

## Sistema VANT para Reconstrução Tridimensional na Indústria

Judá T. Santos\* Marcus D. N. Forte\*  
 Nadson R. T. de Sousa\* Italo C. Branco\*\*  
 Fabricio G. Nogueira\* Bismark C. Torrico\*

\* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Av. Mister Hull - Pici - 60455-760 (e-mails: juda-santos@alu.ufc.br; davi2812@dee.ufc.br; nadsonrenan@gmail.com; fnogueira@dee.ufc.br; bismark@dee.ufc.br

\*\* EDP Brasil - PPTM  
 São Gonçalo do Amarante, Ceará, Brasil (e-mail: italo.alves@edpenergiapecem.com.br)

**Abstract:** This article presents the development of a high-precision three-dimensional aerial mapping system. The purpose of the developed system is the reconstruction of large areas and objects through a point cloud, with applicability in the industrial sector. The system uses an efficient RTK positioning system (Real-Time Kinematic), a LiDAR sensor (Light Detection And Ranging) to scan the area and a microcomputer responsible for the point cloud processing and reconstruction. The equipment is embedded in a quadcopter capable of carrying loads of up to 10 kg. At the end of the work, an experimental result is presented with the mapping and identification of objects.

**Resumo:** Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema aéreo de mapeamento tridimensional de alta precisão. A finalidade do sistema desenvolvido é a reconstrução de grandes áreas e objetos através de nuvem de pontos, com aplicabilidade no setor industrial. O sistema utiliza de um eficiente sistema de posicionamento RTK (*Real-Time Kinematic*), um sensor LiDAR (*Light Detection And Ranging*) para leitura da área e um microcomputador capaz de processar esses dados e construir a nuvem de pontos. Todos esses equipamentos são embarcados em um quadricóptero com capacidade de levar cargas de até 10 Kg. Ao final do trabalho é apresentado um resultado experimental com o mapeamento e identificação de objetos.

**Keywords:** UAV; LiDAR; RTK; 3D Mapping; Sensing;

**Palavras-chaves:** VANT; LiDAR; RTK; Mapeamento Tridimensional; Sensoriamento Remoto;

### 1. INTRODUÇÃO

O processo de mapeamento e reconstrução de modelos tridimensionais de objetos e áreas é assunto de interesse de diversos âmbitos de aplicações. Garantir uma projeção precisa de estruturas ou áreas torna-se um desafio e objeto de estudos em pesquisas relacionadas a topografia e sensoriamento 3D (Vacca et al., 2018). Um conhecido sistema de mapeamento 3D é a fotogrametria. Para destacar algumas aplicações, citam-se: o mapeamento de regiões florestais (Liang et al., 2016), arquitetura (Yang et al., 2017), estudos geográficos (Bonneau and Hutchinson, 2019), e aplicações industriais (Granshaw et al., 2017).

Embora amplamente utilizada, a tecnologia de fotogrametria possui algumas desvantagens. Dentre elas, destaca-

se a alta demanda computacional para o processamento das imagens adquiridas, ocasionando longos tempos de processamento (Tucci et al., 2019). Ultimamente, objetivando melhorar esse sistema de processamento a partir da aquisição de dados, sensores LiDAR (do inglês *Light Detection And Ranging*) são escolhidos para adquirir nuvens de pontos tridimensionais das superfícies (Sofonia et al., 2019; Cui et al., 2019). Tais sensores normalmente oferecem uma precisão centimétrica e a captura de dados pode ser realizada tanto de forma terrestre (Amann et al., 2001) quanto utilizando sistemas aéreos. Os sistemas aéreos apresentam a vantagem de poder cobrir grandes áreas que nem sempre são facilmente acessíveis para sistemas terrestres (Jaud et al., 2019).

Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), conhecidos em inglês como UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), têm sido utilizados em diversas áreas de pesquisa, como por exemplo estudos de estruturas, (Guerreiro et al., 2017), alguns usos para a engenharia civil, (Liu et al., 2014), mapeamento 3D (Neitzel and Klonowski, 2011), e sensoriamento remoto (Wang et al., 2020). Alguns estudos mostram que a ampla utilização deste sistema aéreo é devido ao seu baixo

\* À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap), pelo apoio durante o projeto. À EDP Energia Pecém e ao programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica da ANEEL por todo apoio recebido durante a elaboração e execução do projeto PD-07267-0016/2018.

custo (Li et al., 2019), portabilidade e implementação rápida (Messinger and Silman, 2016).

Alguns trabalhos apresentam a integração de sensores LiDAR em VANTs, com a finalidade de construir nuvens de pontos 3D que modelem as superfícies das cenas, ou dos ambientes, sobrevoados. Por exemplo, em (Wallace et al., 2012) um sistema utilizando um multi-rotor com um LiDAR de baixo custo foi desenvolvido para o gerenciamento de informações florestais, apresentando um algoritmo de fusão sensorial que combina o posicionamento via GPS com uma Unidade de Medição Inercial (IMU, do inglês *Inertial Measuring Units*). Esta combinação de GPS com IMU se dá devido a necessidade da correta estimação da posição e orientação da aeronave. Com o devido georreferenciamento do drone é possível reconstruir uma nuvem de pontos de maneira confiável, (Chiang et al., 2017). Além disso, erros de medição e flutuações de atitude afetam a precisão dos pontos de laser e o impacto desses problemas são discutidos em (Wang et al., 2011) e (Wang et al., 2018). Uma maneira de melhorar a aquisição da posição é a utilização de sistemas RTK (do inglês *Real-Time Kinematic*). Estes sistemas permitem uma correção em tempo real da leitura dos satélites GPS, oferecendo estimativas precisas na escala de centímetros (Langley, 1998).

Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma plataforma aérea automatizada capaz de reconstruir modelos tridimensionais precisos utilizando ferramentas *open-source*, que pode ser amplamente utilizado na indústria. A plataforma consiste em um quadricóptero industrial equipado com um sensor LiDAR e um computador de bordo para fazer o mapeamento 3D. Visando garantir a precisão no posicionamento da aeronave, juntamente de um melhor resultado da reconstrução da nuvem de pontos, uma comparação da estimação de localização de dois métodos de georreferenciamento foi realizada. Em seguida, uma nuvem de pontos com a tecnologia RTK foi coletada. Todos os dados obtidos são tratados através do computador de bordo contendo ROS (*Robot Operating System*), um *framework* de robótica no qual os algoritmos de comunicação e processamento de nuvem de pontos foram desenvolvidos.

O texto é dividido nas seguintes seções. Seção 2 apresenta a instrumentação utilizada nos testes. A metodologia implementada nos ensaios é apresentada na Seção 3. Onde os resultados são apresentados na Seção 4. E a conclusão dos resultados obtidos é apresentada na Seção 5.

## 2. INSTRUMENTAÇÃO E SENSORES

Os equipamentos utilizados na construção do sistema de mapeamento 3D aéreo são apresentados nas subseções a seguir.

### 2.1 Drone Wind 4

Wind 4 é um quadricóptero industrial com fator de proteção IP43, contra chuva, poeira, partículas e fortes ventos. O VANT é capaz de suportar até 10 Kg de carga útil (*Payload*), suficiente para levantar todos os equipamentos e sensores utilizados no sistema desenvolvido. Dentre suas características funcionais, a mais importante é a presença do controlador de voo DJI A3 o qual permite a parametrização de ajustes de controle da aeronave.

O controlador DJI A3 também oferece a ferramenta de desenvolvimento OSDK (*Onboard Software Development Kit*), que permite a configuração de parâmetros de voo, além da implementação e desenvolvimento de missões próprias, e compatibilidade com o DJI D-RTK, explicado posteriormente. Assim, este controlador de voo permite a implementação de aplicações de voo personalizadas para a indústria.

### 2.2 Sistema D-RTK: Ground e Air Station

O sistema D-RTK consiste de um módulo de hardware adicional que permite a estimação de posição do quadricóptero durante o voo com precisão centimétrica. A integração consiste em desenvolvimento de software embarcado e também conexões físicas de hardware entre um módulo D-RTK e o controlador de voo DJI A3 presente no Wind 4, além de uma estação D-RTK em solo.

A tecnologia RTK é capaz de fornecer estimativas de localização com precisão até 5 cm devido mediante uso de uma estação base (do Inglês, *Ground Station*). Trata-se de uma estação fixa em solo a qual se comunica simultaneamente com os satélites disponíveis e com o quadricóptero. Através dos princípios de *Time of Flight* e sincronia de tempos e fases dos sinais de GPS, o conjunto RTK calcula pequenas diferenças de posicionamento entre a *Ground Station* e a *Air Station* acoplado ao Wind 4, oferecendo assim a prometida precisão. O conjunto do *Ground Station* é composto por um módulo D-RTK com antena, um módulo de comunicação Datalink 900 *ground* com antena, uma bateria TB50 e suportes mecânicos.

A *Air Station* é composta por um módulo D-RTK com antenas e um módulo de comunicação Datalink 900 *air*. A comunicação entre o módulo D-RTK e o controlador DJI A3 integrado ao Wind 4 é realizada através da rede *CANBUS* interna. O conjunto de antenas do *air system* pode ser visto na Figura 1.

### 2.3 LiDAR

O sensor LiDAR é um equipamento que através da emissão e recepção de feixes de luz é capaz de medir distâncias. O LiDAR 2D utilizado realiza uma varredura em um eixo cartesiano, coletando pontos em sequência, sendo estes pontos salvos em forma de vetores. Em seguida uma leitura subsequente é feita para capturar uma seção vizinha. Por fim, esses vários vetores salvos são agrupados formando uma nuvem de pontos tridimensional.

O LiDAR utilizado para este sistema é do modelo SICK LD-MRS420201 que capta pontos distantes em até 150 metros, possuindo também frequência de aquisição configurável entre  $12.5Hz$  e  $50Hz$ . O sensor dispõe de um ângulo de abertura de até  $110^\circ$ , ideal para varredura de grandes áreas. A nuvem de pontos obtida pelo LiDAR é enviadas para o computador embarcado, *Manifold*.

### 2.4 Manifold

Com o propósito de processar os dados recebidos pelos sensores, um computador embarcado foi utilizado. Possuindo um processador *NVIDIA Jetson TX2* contendo *engine* para processamento em paralelo de imagens e nuvem de

pontos, 8 Gb de memória RAM, 128 GB de memória de disco SSD e 32 GB de memória EMMC para o sistema operacional. O processador NVIDIA contém 2 núcleos físicos, cada um comportando 3 *cores* virtuais de até 2000 Mhz de *clock*. A Manifold V2 possui também saída para antenas Wi-Fi, saídas para comunicação com o VANT, entrada para Ethernet e até 5 entradas USB. O sistema operacional base presente no Manifold V2 é o Ubuntu 16. Sendo assim, ele é o *host* do *framework* de robótica, ROS, que é utilizado na construção da nuvem de pontos utilizando códigos e nós específicos para tal tarefa.

Por fim, os equipamentos apresentados anteriormente, sensor LiDAR, microcomputador Manifold e *Air Station* do RTK são acoplados no drone industrial Wind 4. Tem-se então o sistema de aquisição completo apresentado na Figura 1.

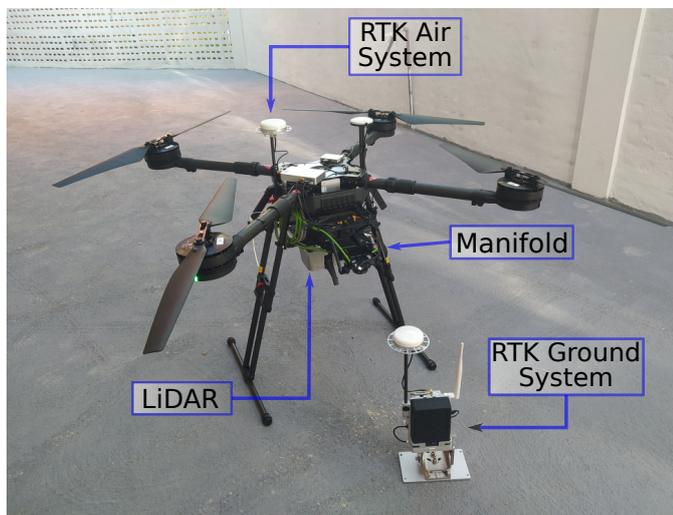


Figura 1. Sistema aéreo completo.

### 3. METODOLOGIA E IMPLEMENTAÇÃO

O processo de utilização do equipamento é feito em etapas. A primeira etapa é a configuração dos parâmetros de voo por um operador. O segundo processo consiste na aquisição das nuvens de pontos da superfície sobrevoada através de um voo autônomo. E a terceira e última etapa é a análise dos pontos adquiridos. Esses processos são detalhados nas subseções seguintes.

#### 3.1 Parâmetros de voo

O processo de utilização do sistema de mapeamento tridimensional inicia-se pela escolha do plano de voo, ou seja, a trajetória a ser percorrida pelo VANT, e definição dos parâmetros de voo. São eles: altura de voo, velocidade de curso e frequência de amostragem do sensor. Esses parâmetros são definidos pelo operador em campo através do aplicativo desenvolvido para dispositivos móveis *Android*, como um *tablet*, juntamente com o controle remoto do drone.

Através do *Mobile Software Development Kit* (MSDK) da DJI, o aplicativo foi desenvolvido para ser conectado com o controle do drone e fazer comunicação via telemetria

com a aeronave que contenha OSDK. O sistema mobile é apresentado na Figura 2.

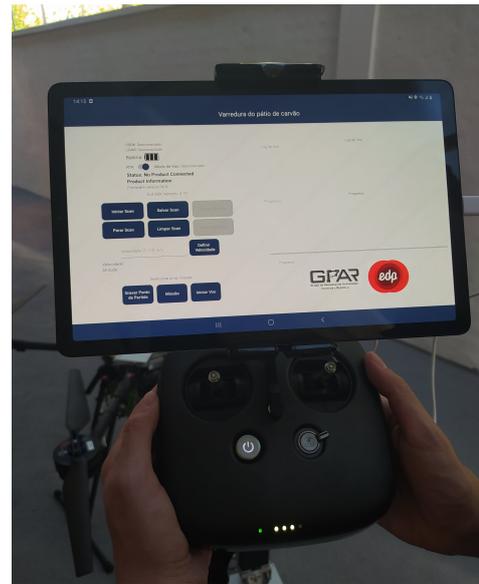


Figura 2. Sistema mobile.

Com este aplicativo é possível ter acesso a informações diretas dos sensores do Wind 4. Por exemplo, é possível a leitura da bateria, altitude, velocidade atual, além de um *log* de voo com informações referentes a aquisição dos pontos pelo LiDAR. Utilizando este aplicativo o operador define a trajetória que o VANT percorrerá através de um sistema de “*waypoints*”, que são pontos de localização georreferenciados. O operador também consegue liberar o início da missão autônoma de coleta de dados feita pelo VANT através de um botão do aplicativo.

#### 3.2 Aquisição de pontos

Após o operador liberar o início da missão o quadricóptero inicia a operação. Em seguida, o VANT decola e atinge a altitude definida pela missão. Posteriormente, o VANT se dirige ao primeiro *waypoint* e inicia a aquisição dos pontos através do LiDAR. A partir desta etapa o drone passa a seguir o caminho pré-definido de operação fazendo a leitura e iniciando o processo de mapeamento. Uma vez que o quadricóptero alcança o último *waypoint*, as amostragens do sensor LiDAR são suspensas e o VANT retorna ao ponto de decolagem (do Inglês, *Home Point*).

Uma vantagem do sistema desenvolvido é a mobilidade do quadricóptero e capacidade de percorrer longas distâncias rapidamente. Além de usufruir da aquisição de pontos pelo sensor LiDAR, o ângulo de abertura deste permite fazer um mapeamento amplo da região. Todos os pontos lidos pelo sensor são enviados para o microcomputador *Manifold*. Nele ocorre o cômputo da transformação da nuvem do quadro referentes ao quadro LiDAR para o quadro do mapa a partir de uma rotação e uma translação de quadros.

- Transformação de quadros

Esta transformação dos pontos do LiDAR é feita através da matemática de transformações homogêneas, por meio

da qual se expressa a relação de posicionamento e orientação entre quadros de referência. Assim, três quadros de referência para o sistema são definidos: o quadro *map*, cuja origem está localizada no ponto de decolagem do VANT, o quadro *UAV* e o quadro *LiDAR*, conforme ilustrado na Figura 3. Os quadros são doravante denotados por subscripto *M*, *U* e *L*, respectivamente.

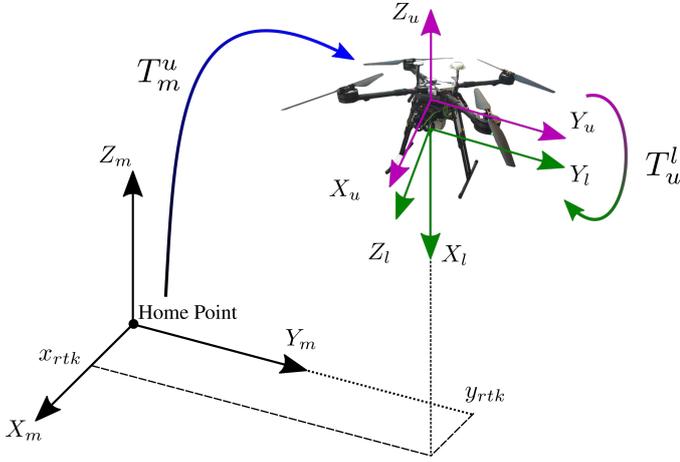


Figura 3. Quadros de referência.

Com isso, para geração da nuvem de pontos, os pontos lidos pelo LiDAR que estão localizados no quadro *L*, cuja origem está no centro do sensor, devem ser transformados para o quadro do mapa *M*, que é o quadro inercial georreferenciado. A relação entre quadros pode ser definida por uma matriz de transformação, na qual está embutida a translação e rotação entre os quadros. Tal matriz é escrita conforme a Eq. (1).

$$T_b^a = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ 0_{1 \times 3} & 1_{1 \times 1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

onde  $R_{3 \times 3}$  é uma matriz de rotação e  $T_{3 \times 1}$  é referente a translação entre quadros. Através da concatenação, ou multiplicação, entre matrizes de transformação, é possível compor a transformação completa entre o quadro *L*, até o quadro *M*, denotada pela Eq. (2).

$$T_M^L = T_U^M T_L^U \quad (2)$$

- ROS

O sistema embarcado é responsável pela leitura e transformação dos pontos lidos pelo LiDAR, além de processar todas as informações de posição e orientação do quadricóptero. O sistema de software desenvolvido em ROS utilizado pela *Manifold* é composto e organizado em “nós” e “tópicos”. O “nó” é dado como o processo que executa uma função, enquanto o “tópico” é o responsável por carregar os dados entre dois “nós”. A Figura 4 apresenta o sistema desenvolvido, onde os “nós” são representados por retângulos e “tópicos” por elipses.

Os “nós” e “tópicos” considerados mais importantes são descritos mais detalhadamente a seguir.

- */dji\_sdk/attitude* fornece a estimativa de posição a partir da fusão de dados inerciais;
- */dji\_sdk/gps\_position* fornece a posição global e estimativa de altitude;

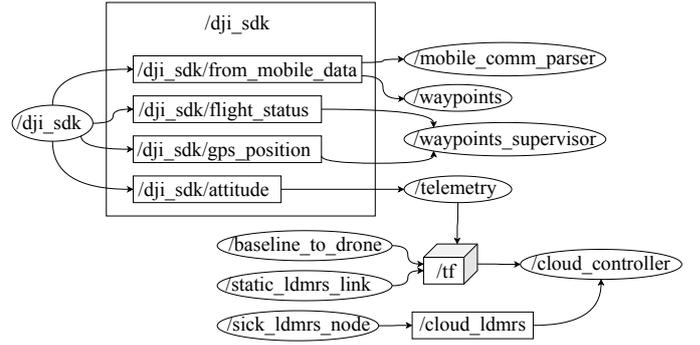


Figura 4. Sistema ROS desenvolvido.

- */telemetry* combina os dados de */dji\_sdk/attitude* e */dji\_sdk/gps\_position* em matrizes de transformação;
- */sick\_ldmrs\_node* fornece os dados do LiDAR na forma de nuvem de pontos em relação ao frame do sensor. Essa nuvem de pontos é publicada como o tópico */cloud\_ldmrs*;
- */cloud\_controller* basicamente combina todas as transformações para construir uma nuvem de pontos resultante da superfície mapeada;
- */waypoint\_supervisor* calcula o progresso da missão e inicia automaticamente a aquisição dos captados pelo LiDAR no primeiro ponto definido no plano de voo. E só para a aquisição após chegar no último ponto definido pelo operador, concluindo a missão e salvando os dados;

### 3.3 Análise da nuvem de pontos

A última etapa do processo de aquisição consiste na análise dos dados recebidos após o voo. Os dados podem ser transferidos da *Manifold* para uma outra máquina, ou podem ser analisados pelo próprio microcomputador caso seja conectado um *display* HDMI.

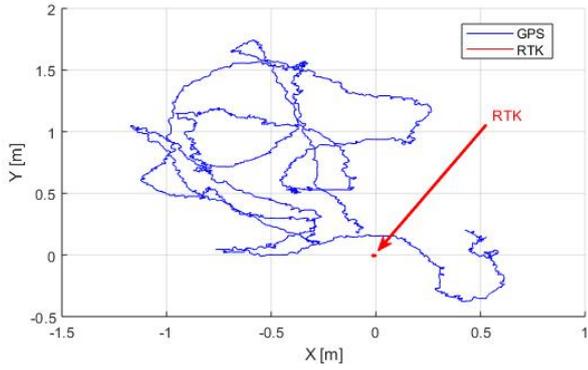
## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os experimentos foram realizados nas dependências do Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará e alguns resultados de mapeamento foram obtidos.

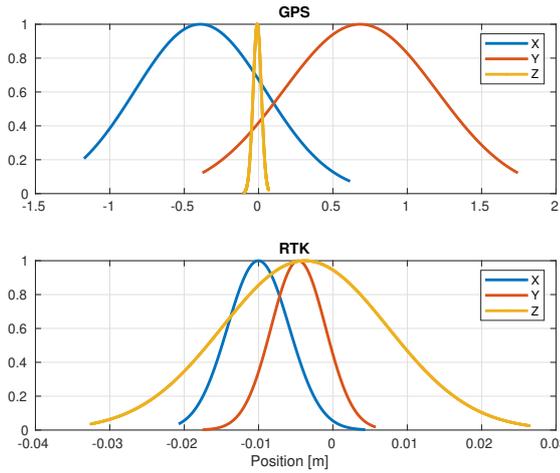
Primeiramente foram realizados experimentos com o VANT em solo para avaliar os níveis de erro de medição e estimação de localização do sistema. Para isso foi mantida a aeronave em uma posição fixa por um período de 15 minutos enquanto os algoritmos de medição e estimação da localização registravam as posições. Os dados do ‘RTK’ e ‘GPS’ foram coletados simultaneamente durante todo o período. Os resultados são observados na Figura 5.

Na Figura 5a é possível constatar a diferença na precisão entre as estimativas dos algoritmos que processam os sinais de GPS e RTK. Os dados obtidos pelo ‘RTK’ estão em vermelho, e os dados do ‘GPS’ em azul. Percebe-se que o ‘RTK’ possui variação muito pequena na sua posição em torno da origem, próxima da precisão do sensor que é de 0,05 m. Considerando a condição de posição fixa do VANT, a posição (0,0) pode ser referência para cálculo do erros de medição.

A variância e a média das posições dos sinais do ‘RTK’ e do ‘GPS’ foram calculadas e são apresentadas na Tabela



(a) Variação de posição durante leitura.



(b) Distribuição gaussiana.

Figura 5. Diferenças de leitura entre RTK e GPS

1. Com esta Tabela é possível observar a diferença entre as estimações de posição  $x$ ,  $y$  e  $z$  dos dois métodos e averiguar a precisão dos dados referentes ao 'RTK'. A Figura 5b apresenta a distribuição gaussiana das estimações de posição dos dois métodos, assumindo que o ruído é gaussiano de média em torno da origem.

		x (m)	y (m)	z (m)
GPS	Variância	$1,73 \cdot 10^{-5}$	$1,34 \cdot 10^{-5}$	$12,4 \cdot 10^{-5}$
	Média	-0,3919	0,6828	-0,0085
RTK	Variância	0,19	0,27	$77 \cdot 10^{-5}$
	Média	-0,01	-0,0046	-0,0038

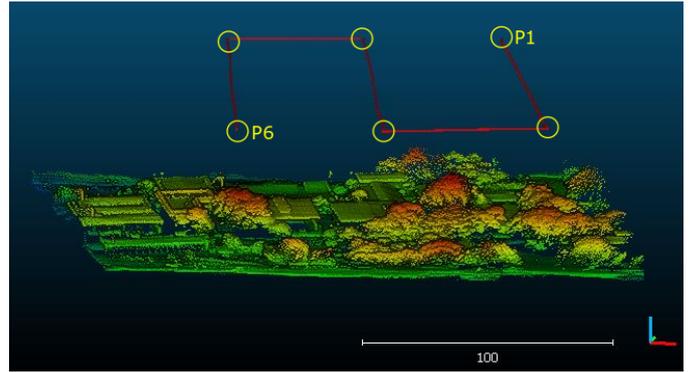
Tabela 1. Variância e média das coordenadas cartesianas

Após os resultados satisfatórios com os testes de leitura de posição do VANT foi feito um teste de mapeamento. O teste experimental visou realizar a reconstrução via nuvem de pontos. A Figura 6 ilustra o resultado da geração de nuvem de pontos com o VANT Wind 4 utilizando o módulo de localização RTK durante o voo de aquisição.

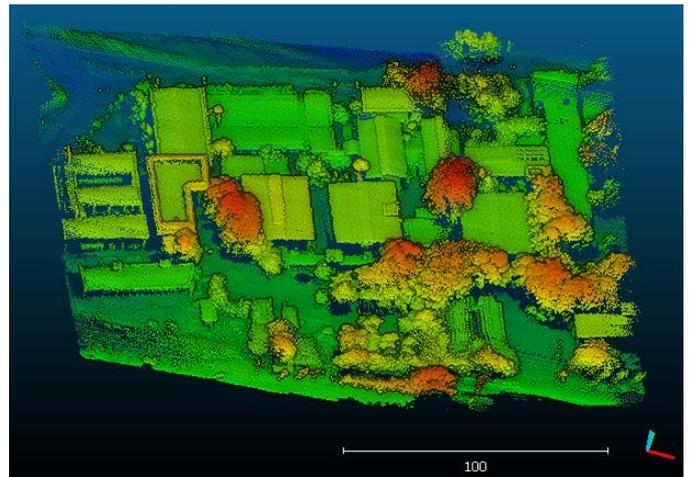
O objetivo do experimento foi reproduzir uma nuvem de pontos fidedigna à imagem presente na Figura 6a. Nela é possível observar os blocos didáticos e as vegetações presentes no Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará. A trajetória definida para este teste é apresentada na Figura 6b. A rota é marcada em vermelho e os seis círculos amarelos indicam os *waypoints* definidos para esta missão. A rota segue em formato semelhante a um "S",



(a) Imagem do Google Maps.



(b) Caminho percorrido pelo VANT.



(c) Nuvem de pontos 3D resultante.

Figura 6. Comparativo entre espaço e nuvem 3D.

mantendo a altitude constante e seguindo em linha reta entre cada ponto. A aquisição do sensor LiDAR inicia no ponto "P1" e encerra em "P6".

Após a aquisição dos pontos e retorno do VANT para o local de decolagem, a nuvem de pontos resultante foi analisada. O resultado pode ser visto na Figura 6c. Por ela é possível observar com detalhes as estruturas como telhados, terraços e árvores. Nas nuvens de pontos foi possível observar os diferentes níveis de altitude através de um filtro de cor aplicado no eixo  $z$ .

## 5. CONCLUSÃO

Em suma, foi possível concluir este trabalho com um resultado satisfatório no desenvolvimento de um sistema aéreo de aquisição automático e montagem de nuvens

de pontos 3D de alta precisão. Tendo sido garantido através de testes a precisão e eficiência do sistema de posicionamento RTK.

Além disso, uma vez que o sistema de localização garante uma precisão de 5 cm, acredita-se que a nuvem de pontos resultante dispensa o uso de algoritmos de alinhamento e registro de nuvem de pontos. Dessa forma, é possível utilizar a nuvem resultante diretamente na aplicação que exige tal tipo de dado.

O sistema apresentado utilizou das vantagens de mobilidade e robustez de um quadricóptero, juntamente da precisão na varredura da área feita pelo sensor LiDAR e da alta precisão do georreferenciamento. Resultando em uma nuvem de pontos fiel ao local mapeado. O que mostra que o sistema apresenta grande capacidade e eficácia para aplicações industriais de mapeamento tridimensional.

#### AGRADECIMENTOS

Ao Grupo de Pesquisa em Automação, Controle e Robótica (GPARG) do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará.

#### REFERÊNCIAS

- Amann, M.C., Bosch, T.M., Lescure, M., Myllylae, R.A., and Rioux, M. (2001). Laser ranging: a critical review of unusual techniques for distance measurement. *Optical Engineering*, 40(1), 10 – 19 – 10. doi:10.1117/1.1330700.
- Bonneau, D.A. and Hutchinson, D.J. (2019). The use of terrestrial laser scanning for the characterization of a cliff-talus system in the thompson river valley, british columbia, canada. *Geomorphology*, 327, 598–609.
- Chiang, K., Tsai, G., Li, Y., and El-Sheimy, N. (2017). Development of lidar-based uav system for environment reconstruction. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(10), 1790–1794. doi:10.1109/LGRS.2017.2736013.
- Cui, Y., Li, Q., Yang, B., Xiao, W., Chen, C., and Dong, Z. (2019). Automatic 3-d reconstruction of indoor environment with mobile laser scanning point clouds. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(8), 3117–3130. doi:10.1109/JSTARS.2019.2918937.
- Granshaw, S.I., Dowman, I., Förstner, W., Hoffmann, C., Leberl, F., and Walker, S. (2017). Photogrammetry and industry. *The Photogrammetric Record*, 32(158), 74–92.
- Guerreiro, B.J., Silvestre, C., Cunha, R., and Cabecinhas, D. (2017). Lidar-based control of autonomous rotorcraft for the inspection of pierlike structures. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 26(4), 1430–1438. doi:doi:10.1109/TCST.2017.2705058.
- Jaud, M., Letortu, P., Théry, C., Grandjean, P., Costa, S., Maquaire, O., Davidson, R., and Le Dantec, N. (2019). Uav survey of a coastal cliff face–selection of the best imaging angle. *Measurement*. doi:doi:10.1016/j.measurement.2019.02.024.
- Langley, R.B. (1998). Rtk gps. *Gps World*, 9(9), 70–76.
- Li, J., Yang, B., Chen, C., and Habib, A. (2019). Nrl-uav: Non-rigid registration of sequential raw laser scans and images for low-cost uav lidar point cloud quality improvement. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 158, 123 – 145. doi:10.1016/j.isprsjprs.2019.10.009.
- Liang, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Guan, F., et al. (2016). Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 63–77.
- Liu, P., Chen, A.Y., Huang, Y.N., Han, J.Y., Lai, J.S., Kang, S.C., Wu, T.H., Wen, M.C., and Tsai, M.H. (2014). A review of rotorcraft unmanned aerial vehicle (uav) developments and applications in civil engineering. *Smart Structures and Systems*, 13(6), 1065–1094.
- Messenger, M. and Silman, M. (2016). Unmanned aerial vehicles for the assessment and monitoring of environmental contamination: An example from coal ash spills. *Environmental pollution*, 218, 889–894.
- Neitzel, F. and Klonowski, J. (2011). Mobile 3d mapping with a low-cost uav system. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 38, 1–6.
- Sofonia, J.J., Phinn, S., Roelfsema, C., Kendoul, F., and Rist, Y. (2019). Modelling the effects of fundamental uav flight parameters on lidar point clouds to facilitate objectives-based planning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 149, 105 – 118. doi: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.01.020.
- Tucci, G., Gebbia, A., Conti, A., Fiorini, L., and Lubello, C. (2019). Monitoring and computation of the volumes of stockpiles of bulk material by means of uav photogrammetric surveying. *Remote Sensing*, 11, 1471. doi: 10.3390/rs11121471.
- Vacca, G., Furfaro, G., and Dessi, A. (2018). The use of the uav images for the building 3d model generation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 217–223.
- Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C., and Turner, D. (2012). Development of a uav-lidar system with application to forest inventory. *Remote Sensing*, 4(6), 1519–1543. doi:10.3390/rs4061519.
- Wang, D., Wan, B., Liu, J., Su, Y., Guo, Q., Qiu, P., and Wu, X. (2020). Estimating aboveground biomass of the mangrove forests on northeast hainan island in china using an upscaling method from field plots, uav-lidar data and sentinel-2 imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 85, 101986. doi:10.1016/j.jag.2019.101986.
- Wang, J., Xu, L., Li, X., and Tian, X. (2011). Simulation on impact of random attitude measurement errors on point cloud and 3d image of ALS. In *2011 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques*, 60–64. doi:10.1109/IST.2011.5962183.
- Wang, J., Xu, L., Fan, Y., Liu, X., Tian, Z., Wang, X., and Cheng, Y. (2018). A method for compensating platform attitude fluctuation for helicopter-borne lidar: Performance and effectiveness. *Measurement*, 125, 37–47. doi:10.1016/j.measurement.2018.04.049.
- Yang, H., Omidalizarandi, M., Xu, X., and Neumann, I. (2017). Terrestrial laser scanning technology for deformation monitoring and surface modeling of arch structures. *Composite Structures*, 169, 173–179.