

METODOLOGIA PARA LOCAÇÃO DE ANTENA GPS EM RELAÇÃO AO CENTRO PERSPECTIVO DE UMA CÂMERA RC10 PARA FINS DE VÔO APOIADO

Juilson J. Jubanski ¹
Peterson Martinski ²
Taciana S. Salvador ³
Edson A. Mitishita ⁴

¹ Universidade Federal do Paraná – UFPR – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (Aluno de Mestrado) – juilson@ufpr.br

² Aerosat Arquitetura Engenharia e Aerolevantamento (Eng. Civil - Diretor) – peterston@aerosat.com.br

³ Aerosat Arquitetura Engenharia e Aerolevantamento (Eng. Cartógrafa) – taciana@aerosat.com.br

⁴ Universidade Federal do Paraná – UFPR – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (Professor Orientador) – mitishita@ufpr.br

RESUMO

A determinação das coordenadas espaciais do CP através do uso de GPS cinemático é uma metodologia viável e que pode ser implementada em vários trabalhos fotogramétricos no Brasil. No entanto, muitos aspectos importantes desse tipo de trabalho, apesar de conhecidos e profundamente estudados, podem ser desprezados no processo de implantação de um sistema de vôo apoiado, causando erros posteriores na aerotriangulação, os quais muitas vezes não são detectáveis. Um dos aspectos que permanecem obscuros é o da determinação da posição do centro de fase da antena em relação ao centro perspectivo da câmera fotogramétrica utilizada. O presente trabalho tem por objetivo propor um método topográfico preciso para essa determinação, a fim de serem minimizados erros posteriores nas aerotriangulações, bem como facilitar a adaptação do modelo matemático destas à realidade física. Assim, foi feita a determinação para um conjunto composto por uma câmera WILD-RC10 e uma antena cinemática NovAtel, numa aeronave Embraer Sêneca II, da empresa Aerosat, de Curitiba. Os métodos práticos e matemáticos são discutidos nesse trabalho, bem como os resultados obtidos, suas precisões, e algumas recomendações importantes são propostas no final do trabalho.

Palavras-Chave: Vôo Apoiado, Fotogrametria, GPS.

AN APPROACH TO THE LOCATION OF GPS ANTENNA IN RELATION TO THE PERSPECTIVE CENTER OF A RC10 CAMERA FOR ITS USE AT AIRBORNE GPS

ABSTRACT

The determination of the space coordinates of the CP through the use of kinematic GPS is a viable methodology and it can be implemented in some photogrammetric works in Brazil. However, although known and deeply studied, many important aspects can be easily forgotten in the process of implantation of a system of airborne GPS, causing posterior errors in the aerial triangulation, which many times are not detectable. One of the aspects that remain obscure is the determination of the position of the center of phase of the GPS antenna in relation to the perspective center of the used photogrammetric camera. The present paper has the objective of propose a rigid topographical method and, in order to be minimized the posterior errors in the aerial triangulations, as well as facilitating the adaptation of the mathematical model of the aerial triangulation to the physical reality. Thus, the determination has been made for a system with a WILD-RC10 camera and a kinematics GPS antenna NovAtel, in an aircraft Embraer Seneca II, of the company Aerosat, located in Curitiba. The practical and mathematical methods are argued in this work, as well as the results, its precisions, and some important recommendations are proposed in the end of the paper.

Keywords: Airborne GPS, Photogrammetry, GPS.

1 - INTRODUÇÃO

O interesse no uso de GPS embarcado em aeronaves, para a determinação direta das coordenadas do centro perspectivo, vem desde os primeiros tempos do desenvolvimento dessa tecnologia, a mais de

uma década. Nos últimos anos, esse interesse tem aumentado consideravelmente, estimulado pelos avanços dos equipamentos GPS (receptores e antenas), pelas novas técnicas de processamento disponíveis e pela disponibilização de toda a constelação GPS. As melhorias nas tecnologias dos receptores possibilitam uma melhor precisão na determinação da posição tridimensional, enquanto uma constelação completa oferece geometria suficiente quase 24 horas por dia. Esses dois fatores descartaram as incertezas iniciais do uso do sistema GPS como uma ferramenta de base na cartografia, tornando esse sistema muito atrativo para o uso nos mapeamentos aerofotogramétricos e na navegação GREENING (2000).

O GPS cinemático embarcado para fins de vôo apoiado, é a tecnologia que explora a possibilidade da redução significativa de pontos de controle de campo nas aerotriangulações. Essa alternativa é possível através da determinação da posição do centro perspectivo (CP), no instante da tomada da aerofoto, utilizando-se de um receptor GPS dentro da aeronave, para posicionamento diferencial de alta precisão, em modo cinemático. As coordenadas obtidas são integradas na aerotriangulação como observações dentro do bloco de ajustamento com finalidade muito semelhante ao apoio de campo. Quando usada essa técnica, somente um número limitado de pontos de apoio é necessário, e em alguns casos o apoio de campo pode ser totalmente eliminado, ajudando muito na diminuição nos custos do projeto. GREENING (2000), HABIB (1995), MAGRO (1992).

Os primeiros testes com vôo apoiado demonstraram as potencialidades do uso das coordenadas de antena, com a possibilidade de se minimizar a quantidade de pontos de apoio de campo, atingindo precisões aceitáveis nos resultados das aerotriangulações. Apesar desses resultados satisfatórios, vários trabalhos realizados, principalmente na Europa, mostram também os erros que podem ser cometidos no processo, com uma sincronização falha entre os equipamentos; perdas de sinal GPS; problemas de referenciais geodésicos (principalmente no que se refere às ondulações do geóide); e com uma má determinação do centro de fase da antena GPS em relação ao CP. JACOBSEN (1996).

O presente trabalho vem tratar da última questão citada acima, que é a determinação do centro de fase da antena em relação ao CP da câmera, apresentando uma técnica topográfica para a solução do problema.

2 – A PROBLEMÁTICA

Consideremos um avião na faixa de vôo, com a câmera fotogramétrica nivelada. Consideremos também uma antena GPS localizada exatamente na vertical do CP. Tomando o plano do negativo como base, teríamos:

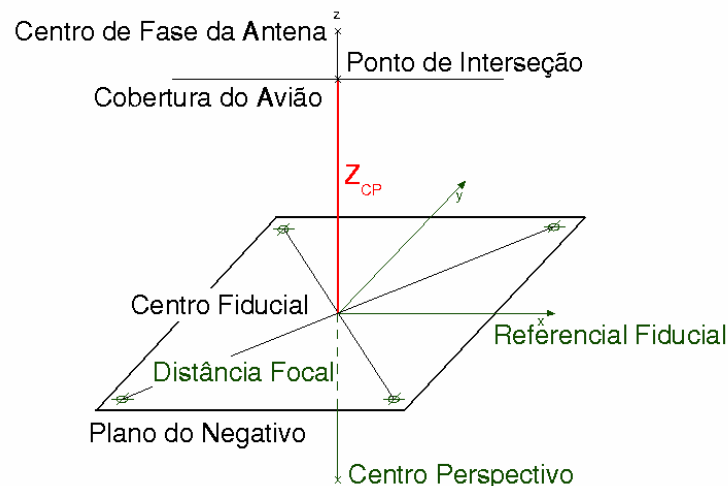


Figura 01 – Visão Esquemática da Configuração do Sistema

Considerando o referencial fiducial coincidente com o referencial fotogramétrico, dada a dimensão da determinação, podemos considerar o caso de o centro de fase da antena estar determinado no referencial fotogramétrico. Assim, o ponto objeto (no referencial geodésico local) e o ponto imagem são coincidentes, e pode-se então escrever as equações que relacionam o CP com o CF (centro de fase) da seguinte forma, conforme KUNTU-MENSAH (1999), ARANA (1994):

$$\begin{bmatrix} \\ \\ \\ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} - & 0 \\ - & 0 \\ - & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde:

$[X_{\text{foto}} \ Y_{\text{foto}} \ Z_{\text{foto}}]^T$ = Coordenadas do Centro de Fase no referencial fotogramétrico;

$[X_{\text{CF}} \ Y_{\text{CF}} \ Z_{\text{CF}}]^T$ = Coordenadas do centro de fase no referencial geodésico local;

$[X_0 \ Y_0 \ Z_0]^T$ = Coordenadas do Centro Perspectivo no referencial geodésico local;

M = Matriz de rotações.

Na situação proposta na Figura (01), X_{CF} e Y_{CF} são verticais ao CP, logo essas duas coordenadas fotogramétricas serão nulas. Assim, substituindo esses valores em (1) e isolando as coordenadas do centro de fase, teremos:

$$\begin{bmatrix} \\ \\ \\ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ \\ \\ \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \\ \\ \\ \end{bmatrix} \quad (2)$$

Substituindo-se os valores conhecidos de M e realizando o cálculo matricial em (2), obtemos o seguinte modelo matemático:

$$\begin{cases} X_{\text{CF}} = \text{sen}(\varphi) \cdot Z_{\text{foto}} + X_0 \\ Y_{\text{CF}} = -\text{cos}(\varphi) \cdot \text{sen}(\omega) \cdot Z_{\text{foto}} + Y_0 \\ Z_{\text{CF}} = \text{cos}(\omega) \cdot \text{cos}(\varphi) \cdot Z_{\text{foto}} + Z_0 \end{cases} \quad (3)$$

Onde:

$\kappa; \varphi; \omega$ - Rotações a partir dos eixos Z, X e Y respectivamente.

A equação (3) nos mostra que se o centro de fase for colocado na vertical do plano do negativo, a relação entre o CP e o CF será independente de κ (rotação em z). O modelo supõe que a câmera não se movimenta dentro do avião, mas isso não ocorre na prática. No entanto, sabendo-se que a deriva é corrigida em κ e que esse é o maior ângulo que a câmera WILD RC-10 (modelo utilizado no trabalho) realiza independentemente dentro do avião (a correção da deriva pode chegar a 4° enquanto os ângulos de nivelamento variam em torno de 15', no máximo), basta determinar o Z_{foto} em posição de vôo para podermos utilizar o modelo (3) dentro da aerotriangulação, pois a variação do nivelamento entre o momento da determinação e durante o vôo estará dentro de um limite aceitável, já que o modelo independe de κ .

O problema se resume, então, em duas tarefas: localizar a posição da vertical do centro perspectivo da câmera no teto do avião, e com essa informação, calcular o valor absoluto de Z_{CP} .

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – MATERIAIS UTILIZADOS

Para a determinação dos ângulos e distâncias citados no item (3.2.2), utilizou-se uma estação total LEICA® modelo TC705, com precisão angular de 5" e de 2mm + 2ppm nas medidas de distâncias a LASER sem refletor (figura 02).

Os alvos foram materializados com papel especial, com um desenho indicando o centro do alvo. O centro do alvo possuía 5mm de diâmetro. No total foram fixados 47 alvos distribuídos uniformemente pelo hangar, cujas dimensões aproximadas são de 17m de comprimento, 12m de largura, 4m de altura nas paredes e 8m na parte mais alta.

A aeronave é uma Embraer Seneca II EMB810C, prefixo PT-EIK ano de fabricação 1977 (figura 04), pertencente à Aerosat Arquitetura Engenharia e Aerolevantamento.



Figura 02 – Estação Total LEICA TC-705

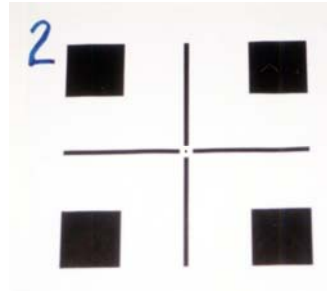


Figura 03 - Alvo Implantado



Figura 04 – Aeronave SENECA II – PT-EIK (Aerosat)

3.2 – MÉTODOS EMPREGADOS

O método como um todo se constitui de três etapas fundamentais: a realização de um referencial local preciso dentro do hangar onde se encontra o avião; a determinação da posição do CP nesse referencial com o avião nivelado com macacos hidráulicos (simulando uma posição ideal de vôo); e finalmente, a locação dessa coordenada no topo da aeronave, e com isso determinar do valor absoluto de Z_{CP} .

3.2.1 – Realização do Referencial Local

Depois de instalados e numerados todos os alvos, foi escolhido um ponto próximo ao centro do hangar como centro do referencial local. A esse ponto foi arbitrada a coordenada (50;50;50), para evitar coordenadas negativas. O equipamento foi instalado sobre esse ponto, e, utilizando-se da medida a LASER sem refletor, foram determinadas três vezes as coordenadas dos alvos, para depois ser calculada a média.

3.2.2 – Determinação das Coordenadas do CP

Após a determinação do referencial local, o avião foi colocado dentro do hangar de forma que a câmera ficou situada bem próxima à origem do sistema local. Então, o avião foi colocado em posição simulada de vôo, utilizando-se dos pontos de nível situados próximas à cabine do piloto, e a câmera foi nivelada da melhor maneira possível. Assim foi assumido que a situação da figura (01) foi teoricamente estabelecida.

Para a determinação da coordenada da maneira mais rígida possível, foram realizadas medidas de ângulos e distâncias entre pontos intermediários e o CP, o qual na verdade é bastante difícil de ser visado com boa geometria. Na verdade, toda a solução baseia-se na determinação de uma coordenada a partir das distâncias entre pontos conhecidos e o CP. Supondo dois pontos de coordenadas tridimensionais conhecidas, e o ponto CP a ser determinado, a solução angular possui a configuração das figuras 05 e 06 abaixo. O "CP" aqui tratado é o centro do referencial fiducial no plano do negativo, o qual foi materializado com um filme que possui a imagem das marcas fiduciais, fixado sobre o cone da câmera, com as imagens das marcas posicionadas sobre as marcas reais.

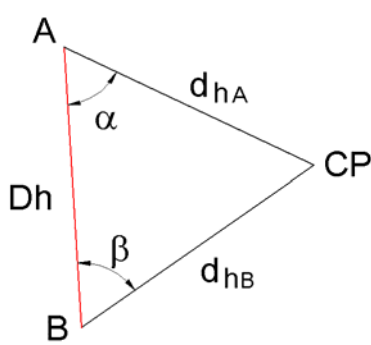


Figura 05 – Disposição dos Ângulos Horizontais

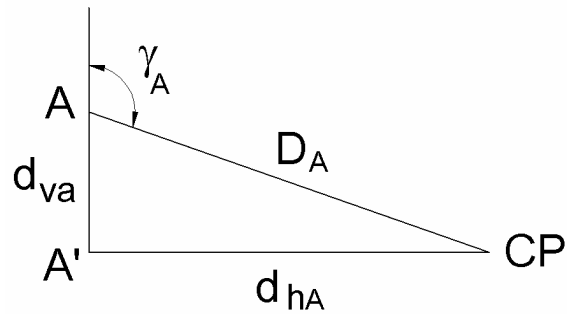


Figura 06 – Disposição dos Ângulos Verticais

Da figuras (06) temos, para o vértice A:

$$= \quad \circ - \gamma \quad (4)$$

Das figura (06) temos, pela lei dos senos, para o vértice A:

$$\frac{\alpha}{\circ - \gamma} = \frac{\circ - \alpha - \beta}{\quad} \quad (5)$$

Onde:

α = Ângulo horizontal em A, entre B e CP;

β = Ângulo horizontal em B, entre A e CP;

γ_A = Ângulo vertical em A, visando CP;

D_A = Distancia tridimensional entre A e CP;

D_h = Distancia horizontal entre os pontos A e B.

Isolando D_A teremos:

$$= \frac{\alpha}{\gamma} \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \quad (6)$$

Aplicando a fórmula da distância tridimensional entre A e CP, e passando todos os elementos para o primeiro membro, a fim de tornar o modelo matemático funcional adequado ao modelo de ajustamento combinado, teremos por fim:

$$\sqrt{(\quad - \quad) + (\quad - \quad) + (\quad - \quad)} - \frac{\alpha}{\gamma} \frac{\alpha}{\alpha + \beta} = \quad (7)$$

Onde:

$X_A ; Y_A ; Z_A$ = Coordenadas do ponto A;

$X_{CP} ; Y_{CP} ; Z_{CP}$ = Coordenadas do CP.

Da mesma maneira, para o vértice B, teremos:

$$\sqrt{(\quad - \quad) + (\quad - \quad) + (\quad - \quad)} - \frac{\beta}{\gamma} \frac{\beta}{\alpha + \beta} = \quad (8)$$

Onde:

$X_B ; Y_B ; Z_B$ = Coordenadas do ponto B.

Para a determinação das coordenadas dos pontos intermediários (A e B, por exemplo), foram realizadas medidas de distâncias a LASER entre o centro óptico da estação total e os pontos do referencial local. Conhecidas as coordenadas e as distâncias foram ajustadas as melhores coordenadas,

utilizando-se do método paramétrico, GEMAEL (1994), aplicado ao seguinte modelo matemático funcional:

$$= \sqrt{\left(\begin{matrix} - \\ - \\ - \end{matrix} \right) + \left(\begin{matrix} - \\ - \\ - \end{matrix} \right) + \left(\begin{matrix} - \\ - \\ - \end{matrix} \right)} \quad (9)$$

Onde:

D_p = Distância medida entre o ponto intermediário e o ponto visado;

$X_i ; Y_i ; Z_i$ = Coordenadas do ponto intermediário;

$X_p ; Y_p ; Z_p$ = Coordenadas do ponto visado.

O procedimento de campo consiste de duas etapas para cada ponto intermediário: primeiro, medem-se as distâncias entre os pontos do referencial local e o ponto intermediário. Para a medição dos ângulos horizontais foram instalados alvos no chão; pois a segunda etapa constitui-se em medir a maior quantidade possível desses ângulos, visando melhor geometria e superabundância de dados. Também nessa etapa foram medidos os ângulos verticais entre os pontos intermediários e o CP. Em todas as medidas angulares são realizadas três séries de leituras em posição direta e inversa da luneta.

Durante o procedimento prático, verificou-se a possibilidade de se medir diretamente a distância entre o ponto intermediário e o CP. Dessa forma, foram adicionadas ao ajustamento angular mais algumas observações diretas de distância.

O modelo matemático de ajustamento para a determinação do CP é o combinado, pois tanto parâmetros e observações são ajustados, e porque não se podem separar as observações dos parâmetros. De forma semelhante às distâncias calculadas via ângulos, as equações das medidas diretas das distâncias ficou:

$$\sqrt{\left(\begin{matrix} - \\ - \\ - \end{matrix} \right) + \left(\begin{matrix} - \\ - \\ - \end{matrix} \right) + \left(\begin{matrix} - \\ - \\ - \end{matrix} \right)} - = \quad (10)$$

Onde:

$X_i ; Y_i ; Z_i$ = Coordenadas do ponto intermediário;

$X_{CP} ; Y_{CP} ; Z_{CP}$ = Coordenadas do CP;

D = Distância medida a LASER.

Após todas as medidas foi realizado o ajustamento, combinando as equações angulares (07 e 08), com as lineares (10), cujos resultados serão discutidos adiante.



Figura 06 – Visão Geral do Levantamento



Figura 07 – Disposição dos Alvos

3.2.3 – Locação da Posição do CP no Teto da Aeronave

Determinadas as coordenadas do CP, procedeu-se a locação das coordenadas planas no topo da aeronave. Para tanto, escolheu-se um ponto de visada adequada, foi determinada a coordenada do mesmo pelo método descrito para os pontos intermediários. A coordenada plana do CP é conhecida, logo basta calcular a distância plana entre o ponto determinado e o CP, mais uma direção em relação a um dos pontos do referencial local. Utilizando-se da medida de distância a LASER da estação total, determinou-se, após várias tentativas, a posição do CP sobre a aeronave.

4 – RESULTADOS

4.1 – COORDENADAS DOS PONTOS INTERMEDIÁRIOS

Tabela 1 – Coordenadas dos Pontos Intermediários e Desvio Padrão (σ)

Ponto	X(m)	$\sigma X(m)$	Y(m)	$\sigma Y(m)$	Z(m)	$\sigma Z(m)$
1	47.891	0.001	45.544	0.001	50.376	0.006
2	45.726	0.003	45.342	0.002	50.410	0.023
3	44.606	0.002	48.167	0.001	50.403	0.004
4	46.563	0.000	51.743	0.000	50.398	0.003
5	51.501	0.000	50.289	0.000	50.777	0.003
6	47.158	0.001	46.619	0.000	50.393	0.003

Como se pode observar, a precisão em z é sempre muito inferior do que em x e y, pois a distribuição espacial dos pontos em z é muito mais fraca do que a distribuição em x e y, devido à dificuldade de se elevar o equipamento e obter melhor geometria em z. No ponto 2 houve problemas na execução do levantamento e por isso a precisão desse ponto ficou tão abaixo dos demais.

4.1 – COORDENADAS DO PONTO CP NO PLANO DO NEGATIVO

Tabela 2 – Coordenadas do Ponto CP e Padrão (σ)

Ponto	X(m)	$\sigma X(m)$	Y(m)	$\sigma Y(m)$	Z(m)	$\sigma Z(m)$
CP	50.222	0.002	50.255	0.001	49.672	0.003

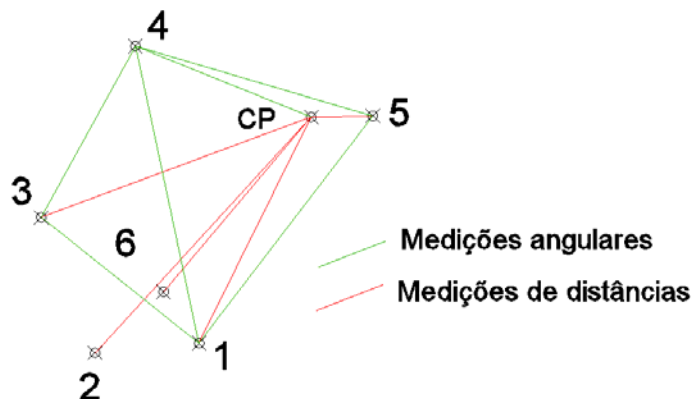


Figura 07 – Visão Esquemática da Geometria da Determinação

Após a locação das coordenadas X e Y no teto do avião, obteve-se um Z de 50.357m. Assim, considerando que entre o CP real e o plano do negativo a distância é c (distância focal – 153,172mm); e que entre a base da antena e o centro de fase (média entre L1 e L2) são 15mm, teremos um Z_{CP} de 0.883m, entre o CP e o centro de fase, valor este que será utilizado nas futuras aerotriangulações.



Figura 08 – Visão Geral do Sistema Montado

5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Quanto ao método pode-se afirmar que o mesmo teve êxito, pois foi possível determinar com precisão milimétrica a posição da vertical do CP no teto de avião, condição necessária para a diminuição ao máximo, dentro do processamento da aerotriangulação, das influências dos movimentos independentes da câmara, e da diferença entre a posição da determinação e desta em vôo.

A respeito dos procedimentos práticos de medida, cabe ressaltar as dificuldades em termos de visada, geometria e estabilidade do instrumento. Quanto às visadas aos pontos, o fator iluminação é fundamental. Uma iluminação falha do hangar (em excesso ou reduzida), pode acarretar erros maiores nas medidas angulares. Os alvos devem ser bem definidos, pois as distâncias são pequenas e o aumento causado pela luneta do equipamento pode causar indefinição de pontaria para o operador. As medidas de distância a LASER não devem ser muito oblíquas, pois essas distâncias tendem a apresentar resíduos maiores, prejudicando a determinação. Quanto à geometria horizontal dos pontos, cabe ressaltar que um planejamento prévio dos pontos intermediários deve ser realizado, pois uma geometria falha pode propagar erros indesejáveis e de difícil detecção posterior. Isso é muito importante, pois alvos devem ser instalados no chão antes do início do levantamento, a fim de serem visados a partir do maior número possível de pontos intermediários. Quanto à geometria vertical, existe a dificuldade de se elevar o equipamento numa plataforma estável a fim de se obterem alturas diferentes, e desta forma melhor distribuir espacialmente os pontos intermediários. Também existe a deterioração da distância medida quanto o CP está numa altura muito próxima à do centro óptico do equipamento, devido ao fato de o ângulo de medida de distância ser bastante oblíquo.

No trabalho realizado, por se tratar da primeira realização prática, algumas das condições apresentadas não foram as ideais, o que causou a eliminação, durante o ajustamento, do ponto 2 no ajuste angular e do ponto 4 no ajuste por distâncias. No entanto, como o ajuste final combina ângulos e distâncias, o modelo matemático se apresentou bastante rígido e com um resultado dentro da precisão necessária à utilização prática dos dados. No entanto, será necessária uma readaptação do sistema de aerotriangulação, pois na verdade sempre existirá uma diferença entre o nivelamento feito no hangar e a aeronave nivelada em vôo. Apesar disso, sabe-se que a posição relativa entre o CP e a antena sofrerá uma variação inferior a 7mm em X e Y, o que permite a imposição de uma injunção no modelo da aerotriangulação, utilizando a posição teórica calculada (0;0;0,883), mais um desvio de 7mm em X e Y e de 3mm em Z. Pode-se injuncionar também a distância absoluta entre o CF e o CP em 0.883, com um desvio de 4mm (calculado com base das precisões do CP). Assim se verifica a importância de se localizar a antena o mais próximo possível da vertical, pois isso minimiza erros e facilita a adequação do modelo matemático da aerotriangulação à realidade física.

5 – REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J. Bittencourt de Andrade; **Fotogrametria**. Curitiba; SBEE, 2003; 2ª Edição, 274p.
- ARANA, José M; **Integração do GPS com a Fotogrametria**. Departamento de Cartografia; FCT/Unesp, 1994.
- GEMAEL, Camil; **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**, Editora UFPR, 1994, 319p.
- GREENING, W. J. Trevor; Schickler, W; Thorpe A. J.; **The Proper Use of Directly Observed Orientation Data: Aerial Triangulation Is Not Obsolete**. In: 2000 ASPRS Annual Conference, Washington, DC, May 22–26, 2000.
- HABIB, Ayman; **GPS Controlled Aerial Triangulation of Single Flight Lines**, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, 1995, 11p.
- JACOBSEN, Karsten; Schmitz, M; **A New Approach of Combined Block Adjustment Using GPS-Satellite Constellation**. Commission III, WG 1, 1996.
- KUNTU-MENSAH, Peter; **Empirical Evaluation Of Airborne GPS-Photogrammetry in a Commercial Environment**. THESIS for the Degree of Doctor of Philosophy, The University of Maine December, 1999.
- MAGRO, F. H. S. **GPS & Aerotriangulation**. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing-ISPRS. Washington. 1992