANEXO A

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DAS CÂMARAS DIGITAIS QUE COMPÕEM O SISTEMA SAAPI

Hasselblad H3D

Tipo	Câmara com lentes intercambiáveis, visor <i>Reflex</i> e <i>back</i> digital integrado
Sensor	CCD - 49,0 x 36,7 mm
Resolução geométrica	7216 x 5412 pixels - 39 milhões de pixels
Resolução radiométrica	16-bit/canal (48-Bit RBG) 8-bit/canal (24-Bit RBG)
Formato de arquivo	Gravado: RAW Saída: RAW ou TIFF
Lentes	Hasselblad HC
Foco	Automático, manual e ajuste instantâneo
Sensibilidade	ISSO 50, 100, 200 e 400
Tipo de obturador	Eletronicamente controlado
Modo espelho	sim
Modos de exposição	Manual, prioridade na abertura, prioridade no obturador, automático
Modos de cena	não
flash	Integrado ao visor
Alcance do flash	Aproximadamente 12'
Tempo entre exposições	2 segundos, incluindo <i>preview</i>
Timer	2 – 60 segundos
Exposição sequencial	Sim, 2 – 32 <i>frames</i> com intervalo de 1 segundo – 24 horas
Gravação de data e hora	Não (gravado simultaneamente no arquivo de dados da imagem)
Memória	<i>Image Bank</i> – capacidade de 100 GB
Compatibilidade com cartão de memória	sim
Tamanho do arquivo	24-Bit RGB (8-Bit/canal): 114MB 48-Bit RGB (16-Bit/canal): 228MB
Tipo de bateria	Câmara: Lithium 3x CR-123 <i>Image bank</i> : Lithium Sony NP-F
Adaptador de energia	Interface IEEE1394 – via <i>Image bank</i>
Interface com computador	Cabo IEEE1394 (Firewire) via <i>Image bank</i>
Controle remoto	<i>Remote Release Cord H</i> (opcional)
Profundidade de campo - <i>Preview</i>	sim
Display LCD	2" TFT colorido
Opções de linguagem	Inglês (outras linguagens: via download de firmware)
Dimensões (A x L x P)	5,8 x 6,1 x 8,2" (135 x 155 x 207mm)
Peso	<i>Back</i> digital – 500g Corpo da câmara: 820g Visor: 325g Lentes (80mm): 500g <i>Image Bank</i> : 680g
Custo aproximado (FOB) (Referência: Março/2008)	US\$ 32.000,00

Fonte: Manual do usuário da câmara Hasselblad H1D - v1 (2004).

SONY F-828

Sensor	CCD – 8,8 x 6,6 mm
Resolução geométrica	3264 x 2448 (8 megapixels), 2592 x 1944 (5 megapixels), 2048 x 1536 (3 megapixels), 1280 x 960 (1 megapixel), 640 x 480 (formato de email)
Resolução radiométrica	8-bit
Formato de arquivo	RAW, TIFF, JPEG
Lentes	Carl Zeiss Vario-sonnar T
Foco	Automático e manual (anel de ajuste)
Zoom óptico	28 – 200mm (7 x)
Zoom digital	2 x
Filtro de cor	RGBE
Sensibilidade	ISSO 64, 100, 200, 400, 800
Abertura	F2.0 – F2.8/F8.0
Velocidade do obturador	1/3200 – 30 segundos
Prioridade no obturador	sim
Prioridade na abertura	sim
Modos do flash	Automático, manual, desligado, externo
Timer	10 segundos
Filme	sim, MPEG
Armazenamento	Memory Stick, Memory Stick Pro, Compact Flash (tipo I ou II)
Visor	EVF
Bateria	InfoLithium (NP-FM50)
Carregador de bateria	sim
Consumo de energia	2,2 W (LCD ligado)
USB	sim
Firewire IEEE1394	não
Serial	não
Controle remoto	opcional
Display LCD	1,8" TFT colorido
Dimensões (A x L x P)	3,6 x 5,3 x 6,1" (91 x 134 x 156mm)
Peso	955 g
Custo aproximado (FOB) (Referência: Março/2008)	U\$ 900,00

Fonte: Manual do usuário da câmara Sony F-828 – Sony Corporation (2003).

ANEXO B

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO SISTEMA GPS/INS SPAN - CPT NOVATEL

Fabricante	Novatel
Conector da antena GPS	TNC - fêmea
Dados gravados	Dados da IMU (acelerações e razões angulares) e dados GPS (medidas brutas, posições e velocidades)
Razão de dados	IMU: 100 Hz GPS: 5 Hz
Solução em tempo real	Omnistar
Solução pós-processada	Waypoint Inertial Explorer
Bias	Acelerômetros: +/- 50,0 mg Gyros: +/- 20º/h
Range	Acelerômetros: +/- 10 g Gyros: +/- 375 º /s
Fator de escala	Acelerômetros: 4000 ppm Gyros: 1500 ppm
Consumo	15 W Max.
Temperatura de operação	-40º a +65º
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 - 0,2 m (OMNISTAR); Velocidade: 0,02 m/s Atitude: 0,05º (roll, pitch) e 0,1º (heading) Tempo: 20 ns
Custo aproximado (FOB) (Outubro/2008)	US\$ 30.000,00

Fonte: www.novatel.com.

Antena GPS-534C

Fabricante	Novatel
Modelo	GPS-534C
Banda	L1: 1575,42 +/- 13 MHz L2: 1227,60 +/- 13 MHz Banda L: 1542 +/- 17,5 MHz
Conector do receptor GPS	TNC – macho
Ruídos	1,9 dB
Voltagem de entrada	2,5 – 24,0 VDC
Consumo	< 35 mA
Peso	191 g
Dimensões	76 x 119 x 20 mm
Custo aproximado (FOB) (Referência: Outubro/2008)	US\$ 1.000,00

Fonte: www.novatel.com