

Revista Brasileira de Cartografia (2011) N<sup>o</sup> 63/5: 565-574  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **INTEGRAÇÃO GPS/CÂMERA PARA UM SISTEMA DE GEORREFERENCIAMENTO DIRETO DE BAIXO CUSTO**

*GPS Camera Integration for a Low Cost Direct Georeferencing System*

**João Bosco Teixeira Junior & Daniel Carneiro Silva**

**Universidade Federal de Pernambuco - UFPE**

**Departamento de Engenharia Cartográfica**

Av Acadêmico Hélio Ramos, S/N Cidade Universitária Recife - PE

boscojr@gmail.com

danielcs@ufpe.br

*Recebido em 26 Julho, 2010/ Aceito em 2 Novembro, 2010*

*Received on July 26, 2010/ accepted on November 2, 2010*

### **RESUMO**

Tem sido desenvolvidos estudos e já existem sistemas de aquisição de fotografias de baixo custo usando câmeras digitais de pequeno formato disponíveis no mercado para fins aerofotogramétricos e mapeamento. Porém executar um levantamento com esse tipo de câmera tem a desvantagem de resultar numa quantidade de fotografias muito maior que na fotogrametria convencional e portanto são ainda mais importantes as exigências que as fotografias tiradas atendam rigorosamente aos requisitos de qualidade em verticalidade, paralelismo e recobrimento, que são os fatores que mais afetam a homogeneidade da fototriangulação. A solução para isto é ter um sistema integrado a um sistema inercial, para estabilizar a câmera, e receptor GPS, para fornecer as coordenadas do centro de exposição das fotografias; e com esses dados é possível melhorar a qualidade dos resultados da fototriangulação e reduzir os pontos de apoio de campo. O objetivo do presente trabalho é mostrar o desenvolvimento de sistema de baixo custo para melhorar a qualidade e produtividade dos levantamentos feitos usando câmeras de pequeno formato. O sistema sincroniza o disparo da câmera com o GPS, sendo composto de *software* e unidade computacional acoplada a um receptor GPS tipo OEM (Original Equipment Manufacturer) que comanda o instante exato das tomadas, para garantir o recobrimento entre as fotografias, em função da velocidade calculada com dados do receptor GPS, que é informação mais precisa que o respectivo posicionamento. Os detalhes de montagem e modelos matemáticos usados são descritos, assim como também são discutidos os resultados. Os testes preliminares mostram que o sistema é prático e bem adequado para uso com câmeras digitais comuns que possam ser acionadas via computador e que pode ser aplicado a sistemas de imageamento móvel em veículos terrestres e marítimos e ainda ser integrado a um sistema inercial que está sendo desenvolvido.

**Palavras chaves:** Fotogrametria Aérea, GPS/INS, GIS, Câmeras de Pequeno Formato.

### **ABSTRACT**

Currently there are studies that use photos from low-cost digital cameras available on the market as input to aerial photogrammetry and mapping. In order to use these low-cost cameras, it's important to be aware of the drawbacks, which is basically a much larger number of photos generated compared to conventional methods, which also raises the quality requirements of verticality, parallelism and overlapping: the most important factors that affects the homogeneity

of the photo triangulation. In order to solve this issue, the solution is to use an inertial system to keep both camera and GPS stable so it's possible to improve the quality results of our photo triangulation, having more accurate coordinates measurements from the photos and reduced field point surveying. The goal of this article is to show the development of a low-cost system to improve quality and productivity of the surveys made using the small format cameras. The system synchronizes the moment the camera is triggered with the GPS time. The system basically consists of software and a computing unit connected to an OEM (Original Equipment Manufacturer) GPS that controls the exact moment to trigger the camera to ensure overlap between successive photos. This moment is based on the GPS speed, which is more reliable than the actual position. The math models, the assembly and results are described and discussed in detail. The preliminary tests were very positive; the system is simple and feasible to be used with common cameras that can be triggered remotely and can be applied to mobile image systems integrated to land and sea vehicles. It could also use an inertial system which is currently in development.

**Keywords:** Aerial Photogrammetry, GPS/INS, GIS, Small Format Cameras.

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente tem sido intensificados trabalhos sobre o uso de câmeras digitais de pequeno formato em atividades de levantamento como em SILVA *et al.* (2005) e ROCHA *et al.* (2007), sistemas comerciais também já estão em operação como o EnsoMOSAIC *Aerial Digital Imaging* da empresa MOSAICMILL (2010). Todos esses estudos relatam dificuldades com os métodos de aquisição da fotografia, quanto ao recobrimento e verticalidade das mesmas. Em geral, o que se observa nestes estudos é o uso de câmeras fotográficas de pequeno formato acoplado a computadores que executam um sistema de disparo que usa como referência intervalos constantes de tempo (SILVA *et al.*, 2005).

Uma outra observação que deve ser feita refere-se às características dos sistemas operacionais mais comuns usados nestes computadores que geram erros expressivos e muitas vezes difíceis de mapear. Esses sistemas operacionais tem um erro relacionado ao atraso de tempo entre o momento que o *software* comanda o disparo da câmera e o instante em que esse comando chega ao *hardware* de comunicação com a câmera. Isso ocorre porque o sistema operacional executa as tarefas obedecendo uma fila, e a tarefa de comandar o disparo entra também nesta fila. A solução para atividades onde o tempo é um fator crítico normalmente é usar sistemas operacionais de tempo real que podem entregar a resposta de uma determinada solicitação em um tempo máximo conhecido, porém soluções deste tipo são complexas e por vezes exigem *hardware* dedicado.

Dito isto, o objetivo do presente estudo vai ao encontro das necessidades destes projetos de mapeamento com câmeras de pequeno formato, e mostra o desenvolvimento de um sistema de baixo custo para melhorar a qualidade e a produtividade dos levantamentos feitos usando essas câmeras, tratando a questão do recobrimento entre as fotografias de uma faixa baseado no uso da velocidade calculada pelo receptor GPS, como também, a determinação dos centros de exposição.

## 2. DETERMINANDO AS COORDENADAS DO CENTRO PERSPECTIVO NO INSTANTE DE EXPOSIÇÃO (CE)

### 2.1. Cálculo do instante do disparo

As posições dos CE (Centro de Exposição) das fotografias de um levantamento aerofotogramétrico são predefinidas a partir de um planejamento do voo, em que já são conhecidos a altura, os limites da área e características da câmera. Em um levantamento convencional, as etapas de planejamento e execução usam programas e equipamentos de desempenho comprovado e sem dificuldades, que de modo geral garantem excelentes resultados, mas no caso de voos com câmeras de pequeno formato e sistemas de baixo custo todos os programas e equipamentos têm que ser adaptados ou totalmente desenvolvidos, como é o caso deste projeto para desenvolvimento de um sistema confiável para disparo.

Em geral, depois da definição do início de uma faixa e realizado o primeiro disparo, uma fórmula usada para calcular o tempo entre os disparos é a seguinte (REDWEIK, 2007):

$$t[s] = B[m]/v[m/s] \quad (1)$$

$$B[m] = SI[m](1-r) \quad (2)$$

Onde:

$t$  é o intervalo de tempo entre as exposições;

$B$  distância entre exposições;

$v$  é a velocidade da aeronave;

$SI$  distância longitudinal coberta por uma foto;

$r$  é o recobrimento desejado (0-1).

O problema com a equação (1), é que a velocidade do avião não é constante e, por segurança, o planejamento deve prever um tempo menor afim de garantir o recobrimento mínimo. Essa abordagem acaba por aumentar o número de fotografias e por consequência o trabalho de escritório o que é uma das desvantagens do uso de câmeras de pequeno formato.

## 2.2 Uso do GPS na determinação do CE

A utilização do GPS no mapeamento fotogramétrico trouxe uma melhoria na produtividade e na qualidade do levantamento de campo para apoio a fototriangulação. Outra melhoria trazida pelo GPS foi fornecer as posições dos CEs durante a tomada, com o uso do receptor GPS embarcado. LOOSE *et al.* (2005) fizeram um trabalho comparando o levantamento com GPS embarcado com técnicas tradicionais e concluíram que a redução dos custos pode chegar a 50%, devido em grande parte pela redução do controle de campo necessário.

Hoje, admite-se os seguintes usos para o receptor GPS embarcado: Melhoria na precisão da navegação durante o voo; determinação do CE da fotografia para a fototriangulação; determinação do CE em conjunto com a orientação fornecida por uma unidade de medida inercial para georreferenciamento direto.

Para o primeiro caso, o receptor GPS garante uma melhor definição no início e no fim da faixa, assim como a superposição lateral. Para o segundo caso as observações GPS fornecem os CEs das fotografias (X,Y,Z), podendo ser pós processadas ou conhecidas em tempo real.

O GPS pode ser também usado para obter os ângulos de orientação ( $\omega, \phi, \kappa$ ) usando duas ou mais antenas (LIEVENS, 2004), porém essas técnicas conseguem ângulos com precisão de cerca

1' e para a fotogrametria é necessário que estes ângulos tenham precisão melhor que 10" (FERRIS, 2009). A orientação da câmara é melhor conhecida usando INS (*Inertial Navigation System*) integrado ao GPS no chamado georreferenciamento direto (CRAMER *et al.*, 2000), essa técnica determina os valores dos ângulos de orientação usando sensores inerciais (acelerômetros, giroscópios) para calcular as acelerações lineares e angulares e com base nestes dados ajustados determinar as orientações.

Para usar o GPS embarcado é essencial conhecer o vetor da posição relativa da antena do receptor GPS em relação ao sistema de coordenadas do centro de exposição, com a melhor precisão possível, conforme ilustra a Figura 1. Essa medida deve ser feita com a aeronave nivelada, e pode-se usar técnicas de levantamento topográfico ou fotogrametria terrestre.

A câmara deve estar rigidamente fixada em relação à antena, para manter a estabilidade geométrica do vetor. As melhores posições para a antena GPS na aeronave pode ser em dois pontos. O primeiro é na fuselagem, diretamente acima da câmara, que tem a vantagem de coincidir o eixo vertical da antena com o eixo ótico da câmara, porém neste ponto os efeitos do multicaminhamento, em virtude da reflexão da onda portadora do sinal GPS na fuselagem da aeronave, podem ser significativos (FERRIS, 2009). O segundo ponto é na cauda, na ponta do estabilizador vertical, o que reduz bastante os efeitos do multicaminhamento,

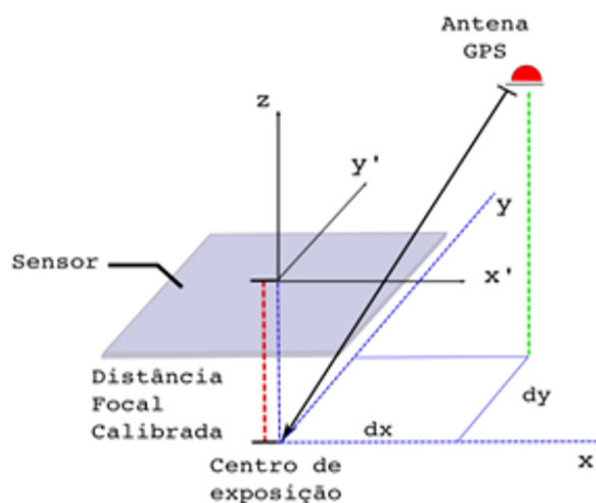


Fig. 1 – Sistema GPS-câmera

pois apresenta uma superfície para reflexão reduzida porém é necessário um maior trabalho para determinar o vetor de posição relativa.

A posição da antena GPS é registrada em tempos específicos, chamados de épocas, que dependendo das características do receptor varia de 1 Hz (equipamentos mais antigos, ou os atuais de baixo custo) até 100 Hz (RACELOGIC, 2004). De qualquer forma a possibilidade de coincidir uma época com o instante exato da tomada, é remota. Sendo assim, para conhecer o centro de exposição é necessário fazer algum tipo de interpolação. Para facilitar a tarefa de determinar o tempo em que a exposição ocorreu algumas câmaras possuem o recurso de enviar um sinal no momento da exposição que pode ser registrado no computador .

Um dos modelos mais simples de interpolação que pode ser utilizado é a interpolação linear. A Figura 2 ilustra uma situação onde o intervalo entre as épocas é de 1s, e o instante da exposição ocorreu entre a época i+1 e i+2.

Neste modelo, admite-se que a trajetória da aeronave é linear de uma época para outra, desta forma a coordenada do CE é obtida usando a seguinte equação:

$$d(X, Y, Z) = \Delta(X, Y, Z) \frac{di}{i} \quad (3)$$

Em que:

$i$  é o tempo entre as épocas GPS em segundos;

$\Delta(X, Y, Z)$  é a variação da coordenada GPS de uma época para outra em metros.

$di$  é a diferença entre a época GPS e o tempo de exposição em segundos;

$d(X, Y, Z)$  é o fator de correção que deve ser aplicado nas coordenadas GPS em metros.

Outros métodos de interpolação podem ser utilizados no sentido de se melhorar a estimativa deste fator de correção como o método polinomial usado por COSTA (2008).

### 3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A solução aqui detalhada baseia-se em um recurso muito comum em módulos GPS OEM, uma saída chamada PPS (*Pulse Per Second*) ou *timemark* que é um trem de pulsos com uma característica específica: sincronismo com o relógio GPS e precisão da ordem de 1µs (GLOBALSAT,

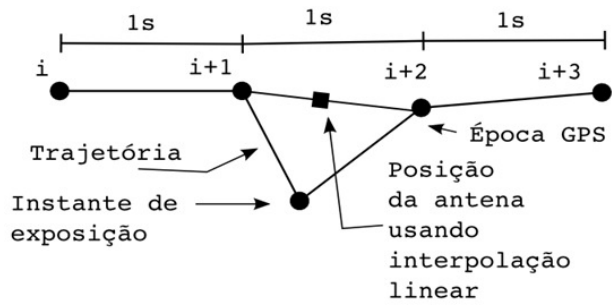


Fig. 2 – Cálculo do CE usando interpolação linear.

2005). A cada segundo o módulo emite um pulso que tem a duração de 1µs, a finalidade desta porta é fornecer uma referência de tempo para aplicações que precisam de um tempo mais preciso.

O uso deste pulso para disparar a câmera torna o processo de determinação do centro de exposição mais simples, haja vista que o instante de exposição será determinado pela época GPS somado ao tempo que a câmera leva para atender o comando para tirar a fotografia, esse tempo pode ser obtido a partir de um processo de calibração. Se esse tempo for muito pequeno é possível usar um processo de interpolação específico para estes casos, ou ainda simplesmente assumir a época GPS como o instante de exposição.

Para testar a solução aqui proposta foi desenvolvido um protótipo que foi dividido em três módulos distintos: O sistema computacional, o sistema de posicionamento (GPS) e o sistema de aquisição (SINC + câmera). A Figura 3 ilustra o relacionamento entre os módulos.

A seguir será detalhado cada um destes módulos.

#### 3.1 Sistema Computacional

O sistema computacional tem a finalidade de processar as observações recebidas do módulo GPS para o cálculo da distância do recobrimento e mandar o sinal de liberação do pulso PPS de disparo da fotografia. Outra função é a de armazenar as informações recebidas do receptor GPS para posterior processamento.

A decisão de quando o disparo deve ser feito é baseada na soma das velocidades adquiridas nas épocas GPS desde o instante da ultima tomada até época atual. A velocidade foi adotada como opção para o cálculo do momento da tomada pelo fato de que o receptor GPS obter uma acurácia maior no



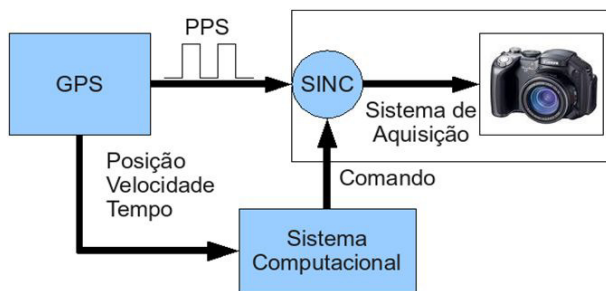


Fig. 3 – Módulos do Sistema.

calculado da velocidade (0,2km/h ou 0,055m/s) isso ocorre por que os receptores usam o efeito doppler para determinar a velocidade, o que do ponto de vista teórico tende a ser melhor do que usar a diferença de coordenadas entre dois pontos consecutivos.

O algoritmo que avalia o momento para a tomada pode receber dois tipos de entrada: O primeiro tipo de entrada, é uma tupla constituída da altura do vôo (h) em metros, a constante da câmara (c) em mm, a largura do sensor (s) em mm, e o recobrimento (l) desejado em percentual, com base nestes dados é calculada a distância entre as tomadas (B) ou base. Ainda é possível fornecer diretamente a base como entrada. O calculo da base (B) em função de altura (h), constante da câmara (c), largura do sensor (s) e recobrimento (l) atende ao seguinte modelo matemático:

$$Sl(m) = s(mm) \cdot \frac{h(m)}{c(mm)} \quad (4)$$

$$B(m) = \left(1 - \frac{l}{100}\right) * S1(m) \quad (5)$$

Em que *Sl* é a distancia longitudinal coberta por uma fotografia. O calculo do instante da tomada leva em consideração o seguinte somatório:

$$D_{i-1} = \sum \frac{V_{i-1}}{f} \quad (6)$$

Em que:

*D* é a distancia percorrida até o instante *i-1*;

*V* é a velocidade no instante *i-1*;

*f* é a taxa de amostragem.

Se no instante *i*:

$$D_{i+} \frac{D_i}{i} \geq b \quad (7)$$

Então *i+1* será o instante de exposição.

### 3.2 Sistema de Posicionamento

O sistema de posicionamento tem três funções distintas, a primeira, é enviar as informações de posição e velocidade, no formato NMEA, para o cálculo do instante da tomada. A segunda é fornecer a referência de tempo (porta PPS) que será usada para o disparo da câmara. E a terceira é fornecer informações de fase da portadora que serão utilizadas na atividade de determinação do CE na etapa de pós-processamento. Esses dados são gravados durante o voo em um formato proprietário que deverá ser convertido para o formato RINEX para o pós-processamento. O sistema de posicionamento é baseado no módulo OEM do fabricante Thales modelo AC-12 (THALES, 2005).

### 3.3 Sistema de Aquisição

O sistema de aquisição é responsável por capturar e armazenar as fotografias, ele recebe duas entradas: O trem de pulsos sincronizado com o tempo GPS que vem do módulo de posicionamento e o comando de disparo que vem do sistema computacional.

Ao receber o comando de disparo o subsistema de sincronismo (SINC na Figura 3) deixa passar o próximo pulso PPS e esse é recebido pela câmara que faz o disparo, essa abordagem tem duas vantagens principais: simplifica a determinação do instante da exposição além de eliminar possíveis erros relacionados ao tempo de resposta do sistema operacional.

O componente responsável pelo subsistema de sincronismo é um microcontrolador do fabricante Microchip modelo 16f628A, que possui uma velocidade de processamento de até 4MHZ. O microcontrolador tem uma das suas portas de entrada ligada ao sistema computacional (porta comando), a outra porta de entrada está ligada a referência de tempo do sistema de posicionamento (PPS). A saída do microcontrolador está ligada a entrada USB da câmara digital. A Figura 4 ilustra o funcionamento deste subsistema.

O subsistema de aquisição tem a função de fazer as tomadas e armazenar as fotografias e está baseado na câmara fotográfica do fabricante CANON modelo S3IS, esse fabricante foi escolhido devido a possibilidade de se alterar o *firmware* padrão da máquina substituindo-o completamente por um outro (*Canon hacker's development kit - CHDK*) que estende os recursos do equipamento

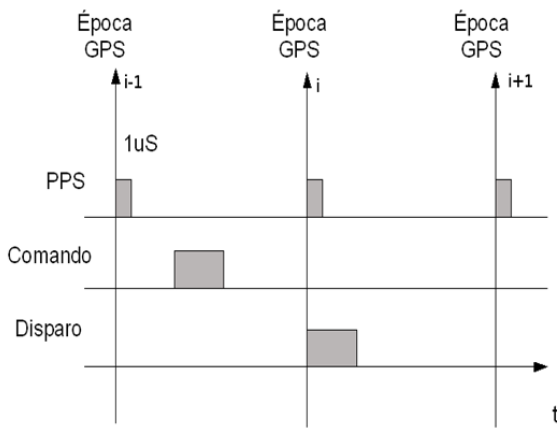


Fig. 4 – Funcionamento do sistema de disparo (SINC).

além de possuir o código fonte disponível o que permite alterações em sua funcionalidade. O uso do CHDK permite que a porta USB seja utilizada como porta de disparo, assim que é detectado um pulso na entrada USB a câmera realiza o disparo.

#### 4. SOFTWARE UTILIZADO

Quando se fala de custo de uma solução de *hardware* e *software*, quanto mais específico for o problema a ser resolvido maior é o custo do *software*, haja vista que o *hardware* tem se tornado cada vez mais padrão. Para desenvolvimento deste trabalho, a busca foi por *softwares* livres (Licenças GPL e BSD), que além de apresentar o aspecto do custo nulo, existe a possibilidade de estende-los com maior facilidade. A seguir a lista das soluções usadas.

##### 4.1 Linux

O GNU/Linux é um sistema operacional livre que tem sido utilizado em toda sorte de soluções, desde de as menos performáticas como *desktops* de usuários e telefones celulares, ou em soluções mais críticas, como em sistemas de navegação de aeronaves e robôs da exploração espacial. Neste projeto utilizamos o GNU/Linux como sistema operacional para o sistema computacional, como também foi usado no trabalho de análise do material obtido.

Uma das grandes vantagens do uso deste sistema computacional está na ampla gama de aplicações disponíveis, inclusive para fins científicos. A seguir uma breve descrição dos *softwares* desta plataforma utilizados para compor a esta solução.

##### 4.2 GPSD

O GPSD é uma aplicação que monitora um ou mais receptores GPS conectados a um computador, através de uma porta serial ou USB, fazendo com que esses dados de posição, curso, tempo e velocidade estejam disponíveis para consulta por qualquer outra aplicação GPS que esteja no mesmo computador ou em um computador remoto através da suíte protocolos de rede TCP/IP.

A vantagem do uso do GPSD é que diferentes aplicações podem consultar os dados fornecidos pelos receptores GPS simultaneamente, sem provocar qualquer tipo de inconveniente. O GPSD responde à consultas feitas fazendo uma interpretação dos dados enviados pelos os receptores GPS usando o formato NMEA 0183. O pacote GPSD fornece ainda bibliotecas de serviço em C, C++ e Python, usando essas bibliotecas é possível desenvolver aplicações customizadas que interajam com o GPSD. A aplicação desenvolvida para controlar o disparo da câmera foi construída utilizando a biblioteca Python.

É importante lembrar que os mantenedores do GPSD garantem que o código é cuidadosamente auditado para evitar que o seu funcionamento possa interferir ou inserir algum tipo de atraso nas informações fornecidas pelo receptor GPS.

##### 4.3 SDCC e GPUTILS

O sdcc (Small devices C compiler) é um compilador C usado para converter o código fonte escrito em linguagem C para o código do microcontrolador, aqui o PIC 16F628A.

O GPUTILS é uma suíte com vários aplicativos para desenvolvimento e simulação em sistemas embarcados baseado nos microcontroladores do fabricante Microchip, que é o caso do microcontrolador utilizado na solução apresentada aqui.

##### 4.4 CHDK

O CHDK (*Canon hacker's development kit*) é um *firmware* construído para prover uma série de novas funcionalidades não disponíveis no *firmware* das câmeras não profissionais da fabricante Canon, como por exemplo: possibilidade de fotografias em formato RAW, fotos por detecção de movimento, a possibilidade de usar scripts

(pequenos programas escritos em uma linguagem específica), grades, dentre outras. Uma outra vantagem do uso do CHDK é a possibilidade de visualizar o terreno durante o voo e ajustar o ângulo  $k$ , se a base permitir, usando as grades geradas. Isso evita o uso de uma segunda câmera para este fim, como por exemplo usada por COSTA (2008). A Figura 5 mostra uma fotografia do monitor acoplado a câmera durante o voo.

#### 4.5 Hugin and PanoTools

O hugin é uma interface de código aberto para o panorama-tools. Panorama-tools também conhecido como PanoTools é um conjunto de ferramentas e bibliotecas para diferentes programas de processamento de imagens que tem como objetivo a geração de panoramas a partir de várias fotografias. O Hugin tem o recurso de geração automática de pontos homólogos, que pode ser usado como entrada para programas de processamento fotogramétrico que não dispõe deste recurso, como por exemplo o Fotter, programa de ajustamento desenvolvido por SILVA (1995).

### 5. RESULTADOS

#### 5.1. Calibração da câmera

##### 5.1.1 Parâmetros de Calibração

Conhecer a geometria da câmera utilizada no levantamento é de fundamental importância para o uso das fotografias na fotogrametria. Os elementos geométricos da câmera podem ser conhecidos através de um processo de calibração. A câmera utilizada neste trabalho foi calibrada utilizando o *software* PhotoModeler alguns parâmetros obtidos podem ser vistos na Tabela 1.

##### 5.1.2 Tempo entre o comando e o disparo

Para se determinar o fator de correção a ser aplicado nas coordenadas GPS é necessário conhecer o tempo entre o pulso de disparo e o instante da tomada. A metodologia utilizada para isso foi fotografar um cronômetro que fosse inicializado através do pulso de disparo e usar o



Fig. 5 – Monitor acoplado a saída AV da câmera.

Tabela 1. Parâmetros de calibração da câmera.

Parâmetro	Valor	Desvio
Largura do Sensor (mm)	5.543.598	0.0003
Largura do Sensor (pixels)	2816	-
Distância Focal (mm)	5.953.707	0.0010

tempo marcado na fotografia como sendo o instante da tomada, a Figura 6 mostra algumas destas fotografias.

As fotografias estão escurecidas por causa do ajuste do tempo de exposição que teve que ser reduzido para 1/1000 para se obter um registro nítido dos tempos. Como resultado deste experimento foi obtido um tempo de 160ms com um desvio de 5ms. Com esse tempo de resposta, a uma velocidade de 40m/s, que era a velocidade da aeronave durante o voo, a coordenada GPS precisa ser corrigida em 6,4m na direção do voo.

#### 5.2 Planejamento do Voo

Objetivo do voo foi testar a aplicação e os equipamentos desenvolvidos em uma situação real. Desta forma foi estabelecida como área de estudo a ilha do Recife Antigo, e sendo assim tirar

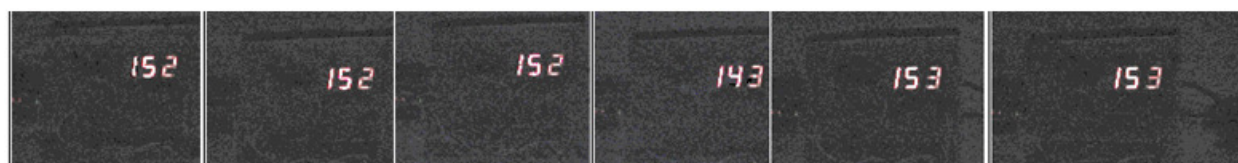


Fig. 6 – Fotografias do cronômetro

fotografias para a construção de um mosaico da área. O tamanho do pixel no terreno (GSD) deveria ser de 0,28m.

O voo foi feito numa aeronave Cessna 172, que dispunha de uma janela de observação no interior onde foi possível colocar a base e a câmera. Com base na formulação abaixo (COMER *et al.*, 1998), foi obtida uma altura de voo de 850m.

$$h(m) = \frac{f(mm) * GSD(m)}{p(mm)} \quad (8)$$

Em que:

*f* é a distância focal;

*GSD* (*ground sample distance*) tamanho do pixel no terreno;

*h* é a altura média do vôo em relação ao solo;

*p* é o tamanho do elemento sensor da câmera.

Com base no tamanho de pixel já pré-determinado e na largura do sensor em pixel temos uma cobertura longitudinal de uma fotografia de 621m, desta forma para se obter um recobrimento de 60% a distância entre as tomadas deve ser de 248m.

O voo foi realizado em cinco faixas e foram obtidas 68 fotografias, porém apenas três faixas foram usadas para a montagem do mosaico totalizando 36 fotografias. As fotografias foram georreferenciadas usando o *software* ArcGis, os centróides foram obtidos para se verificar a distância entre coordenadas dos centróides e as coordenadas fornecidas pelo sistema usando o GPS. O resultado pode ser visto na Tabela 2.

Observando a Tabela 2 é possível perceber erros médios maiores que 100m, que pode ser considerado muito grande indicando a existência de um erro sistemático na obtenção destes centros de exposição.

Com o intuito de eliminar o erro, foi feita uma comparação do tempo informado pelo GPS com o relógio da câmera digital. O receptor GPS gera as informações de posicionamento, tempo e velocidade usando um padrão para comunicação entre dispositivos de navegação conhecido como NMEA 0183. Neste padrão, as informações são geradas usando sentenças, onde cada uma destas sentenças tem formatação e finalidade específica. Maiores detalhes sobre o formato das sentenças e suas

Tabela 2. Distância entre centróides e coordenada GPS fornecida pelo relatório do sistema de disparo.

Faixa 1		Faixa 2		Faixa 3	
Foto	Dist(m)	Foto	Dist(m)	Foto	Dist(m)
712	112,57	730	76,58	742	123,93
713	103,92	731	55,04	743	114,49
714	109,74	732	64,31	744	97,88
715	103,16	733	52,7	745	84,71
716	103,18	734	29,95	746	132,73
717	102,94	735	81,24	747	141,2
718	106,15	736	85,43	748	114,88
719	120,53	737	93,22	749	115,62
720	121,37	738	108,03	750	132,18
721	125,94	739	84,8	751	148,92
722	123,29	740	91,26	752	160,09
723	115,16	-	-	753	171,32
724	108,12	-	-	-	-
Média	109,74	Média	88,35	Média	128,06
Desvio	8,42	Desvio	9,58	Desvio	24,98

finalidades podem ser encontradas no manual do receptor (THALES NAVIGATION, 2005).

Desta forma, foi feita uma comparação entre o tempo GPS, extraído usando a sentença NMEA ZDA, e o tempo registrado no cabeçalho do arquivo da fotografia a fim de verificar a diferença de tempo entre o relógio GPS e da câmera. De posse desta diferença de tempo, foram retiradas as coordenadas do arquivo de *log* do GPS. Na Tabela 3, é possível observar a redução do erro médio de mais de 100m, como informado anteriormente, para 25m, que ainda é grande para fins fotogramétricos, mas é compatível com os erros inerentes ao sistema de baixo custo desenvolvido. Os erros são os seguintes:

- Inclinações ( $\omega, \varphi$ ) da câmera em relação ao solo, da ordem de um ou dois graus, no momento da tomada podem introduzir erros de 15m a 30m na projeção do CE no terreno;

- O ponto principal da câmera tem deslocamento significativo do centro do sensor de acordo com o processo de calibração da câmera descrito na seção 4.1. Usando os parâmetros de calibração ( $X_0, Y_0$ ) o vetor de deslocamento do ponto principal é da ordem 13m;

- O atraso no disparo é outro fator que insere erro na medida. Com experimentos descritos na seção 4.2.1, foi encontrado para a câmera um atraso médio de 160ms, com a velocidade média do voo de 40m/s o erro é de 6,4 m;

- O erro relacionado à coordenada GPS no posicionamento absoluto usando o código C/A, segundo o fabricante é de 5m (THALES NAVIGATION, 2005);



Tabela 3. Distâncias entre centróides e coordenada GPS extraídas do arquivo de log.

Faixa 1		Faixa 2		Faixa 3	
Foto	Dist(m)	Foto	Dist(m)	Foto	Dist(m)
712	42,73	730	42,17	742	56,83
713	27,42	731	30,51	743	46,95
714	44,58	732	35,71	744	6,87
715	45,1	733	22,13	745	6,87
716	34,63	734	21,2	746	3,46
717	16,15	735	20,41	747	44,32
718	11,96	736	9,71	748	42,84
719	14,01	737	10,51	749	20,36
720	25,09	738	31,41	750	14,9
721	26,53	739	14,75	751	40,59
722	12,15	740	14,3	752	31,09
723	18,62	-	-	753	20,69
724	21,33	-	-	-	-
Média	26,18	Média	22,98	Média	25,59
Desvio	4,66	Desvio	8,7	Desvio	15,79

· Erros na determinação da diferença entre o relógio do GPS que pode ser desde milissegundos até um segundo. Para um erro de 500ms a 40m/s o erro é de 20m;

Outra análise feita com base nos centróides foi com as distâncias entre os centróides de fotos adjacentes da mesma faixa, o resultado pode ser visto na Tabela 4. Na coluna 1 são mostradas as faixas, na coluna 2 são mostrados os modelos, e nas colunas 3 e 4 são mostradas as distâncias entre os centróides calculadas pela diferença entre dois pontos e pelo algoritmo de disparo respectivamente.

Na Tabela 4 é possível observar que a base foi mantida abaixo do valor especificado, isso ocorre por que o algoritmo depende a amostragem do GPS, usando-se um GPS com uma taxa de amostragem maior poder-se-ia ter uma base mais próxima do valor estabelecido, reduzindo ainda mais o número de fotografias. Entretanto, convém observar que o algoritmo de disparo conseguiu manter a base abaixo dos 248m, que foi o valor estabelecido para um recobrimento mínimo de 60%.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

COMER, R. P.; KING G.; LIGHT, D.; MONDELLO, C. 1998. **Talking Digital. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing.** pp. 1139-1142. Disponível em: <http://www.asprs.org/publications/pers/98journal/december/12-98-digital.pdf>. Acesso: 20 junho 2009.

COSTA, G. C. **Análise dos produtos obtidos com aerolevantamentos utilizando câmaras digitais não-métricas para elaboração de anteprojetos rodoviários.** Dissertação de Mestrado. Recife, 2008.

Tabela 4. Distâncias entre centróides adjacentes calculadas pelos centróides e pelo algoritmo de disparo.

Faixa	Modelo	Dist Centroides	Algoritmo	
1	712-713	210,316	214,431	
	713-714	215,501	214,307	
	714-715	209,353	214,754	
	715-716	218,437	214,754	
	716-717	228,761	216,301	
	717-718	219,436	216,235	
	718-719	232,368	215,911	
	719-720	214,753	216,009	
	720-721	219,81	216,548	
	721-722	219,041	216,821	
	722-723	203,486	217,134	
	723-724	208,559	217,79	
	2	730-731	230,29	235,335
		731-732	236,533	235,633
732-733		243,479	238,753	
733-734		215,804	239,992	
734-735		259,916	200,645	
735-736		205,926	200,758	
736-737		209,508	201,437	
737-738		217,54	201,956	
3	738-739	181,969	201,118	
	739-740	208,861	201,714	
	742-743	212,752	213,814	
	743-744	206,241	212,015	
	744-745	202,452	211,778	
	745-746	259,86	212,102	
	746-747	224,344	213,315	
	747-748	189,384	214,225	
	748-749	217,92	215,238	
	749-750	233,708	216,286	
750-751	233,21	216,456		
751-752	229,142	216,399		
752-753	227,381	215,762		

CRAMER, M.; STALLMANN D.; HAALA N. **Direct georeferencing using GPS/Inertial exterior orientations for photogrammetric applications.** In: IAPRS XXXIII. Amisterdam, 2000.

FERRIS STATE UNIVERSITY, **Priciples of Airborne GPS.** Disponível em: http://www.pharmacy.ferris.edu/faculty/burtchr/sure440/notes/airborne\_GPS.pdf. Acesso: 30 abril 2009.

GLOBALSAT TECHNOLOGY CORPORATE. **ET332 GPS receiver engine board v2.0.** Tawan, 2005.

LIEVENS, K. **Single GPS antenna attitude determination of a fixed wing aircraft aided with aircraft aerodynamics**. Master Thesis - Delft University of Technology. 2004. Disponível em: [http://pdf.aiaa.org/preview/CDReadyMGNC05\\_1089/PV2005\\_6056.pdf](http://pdf.aiaa.org/preview/CDReadyMGNC05_1089/PV2005_6056.pdf). Acesso: 15 dezembro 2008.

MOSAICMILL, **EnsoMOSAIC for imaging and image processing**. 2010. Disponível em: [http://www.ensomosaic.com/products/hardware/system\\_specs.html](http://www.ensomosaic.com/products/hardware/system_specs.html). Acesso: 20 junho 2010.

RACELOGIC Ltd. 2004. **VBOX III 100Hz GPS Data Logger User Guide**. Disponível em: [http://www.m-techautomotive.co.uk/vbox/downloads/vb3\\_User\\_Guide.pdf](http://www.m-techautomotive.co.uk/vbox/downloads/vb3_User_Guide.pdf). Acesso: 24 junho 2009.

REDWEIK, P. **Fotogrametria Aérea**. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Lisboa, 2007. Disponível em: [http://snig.igeo.pt/snig-educ/ficheiros/PaulaRedweik/fotogrametria\\_aerea1.pdf](http://snig.igeo.pt/snig-educ/ficheiros/PaulaRedweik/fotogrametria_aerea1.pdf). Acesso: 5 março 2009.

SILVA, D. C. **FOTTER**. 1995.

SILVA, D. C. ; MELO, I. D. F. ; OLIVEIRA, R. N. Q. **Alta resolução com uso de câmaras digitais de baixo custo para mapeamento**. In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, 2005. INPE, p. 4561-4568, 2005.

THALES NAVIGATION. **A12, B12, AC12 Referece Manual**. USA, 2005.