

## Implementação de uma solução de mapeamento móvel integrando uma câmara de ação e GNSS de precisão

André PINHAL<sup>1</sup>, José A. GONÇALVES<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculdade de Ciências, Universidade do Porto

apinhal@fc.up.pt; jagoncal@fc.up.pt

**Palavras-chave:** Fotogrametria, Mapeamento Móvel, Georreferenciação Direta, Câmara de Ação

**Resumo:** A cartografia proveniente de Sistemas de Mapeamento Móvel (SMM) tem vindo a consolidar-se e já se encontram no mercado produtos e serviços que confirmam esta tendência. Na vertente fotogramétrica, graças às atuais competências da visão computacional, é possível criar, de uma forma muito automatizada, modelos tridimensionais detalhados da área capturada em imagem.

Neste artigo apresenta-se o desenvolvimento de um SMM, baseado numa única câmara de ação e num recetor GNSS de precisão, para aquisição de imagens a partir de uma viatura, com georreferenciação rigorosa. A solução desenvolvida é independente da câmara, desde que esta possua opção de vídeo. As posições dos centros de projeção das imagens são obtidas por pós-processamento cinemático, de onde se relacionam algumas *frames* de referência com o tempo GPS para a sincronização do vídeo. A precisão dos centros está muito dependente também da taxa de aquisição da câmara e da velocidade de deslocação da viatura durante a aquisição dos dados.

A orientação das imagens é obtida por ajuste de feixes (“bundle adjustment” na terminologia inglesa), sendo os ângulos de atitude da câmara os elementos com a maior liberdade. Para a robustez dos resultados procedeu-se a uma calibração prévia da orientação interna da câmara, com a finalidade de reduzir os graus de liberdade das variáveis e a correta e rápida convergência do ajuste. O sistema implementado é capaz de adquirir imagens para restituição fotogramétrica dentro de níveis de precisão decimétricos (*mapping grade*). A obtenção de coordenadas de objetos pode ser feita por várias formas, quer pela nuvem de pontos, quer pela interseção de feixes em sequências de imagens. Esta simples abordagem abre portas a futuros trabalhos, quer pela facilidade de utilização, quer pela qualidade da informação de base produzida.

## 1. Introdução

A atualização de informação geográfica em ambientes urbanos requer técnicas rápidas e expeditas. Os SMM, que incorporam diferentes sensores, como câmaras fotográficas, câmaras de vídeo ou sistemas de varrimento laser, são adequados para esse efeito. A maior parte dos que existem comercialmente são relativamente complexos, integrando sistemas de georreferenciação direta (GNSS e INS: *Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation Systems*), com custos elevados, pelo que a sua viabilidade só se consegue com trabalhos de muito grande dimensão. Alguns artigos têm sido publicados sobre SMM de baixo custo (Ellum and El-Sheimy, 2002; Artese, 2007; Madeira *et al.*, 2010), contudo todos envolvendo *hardware* de GNSS, INS e câmaras, relativamente sofisticado.

As câmaras de ação são equipamentos preparados para operar em ambientes exteriores, em condições adversas, que têm tido uma grande evolução, apresentando muito boa qualidade de imagem, e podendo incorporar dados de outros sensores. Dada a evolução que tem existido nos métodos de processamento fotogramétrico de câmaras não métricas, estas podem ser uma boa solução para um SMM. Não existem estudos significativos sobre o uso de câmaras de ação em aplicações de fotogrametria terrestre, ou então não no contexto de um SMM numa viatura (por exemplo Gonçalves *et al.*, 2016).

Os sistemas SMM existentes, com custos de algumas centenas de milhar de euros, alcançam precisões posicionais de alguns centímetros, sendo designados como “survey grade”. Contudo, muitas aplicações, como o preenchimento de bases de dados geográficas de infraestruturas rodoviárias, poderão satisfazer-se com o rigor de escalas cartográficas como 1:1000 e 1:2000, designado por “mapping grade”. O sistema apresentado, baseado numa câmara de ação, propõe-se a alcançar uma precisão na casa dos 30cm, sendo portanto do tipo “mapping grade”.

## 2. Implementação do Sistema

O sistema implementado baseia-se na instalação de uma câmara de ação no espelho retrovisor direito de um automóvel, Figura 1, apontando ligeiramente para o lado, de forma a garantir uma cobertura um pouco maior da berma da estrada. A georreferenciação vai exigir um sistema GNSS, que na abordagem mais simplista será o da própria câmara (GPS de navegação), mas que não garante precisões melhores do que alguns metros. No caso da Figura 1, juntamente com a câmara está montado um pequeno recetor GNSS.

A seguir descrevem-se as várias componentes do sistema e as metodologias usadas na sua implementação. É importante frisar que o sistema se torna bastante simples, porque entre a câmara e o recetor externo não existe qualquer ligação elétrica. A sincronização entre *frames* e posições será feita posteriormente, através de uma escala comum de tempo.



Figura 1 – Solução desenvolvida montada sobre um retrovisor

### 2.1 Câmara GoPro Hero 5 Black

A marca GoPro é uma referência no mercado das câmaras de ação. O modelo escolhido dispõe de um recetor GPS de código e de sensores inerciais, e tem uma boa qualidade de imagem mesmo em condições de grande contraste luminoso. Embora a câmara recolha imagens discretas numa taxa relativamente alta (3 imagens em cada 2 segundos), num movimento normal de

uma viatura, isso traduz-se num grande espaçamento entre fotos consecutivas, não permitindo um tratamento fotogramétrico adequado. Por essa razão optou-se pelo modo de vídeo.

### 2.1.1 – Características da câmara de vídeo

A câmara adquire vídeo em diferentes resoluções, com diferentes taxas de aquisição, expressas em *Frames Por Segundo* (FPS), e com diferentes níveis de processamento. No modo normal de vídeo, designado por “Wide”, a imagem cobre um campo muito grande e apresenta grande deformação radial, típica das câmaras de ação. Esta câmara em particular possui um modo alternativo designado por “Linear”, em que o essencial da distorção radial é corrigido, resultando numa imagem mais adequada para o processamento fotogramétrico. O Quadro 1 apresenta algumas das características dos modos de vídeo disponíveis, nomeadamente: a resolução das *frames* em pixels (colunas x linhas), a taxa máxima de aquisição em FPS e se a correção linear é efetuada.

**Quadro 1** – Características de alguns modos de aquisição de vídeo da câmara GoPro Hero 5

Resolução vídeo	Dimensão da <i>frame</i> (pixels)	Taxa máxima de aquisição (FPS)	Correção linear
4K	3840 x 2160	30	Não
2.7K	2704 x 1520	60	Sim
1080p	1920 x 1080	120	Sim

A retificação linear exige um elevado desempenho do processador, não sendo aplicável em todos os modos. Apesar de ser possível na resolução abaixo (2.7K), a dimensão da *frame* é ainda algo excessiva para as necessidades do sistema e produz grande volume de dados, razões pelas quais se optou pela resolução 1080p. Com esta resolução, a 10 metros da câmara, o pixel tem uma dimensão de cerca de 1cm. A partir do vídeo são extraídas *frames* individuais, que serão tratadas fotogrametricamente. A cadência de extração deve ser tal que se mantenha uma sobreposição adequada entre imagens consecutivas, isto é, que um objeto possa ser observado com boa definição em pelo menos 3 a 4 imagens.

A câmara possui um estabilizador digital da imagem, que usa uma sub-área do sensor que pode ser movida para compensar as vibrações, o que resulta numa constante alteração da posição do ponto principal. Este modo deve estar desativado quando se pretende fazer fotogrametria com as imagens.

A câmara regista dados de vários sensores, nomeadamente GPS (de navegação), a uma taxa de 18Hz, juntamente com dados de um acelerómetro a 200Hz e de um giroscópio, a 400Hz. À data da realização deste trabalho não tinha sido disponibilizada pela marca uma forma simples de aceder a esta informação, tendo sido possível usar apenas a posição. Não havia também uma informação rigorosa sobre a sincronização desta informação com o vídeo, pelo menos dentro dos *standards* de precisão posicional esperados para o sistema.

### 2.1.2 – Calibração dos parâmetros de orientação interna

Ao contrário do que acontece com as imagens discretas adquiridas pela câmara, que apresentam no cabeçalho informação sobre a resolução do sensor e a distância focal, esses elementos não são fornecidos para o vídeo, sendo por isso necessário determinar um valor para a distância focal. Para além disso, apesar de no modo linear haver uma remoção de distorções da lente, é de esperar que exista alguma distorção residual (radial e/ou tangencial), ou que o ponto principal apresente algum desvio em relação ao centro da imagem. Foi assim necessário proceder à calibração dos parâmetros de orientação interna.

Começou-se por estimar a distância focal, utilizando-se uma estadia de invar, com um comprimento calibrado de 2m. Estadia e câmara foram montadas sobre pilares da Base de Calibração do Observatório Astronómico da FCUP, cujas distâncias entre si são de 5m. Dispondo de uma imagem com a estadia aproximadamente ao centro e ortogonal ao eixo ótico da câmara, como se ilustra na Figura 2, a distância focal pode ser obtida através de uma relação de triângulos simples (Equação 1), envolvendo a distância estadia-câmara ( $D$ ), o comprimento da estadia ( $B$ ) e a sua dimensão na imagem ( $b$ ).

$$f = D \cdot b/B \quad (1)$$



Figura 2 – Câmara e estadia de invar montadas sobre os pilares

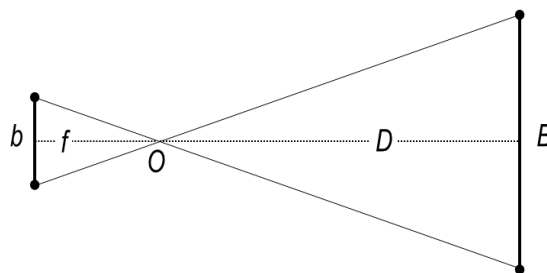


Figura 3 – Formação da imagem  $b$  da estadia  $B$ , por uma lente de distância focal  $f$  à distância  $D$  do centro de projeção  $O$

Para uma distância de 5m entre pilares, obteve-se  $b=418,4$  pixels, a que corresponde  $f=1046$  pixels. Este valor foi a média de 3 repetições, não tendo havido diferenças entre medidas superiores a 2 pixels.

Ao estimar  $f$  existe uma incerteza resultante da incerteza na distância  $D$  entre a estadia e a câmara, que foi medida até à face da lente. A incerteza resulta principalmente do desconhecimento da posição do Centro de Projeção, que se encontra a uma distância ( $\Delta D$ ) da face da lente. Admitindo que esse valor possa atingir 5mm, trata-se de um erro de 0.1% em  $D$ , que se traduzirá num erro semelhante em  $f$ , ou seja, algo da ordem de 1 pixel. Além disso, a medida de  $b$  poderia ser afetada pelas distorções da lente, contudo, como se verá abaixo, o erro introduzido na zona central da imagem, onde se observou a estadia, foi inferior a 1 pixel.

Os restantes parâmetros (radial, tangencial e de afinidade) foram obtidos através do PhotoScan da Agisoft, por auto-calibração, mantendo a distância focal fixa. Foram usadas imagens de uma parede vertical (12m x 6m) na qual são identificáveis marcas bem definidas, com uma distribuição regular (Figura 4), das quais foram consideradas 65 marcas como pontos de controlo, tendo sido estas levantadas recorrendo a uma estação total, com distanciômetro laser.



Figura 4 – Solução desenvolvida montada sobre um retrovisor

Utilizaram-se 23 imagens extraídas de um vídeo, nas quais foram identificados os 65 pontos. Feito o ajuste de feixes, com auto-calibração e distância focal fixa, obtiveram-se os coeficientes do polinómio que permite obter a distorção radial ( $k_1, k_2, k_3$ ), da tangencial ( $p_1, p_2$ ) e o coeficiente de afinidade ( $B_1$ ), que exprime a proporcionalidade entre os lados do pixel não quadrado, conforme o Quadro 2. Não foram considerados outros parâmetros (ponto principal, p.ex.), pois não se traduziam numa melhoria dos resíduos do ajuste.

Quadro 2 – Parâmetros de orientação interna obtidos

Componente	Coefficientes de distorção
Distorção radial	$K_1 = -0,02402$ $K_2 = 0,01391$ $K_3 = -0,003575$
Distorção tangencial	$P_1 = 0,001897$ $P_2 = -0,0008929$
Coefficiente de afinidade	$B_1 = 10,24$

Estes parâmetros estão na forma usada pelo programa, em que as coordenadas imagem se apresentam divididas pela distância focal. O formalismo matemático para a correção está publicado na documentação do programa (Agisoft, 2017). Na Figura 5 estão representados, a direção e a norma (na forma de isolinhas e em cores), dos vetores de distorção resultantes da aplicação dos coeficientes obtidos par o vídeo 1080p da câmara GoPro.

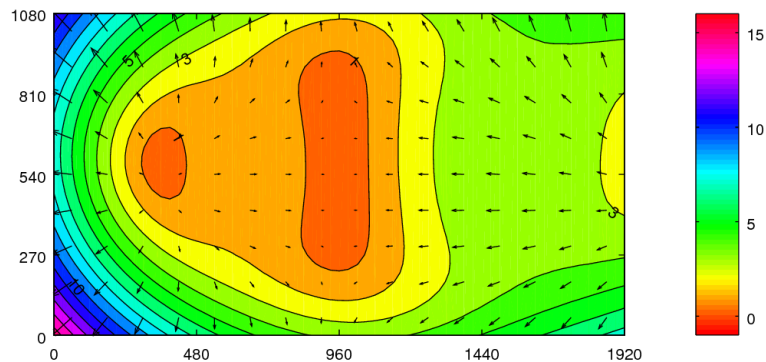


Figura 5 – Direção e norma dos vetores distorção correspondentes aos coeficientes determinados.

## 2.2. Integração da câmara com GPS/GNSS

O posicionamento e sincronização do sistema implementado foram obtidos por um recetor Emlid Reach, sendo no entanto utilizado também um recetor Trimble R6 para fins de validação e aumento de precisão. O Emlid Reach é um pequeno recetor de uma só frequência que em boas condições consegue precisões de 3 cm, em modo *Real Time Kinematic* (RTK).

### 2.2.1 – Transporte de coordenadas e rumo da câmara

Com o sistema implementado montado no retrovisor direito do veículo, Figura 1, procedeu-se ao levantamento com estação total dos pontos de referência do conjunto. Um carro é um veículo de estrutura simétrica no qual se pode definir um referencial (*body frame*). Começou-se por materializar o eixo longitudinal da viatura, onde se instalou o Trimble R6 junto do painel frontal, e de seguida determinou-se a posição da câmara e do rumo desta relativamente ao eixo longitudinal da viatura. O rumo foi estimado a partir de alguns pontos obtidos ao longo da visão horizontal da câmara (Figura 6).

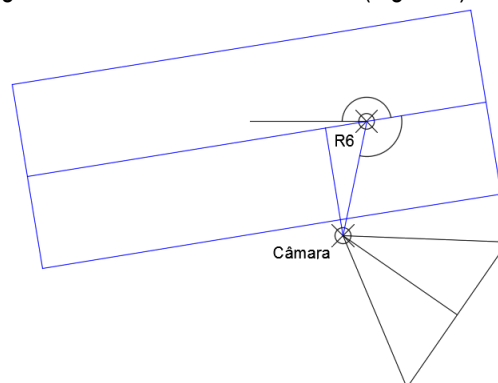


Figura 6 – Análise do transporte de coordenadas entre o Trimble R6 e a câmara e o respetivo rumo da câmara

### 2.2.2 – Sincronização e taxa de aquisição de vídeo

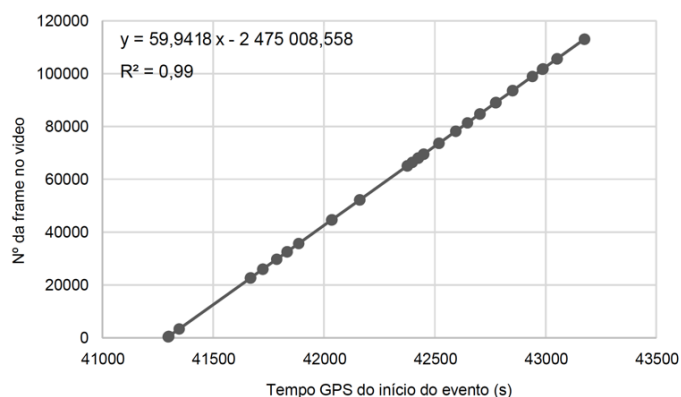
O Emlid Reach é o recetor responsável pela sincronização de tempo e é o elo de ligação entre a câmara e o recetor Trimble R6 através do tempo GPS. Com um *flash* luminoso, Figura 7, é possível obter para uma *frame* do vídeo o respetivo tempo GPS com uma precisão superior a um milissegundo (u-blox M8, 2016). Quanto maior for a taxa de aquisição do vídeo, maior será a precisão da sincronização do vídeo com o tempo GPS.



**Figura 7** – Utilização da lanterna LED para registar um evento de sincronização no vídeo

Para o trabalho desenvolvido utilizou-se a câmara a 60 FPS (59,940 FPS = 60.000/1.001), tendo-se no entanto constatado que a câmara regista efetivamente o vídeo a uma taxa ligeiramente diferente. Esta diferença é importante se a taxa de aquisição do vídeo for usada para o cálculo do tempo das *frames*, o que, por exemplo, significa uma diferença de cerca uma *frame* a cada 8 minutos. Num caso prático, admitindo um veículo a uma velocidade de 10m/s a 60FPS, tem-se um erro sistemático de cerca de 17cm a cada 8 minutos, o que ao fim de 50 minutos de vídeo se traduz num erro de 1m no posicionamento da câmara.

Para confirmação, efetivamente, da taxa de aquisição da GoPro num vídeo com a resolução 1080p a uma taxa de aquisição de 60FPS, procedeu-se a uma experiência onde foram registados cerca de 60 eventos de sincronização ao longo de 50 minutos de vídeo, com mais de 113.000 *frames*. A partir destes dados foi possível produzir o gráfico apresentado na Figura 8, que representa o número da *frame* em função do tempo GPS. Por regressão linear obteve-se uma taxa de *frames* por segundo de 59,942. De salientar o elevado valor de correlação entre todos os eventos de sincronização, o que também significa que a câmara tem um comportamento consistente.



**Figura 8** – Relação linear do tempo GPS com o número da *frame*

### 2.3 Determinação dos parâmetros de orientação externa da câmara

Os parâmetros de orientação externa da câmara são dados pela posição e pela orientação de cada imagem adquirida, totalizando 6 parâmetros, três de posição, obtidos por interpolação: M, P, Cota, e três de atitude:  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\kappa$ .

Com a relação linear obtida na secção 2.2.2 torna-se possível calcular o tempo GPS da *frame*. Através de uma interpolação sobre os dados da trajetória, dada pelo recetor GNSS, é assim possível calcular a posição rigorosa da *frame*. A interpolação poderá ser linear ou cúbica parcelar, dependendo da densidade de pontos da trajetória. No caso do recetor Trimble R6 usado, à cadência de 1Hz, e especialmente nas partes curvas da trajetória, teve de se usar interpolação cúbica.

Para os ângulos de atitude assumiu-se  $\omega$  e  $\phi$  iguais a zero e  $\kappa$  igual ao rumo da câmara, obtido a partir da trajetória.

Seguindo a lógica de redução das incógnitas para a solução de ajuste de feixes, pretende-se, com os procedimentos de seguida descritos, fixar as posições dos centros de projeção. Com isto deseja-se perceber se a solução de georreferenciação direta está dentro do *mapping grade*, uma vez que não são usados nenhuns pontos de controlo. Com estes procedimentos deixamos apenas total liberdade para a estimação dos ângulos de atitude da câmara.

## 3. Teste de validação

Os dados para validação foram obtidos usando duas abordagens distintas no tratamento dos dados, uma mais simples a 2 dimensões com os rumos calculados através de posições consecutivas da viatura e outra, a 3 dimensões usando uma nuvem de pontos com o software PhotoScan da Agisoft.

### 3.1 Verificação dos rumos calculados

A partir do rumo relativo à viatura, estimado com a estação total, (ver Figura 6), procedeu-se ao cálculo do rumo do eixo da câmara para cada centro de projeção (Figura 9). Começou-se por verificar o desvio horizontal em pixéis relativo ao centro das imagens, de objetos como esquinas de muros, sinais de trânsito verticais e postes de iluminação (Figura 10).



Figura 9 – Rumo da *frame* 29085, a vermelho

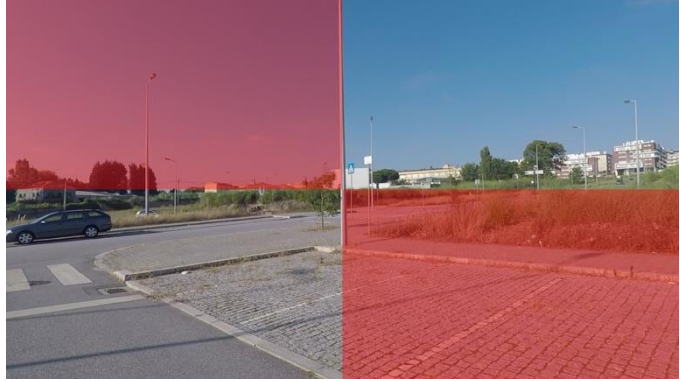


Figura 10 – Verificação do desvio horizontal na *frame* 29085

Para os 27 objetos verificados estimou-se um erro médio quadrático de 35 pixéis de desvio horizontal, o que, na resolução de 1080p para objetos a 10m da câmara, significa um erro de aproximadamente 33cm.

### 3.2 Orientação automática das imagens

No PhotoScan processou-se um conjunto de imagens consecutivas com os respetivos parâmetros de orientação interna e externa fixados, à exceção dos parâmetros relativos à atitude das imagens. Por meio de ajuste de feixes obtiveram-se os parâmetros de orientação absoluta para cada imagem, que permite usar estas imagens em qualquer software de fotogrametria.

Com estes parâmetros calcularam-se as coordenadas de alguns pontos de controlo, por um processo manual, e estimaram-se os erros, que em planimetria são da ordem dos 10cm e em altimetria da ordem dos 20cm.

Na Figura 11 pode observar-se a nuvem de pontos densa da zona processada e na Figura 12 uma *frame* que fez parte do processamento. São claramente reconhecíveis na nuvem de pontos os objetos extraídos tridimensionalmente, igualmente visíveis, bidimensionalmente na imagem da figura 12.



Figura 11 – Nuvem de pontos



Figura 12 – *Frame* número 23590

Desta forma foi possível obter os parâmetros de atitude da câmara, o que irá seguramente permitir melhorar o desempenho do sistema. Na abordagem bidimensional, assume-se que não existem inclinações da câmara, baseando-se o posicionamento apenas no cálculo do rumo do eixo da câmara e na intersecção de feixes para um mesmo objeto em diferentes *frames*. Na realidade é fácil depararmo-nos com situações em que devido ao facto de a inclinação longitudinal ou lateral da via não ser contemplada, é introduzida uma fonte de erro. Por exemplo, uma inclinação da via de 5%, muito comum, mesmo em áreas relativamente planas, traduz-se num ângulo de quase 3° nos ângulos de atitude da câmara. Ao não ser considerado na abordagem bidimensional, é necessariamente introduzido um erro posicional, daí que a abordagem da orientação automática das imagens melhorará a precisão posicional.

Adicionalmente, esta abordagem tem potencial para resolver um problema, que não ocorreu no caso dos testes efetuados, que se localizaram numa área sem obstáculos significativos para o posicionamento RTK. Num ambiente urbano denso haverá situações em que não se consegue manter a continuidade do sinal GNSS, não sendo possível um posicionamento rigoroso. A estratégia de orientação relativa automática de blocos de imagens, em que umas têm posição conhecida mas outras não, permitirá complementar as posições em falta.

#### 4. Conclusões

A solução SMM implementada caracteriza-se pela simplicidade e baixo custo de implementação e, ao contrário da maioria dos sistemas disponíveis, o posicionamento tira partido da orientação obtida por algoritmos de SfM, ao invés de se recorrer às soluções normais com sensores inerciais. A adição de um INS, embora não indispensável, trará maior robustez em ambientes de deficiente cobertura GNSS, sendo, portanto, um ponto chave quando se pretende passar do *mapping* para o *survey grade*.

Há ainda há muito espaço para melhoramentos do sistema implementado, por exemplo, a deteção automática dos flashes no vídeo, a identificação de outliers, a exportação das frames em função da distância, tudo de forma automática ou automaticamente assistida.

A nível de operacionalização, o SMM desenvolvido não necessita de grandes conhecimentos especializados, uma vez que assenta numa simples câmara de ação e num recetor GNSS operado por uma interface *web*.

O sistema implementado abre portas a novos tópicos de de investigação, mas também ao investimento num produto operacional.

#### Referências Bibliográficas

- Agisoft (2017). Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.3. [http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro\\_1\\_3\\_en.pdf](http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_3_en.pdf)
- Artese, G. (2007). OrthoRoad: A low cost mobile mapping system for road mapping, C.V. Tao and J. Li, Advances in Mobile Mapping Technology - ISPRS Book Series Vol. 4 (2007), pp. 31-41.
- Ellum, C., El-Sheimy, Naser (2002). Land-based mobile mapping systems, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 68(1) (2002), pp.13-17.
- Gonçalves, J.A., Moutinho, O., Rodrigues, A., 2016. Pole Photogrammetry with an Action Camera for Fast and Accurate Surface Mapping. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B1, 2016. XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic.
- Madeira, S. (2007). Sistema Móvel de Levantamento com Integração em SIG, Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (2007), Portugal.
- U-blox (2016). NEO/LEA-M8T - u-blox M8 concurrent GNSS timing modules - Data Sheet. [https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-LEA-M8T-FW3\\_DataSheet\\_\(UBX-15025193\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-LEA-M8T-FW3_DataSheet_(UBX-15025193).pdf)