

Projeto de quadrotor autônomo de alta precisão para sensoriamento remoto com uso de câmera multiespectral georreferenciada

Lucas Moraes¹
Rafael Falci Campos¹
Luiz Carlos Carmo Jr¹
Lucas Stoppa Moreira¹
Marco Aurélio Jucá¹
Alexandre Menezes¹
João Pedro Carvalho¹
Daniel Discini Silveira¹
Thiago Vieira Nogueira Coelho¹
Alexandre Bessa dos Santos¹
André Luis Marques Marcato¹
Fábio Pancera²
Ivan Toyama²

¹ Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF
Av. José Lourenço Kelmer – s/n – São Pedro – Juiz de Fora- MG, Brasil
thiago.coelho@ufjf.edu.br

² Duke Energy – Geração Paranapanema
Rodovia Chavantes, km 10 – Ribeirão Claro - SP, Brasil
fabio.pancera@duke-energy.com, ivan.toyama@duke-energy.com

Abstract. This paper shows the autonomous UAV's (Unmanned Aerial Vehicle) project and development to be applied in remote sensing using a specialized lightweight multispectral camera. The vehicle performs the flight, takeoff and landing procedures in total autonomous mode without need a human pilot's remote assistance during the entire mission time. The algorithms for autonomous missions were developed in ROS (Robotic Operation System) framework, which is a well-established workstation environment for development in robotics platforms. A friendly graphical pre-mission interface was developed for an easy interaction with the operator depicting the geographical map of the desired area. The bioinspired optical flow technique was applied for merging the GPS data and the optical vector data for an enhancement of the aircraft position estimation, overcoming the position error of a single GPS module operation. The performance improvement in position estimation was 58% better than the single GPS module and improves the autonomous navigation procedures. Moreover, a novel optical fiber sensor, immune to electromagnetic interference, was developed to measure the electrical current that feeds the electrical engines. After that, the multispectral camera was embedded into the aircraft to perform the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) calculation in previous target areas, which can be correlated with healthy vegetation areas.

Palavras-chave: VANT, NDVI, Optical Flow, Câmera Multiespectral, sensor à fibra óptica.

1. Introdução

Missões de monitoramento em ambientes vastos e de difícil acesso são responsáveis por problemas logísticos devido ao uso de equipes de monitoramento presencial. Por estas razões, soluções com plataformas robóticas como VANTs (Veículos Aéreos Não-Tripulados) apresentam grandes vantagens econômicas e tem sido implementadas de forma satisfatória nas mais diversas soluções de sensoriamento remoto em largas áreas, Blem (2013).

O sensoriamento remoto aéreo de uma determinada área pode ser realizado por sensores multiespectrais ou hiperspectrais embarcados em satélites. Embora, esta solução seja mais viável para cobertura de grandes áreas como um estado ou país, ela apresenta desvantagens como custo elevado em aquisição de imagens, além de a cobertura estar disponível apenas por determinados períodos de tempo devido a condições climáticas e a órbita de cada satélite.

Neste cenário, aplicações de sensoriamento remoto que utilizem VANTs apresentam soluções mais independentes das condições climáticas e mais versáteis em relação aos satélites, pois permite uma fácil readequação e *upgrade* dos sistemas sensores embarcados com menores custos quando comparados à aeronaves tripuladas, ao reduzir o custo com tripulação e pilotos treinados, e com sistemas satélites.

Entre as diferentes arquiteturas de VANT's, podem ser citadas os de asa fixa, que permitem maior autonomia, e arquiteturas de multirotores, permitindo a operação denominada VTOL (Vertical Take-Off and Landing), isto é, a decolagem e aterrissagem vertical, reduzindo a área requerida para tais procedimentos. Além disto, este tipo de aeronave permite o voo em *loiter*, ou seja, que a aeronave mantém uma geoposição fixa.

Atualmente, os VANTs possuem diferentes níveis de autonomia de pilotagem. Algumas aeronaves são controladas por um operador através de uma estação de controle remoto utilizando link de rádio-frequência. Estes operadores devem ser devidamente treinados e em certos níveis certificados para executar as missões de forma segura, prevenindo possíveis acidentes que possam por em risco pessoas na vizinhança da área de voo, bem como evitando perdas econômicas e possíveis danos a aeronave.

A combinação de operação com controle remoto com automação computadorizada, permite conduzir missões semi-autônomas tais como voos em alvos predeterminados. Versões mais sofisticadas permitem controle embarcados e/ou sistemas de estabelecimento e cálculo de rotas em tempo real, Manual QGround Control (2016). Entretanto, apenas um pequeno grupo de sistemas de VANTs realizam operações de alta complexidade de forma totalmente autônoma, tais como procedimentos de decolagem que ao começar a missão próxima ao solo, apresentam um cenário de grande turbulência gerada pelas hélices e procedimentos de pouso, que necessitam acertar um ponto de aterrissagem e realizar a aproximação próxima ao solo utilizando diretivas de acordo com a missão pré-programada. Estes cenários necessitam realizar estas ações com controle suficientemente apurado. Estes últimos sistemas são denominadas VAANTs (Veículos Aéreos Autônomos Não-Tripulados).

A utilização do módulo GPS, modo inercial de navegação e telemetria geram um ambiente de alta radiação eletromagnética interferindo em tecnologias tradicionais de medição de corrente. Tendo em vista isso, foi desenvolvido um sensor de corrente dos motores, imune a interferência eletromagnética baseado em grades de difração à fibra óptica.

Devido a estas potencialidades, o desenvolvimento de VAANTs pela equipe do LITel (Laboratório de Instrumentação e Telemetria) da UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora), foi foco deste trabalho, utilizando um módulo de alta precisão de posição permitindo procedimentos de *loitering*, isto é, de permanecer estável em uma geoposição durante o voo, facilitando a aquisição de imagens com maior qualidade e menos distorções pela câmera multiespectral embarcada. Os procedimentos de decolagem e aterrissagem autônomas são controlados através de algoritmos desenvolvidos pela equipe de trabalho em linguagem C++ rodando sobre a framework ROS (*Robotic Operating System*). O sensor multiespectral será responsável pelo cálculo de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), que é um índice de qualidade da vegetação que fornece um cenário da situação de preservação de áreas verdes.

2. Design e Montagem do protótipo

Um protótipo foi construído utilizando quatro motores *brushless*, resultando em uma aeronave comumente denominada como quadrotor. O quadrotor é um VANT de asa rotativa com várias vantagens em comparação com aeronaves de asa fixa, tais como melhor estabilidade nas ações de controle e possibilidade de *loiter*.

Como arquitetura de frame para o VANT foi escolhida uma estrutura do tipo X com dinâmica de voo similar a descrita na seção anterior. As razões de escolha desta arquitetura é sua maior manobrabilidade, devido a todos as quatro hélices participarem da dinâmica voo

através da aceração e desasclaração proporcional de cada hélice. Outro fator importante é que esta configuração evita hélices na frente da aeronave, permitindo que as imagens levantadas pelo módulo FPV (*First Person Viewing*), forneçam imagens similares a que um piloto dentro da aeronave teria, não sendo bloqueadas. A figura 1 mostra o design mecânico, no software SolidWorks, e a imagem do protótipo de quadrotor produzido LITel da UFJF utilizados no monitoramento de vegetação por câmera multiespectral.

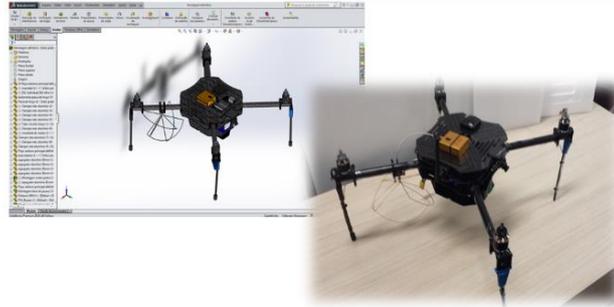


Figura 1 – Projeto mecânico do protótipo VANT montado no LITel.

Durante o estágio de prototipagem, o software realizou o cálculo do centro de gravidade (CG) da estrutura ficando este localizado no centro do protótipo para garantir estabilidade e precisão, bem como o cálculo de peso do protótipo que ficou em 1,4 kg. Estes dados foram importantes para o dimensionamento dos motores e para o cálculo de carga que o protótipo poderá carregar. Em adição, o trem de pouso foi projetado com altura suficiente para reduzir a probabilidade de dano aos periféricos da aeronave, bem como as hélices durante o pouso.

Para o design do protótipo o módulo de energia foi composto por uma bateria de três células, sendo a capacidade de 8400 mAh e uma descarga contínua de 40C, conectada a quatro módulos ESC (*Electronic Speed Controllers*). O protótipo, com os periféricos e a bateria pesam 2,1 kg com requerimento de carga para cada motor de 525g consumindo 6.7 A por motor. O consumo da unidade de controle e todos os periféricos é da ordem de 600 mA, totalizando um consumo em voo de 27.4 A. A bateria padrão provê autonomia de aproximadamente 18 minutos. Uma maior autonomia é alcançada com uso de bateria de 22 Ah ou com utilização de baterias em paralelo através do módulo eletrônico de gerência de baterias, desenvolvido pelo grupo de trabalho do LITel aumentando a autonomia de voo para aproximadamente uma hora.

Para dotar o VANT com capacidade autônoma de seguir pontos pré-programados através de coordenadas geoposicionadas, e coordenar as ações da aeronave durante a missão, foi escolhida como placa de controle de navegação a PIXHAWK. As características, modos de operação, diretivas de *firmware* para desenvolvedores e funcionalidades desta placa de controle estão bem documentadas e bem difundidas entre desenvolvedores. Além disso, a PIXHAWK possui sensores embarcados tais como acelerômetros e magnetômetros no auxílio da navegação autônoma e a capacidade de realizar processamento paralelo devido ao sistema embarcado UNIX, fazendo este possuir uma excelente compatibilidade com o sistema multinós ROS.

O ROS é uma framework de desenvolvimento de plataformas robóticas com arquitetura em nós que são utilizados para representar além do própria aeronave, as suas funcionalidades como sensores embarcados, módulos de navegação e etc. Além disso, provê infraestrutura de comunicação entre os nós através de tópicos e serviços. Tópico é uma forma de publicação contínua de dados pelo nó e uma estrutura de serviços atua como uma arquitetura de comunicação cliente-servidor na rede ROS, isto é a publicação de dados responde a requisição específica do nó. A comunidade de desenvolvedores ROS é bastante vasta e compartilha soluções, incluindo pacotes que se comunicam com a PIXHAWK, através da alteração e reuso de pacotes construídos para a integração de diversos componentes, plataformas e periféricos.

A equipe de pesquisadores do LITel desenvolveu rotinas em C++ para o controle automático do VANT, usando protocolo MAVlink. O MAVlink é uma solução de comunicação

suportada pelo ROS através do pacote MAVROS. Este pacote foi utilizado e adaptado para atender aos requisitos de diretivas da missão para determinação de *waypoints*, isto é pontos de passagem da aeronave em voo, através de coordenadas georreferenciadas. Isto permitiu o cálculo dos procedimentos de aterrissagem de com a devida acurácia e segurança. O MAVROS permite a comunicação, envio e leitura de dados da PIXHAWK para determinação de ações de controle e automação da missão em tempo real. A figura 2 mostra o software de marcação dos waypoints.

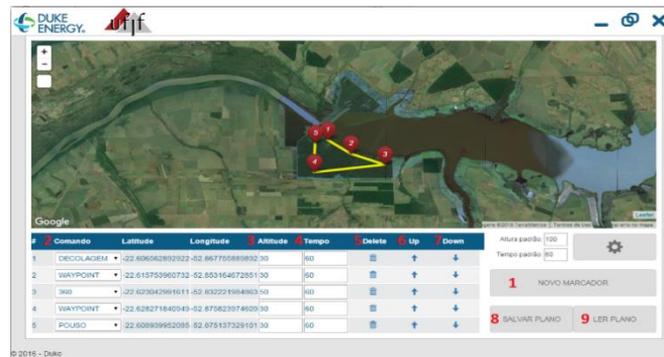


Figura 2 – Tela de marcação dos waypoints desenvolvido pela equipe do LITel.

3 Módulo Optical Flow para posicionamento de alta precisão

A técnica Optical Flow baseia-se em ações de integração e diferenciação de padrões de movimento de pixels entre duas imagens subsequentes, Paragios (2005). É importante notar que a aquisição e processamento de imagens devem levar em conta os custos computacionais de processamento, já que aplicações computacionais autônomas necessitam prover respostas rápidas ao movimento das plataformas robóticas, sendo ainda mais crucial em VANTS.

Para possibilitar a unidade de processamento de imagens estimar a posição do VANT, é necessário programá-la levando em consideração as características de hardware do sensor de imagem tais como a distância focal da lente e sua curvatura, o campo de visão além do ângulo de rotação relativo a aeronave. Estes aspectos são levados em contas para o cálculo do movimento aparente de pixels pelo controlador de voo seguindo a equação, Peter Corke (2011):

$$\begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\hat{f}/Z & 0 & u/Z & uv/\hat{f} & -(\hat{f} + u^2/\hat{f}) & v \\ 0 & -\hat{f}/Z & v/Z & \hat{f} + v^2/Z & -uv/\hat{f} & -u \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

sendo: $u = \frac{f}{\rho}x + u_0$ e $v = \frac{f}{\rho}y + v_0$

onde (u,v) são as coordenadas de pixels na direção x e y, (u_0,v_0) são as coordenadas de pixels relativas ao ponto principal, que é a coordenda onde eixo óptico intercepta o plano imagem. O parâmetro \hat{f} é o foco normalizado da câmera relacionado ao tamanho de pixel ρ e $\Omega=(v_x,v_y,v_z, \omega_x,\omega_y,\omega_z)$ é o vetor de velocidades que compreende as velocidades espaciais e angulares com relação aos eixos de coordenadas.

Neste projeto foi usado um módulo PX4FLOW que é um módulo sensor otimizado para atuar junto com a PIXHAWK para o cálculo do Optical Flow. Este módulo é equipado com uma câmera com resolução em pixels de 752x480 e uma distância focal de 16 mm com uma taxa de cálculo de Optical Flow de 400 Hz. O PX4FLOW é equipado com módulo de medidas inerciais (IMU) com o objetivo de reduzir ambiguidades no cálculo de movimento. O uso de módulos SONAR (Sound Navigation and Raging) ou LIDAR (Light Detection and Raging) podem ser utilizados para aumentar a precisão de operação, principalmente em cálculos de altitude de operação. Entretanto, devido a precisão de todas as etapas realizadas neste projeto e ao métodos de controle utilizados, o uso destes últimos módulos provou não ser necessário.

4 Testes de erro de posição com módulo GPS + Optical Flow

O uso do OF através de técnicas de detecção, diferenciação e integração de imagens subsequentes é capaz de transmitir informações acerca da movimentação da aeronave, tais como velocidade, aceleração e direção, para uma unidade de recepção de dados, Gageik, (2013). Pesando estes dados com a informação de posição do GPS, é possível reduzir o erro de posicionamento estimado, melhorando as dinâmicas de controle de voo e os procedimentos de aterrissagem autônomos. Ainda pode ser citado que em ambientes onde o sinal de GPS está deteriorado, o OF pode estimar a posição da aeronave de forma eficiente, Zing (2010).

O OF pode ser usado para o cálculo da posição utilizando diversos pesos na combinação com as leituras do GPS. Neste trabalho os pesos de ambos os módulos foram de 0,5 em uma escala de 0 a 1, sendo assim na estimativa os dados de GPS e do OF foram considerados de mesma importância. As condições ambientais utilizadas no espaço livre foram das mais diversas em termos de vento e umidade do ar o que pode influenciar na medida do GPS.

Testes de precisão foram realizados utilizando o pouso apenas por GPS e pouso com módulo GPS + OF próximo as instalações do LITel. A figura 3 mostra a função de distribuição de probabilidade (fdp) dos erros de posição de aterrissagem com 200 repetições para apenas o GPS habilitado e com a correção do GPS pelo módulo OF.

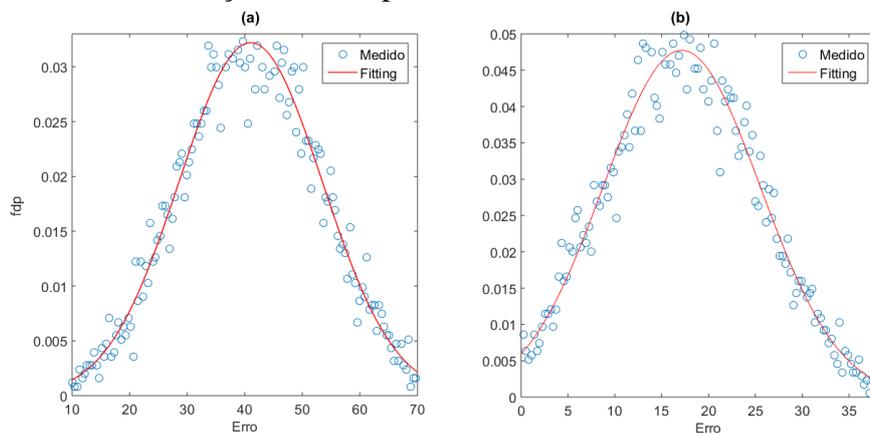


Figura 3 – Fdp do erro da posição de pouso para GPS habilitado (a) e OF + GPS (b).

Depois de analisar os resultados, foi notado que a média do erro de posição para o módulo GPS + OF foi de 17 cm com desvio padrão de 8 cm, contra um erro de 41 cm com desvio padrão de 13cm para o teste em condições similares usando apenas o GPS, indicando uma melhora de 58,5% ao usar um peso de 0,5 para cada módulo. Isto permite que a solução que usa a correção por OF estimar com mais precisão a posição do VANT e por sua vez melhorar o desempenho dos algoritmos de controle. Importante citar que melhores precisões podem ser alcançadas ao utilizar um módulo GPS diferencial integrado ao módulo OF utilizando processamento por filtro de Kalman. Trabalhos futuros serão realizados utilizando o GPS diferencial.

5 Sensor à fibra óptica para medição da corrente do VANT

Sensores à fibra óptica são imunes a interferência eletromagnética e podem ser facilmente embutidos em estruturas devido ao seu tamanho reduzido, podendo ser aplicados em situações onde a tecnologia tradicional de sensoriamento não consegue performances satisfatórias.

Nesta áreas os sensores baseados em grades de difração à fibra, mas precisamente as FBGs (Fiber Bragg Gratings) e as LPGs (Long Period Gratings), tem grande destaque sendo formados através da modulação periódica do índice de refração da fibra. Esta modulação no índice provoca uma redistribuição no modos de propagação da mesma fazendo com que um comprimento de onda óptico específico seja refletido no caso da FBG e transmitido no caso das LPGs ao acoplarem com os modos evanescentes de casca da fibra óptica.

Devido ao custo de fabricação e alta sensibilidade a deformação foi escolhido a LPG para o uso como sensor para a medição de corrente. A mesma foi fabricada nas instalações do LITel através de técnicas de arco elétrico já demonstrada pela equipe em publicações anteriores, Delgado (2016). A figura 4 mostra o sensor e o setup de calibração que utiliza uma fonte de luz, o sensor localizado no braço do VANT e uma analisador de espectro óptico. A medição será realizada de maneira indireta através de uma imã embutido na LPG, conforme mostrado na figura, que ao sofrer a ação do campo magnético da corrente do motor atua pressionando a grade e alterando o espectro transmitido conforme apresentado na figura 5.



Figura 4 – Sistema de calibração e sensor óptico para a medida de corrente.

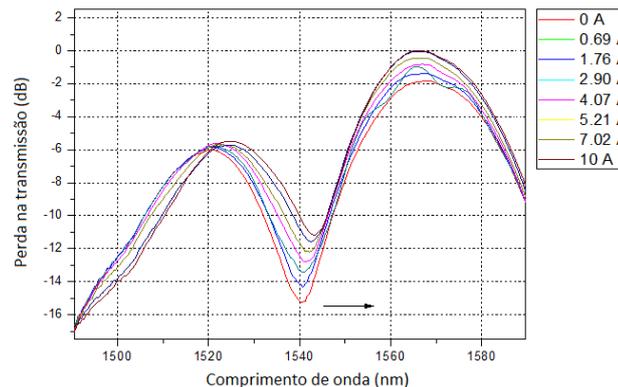


Figura 5 – Espectro do sensor LPG com variação da corrente no motor.

A figura 5 mostra que o vale do espectro de transmissão se desloca para comprimentos de onda maiores com o aumento de corrente. Para o uso do sensor embarcado no VANT a fonte de luz é trocada por um LED e o analisador de espectro por um filtro óptico que conforme a variação do espectro aumenta a intensidade recebida e um fotodetector. Assim a corrente de alimentação pode ser monitorada em tempo real podendo a performance do motor ser acompanhada durante a missão e a autonomia ser estimada.

5 Índice de vegetação e câmera multiespectral

Proposto inicialmente por Rouse, Rouse (1973), mas popularizado por Tucker, Tucker (1979) o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*) é reconhecido como o método padrão para a quantização da cobertura vegetal e crescimento de culturas agrícolas em uma determinada área, Sultana (2014). O NDVI pode ser calculado como uma relação entre a refletividade da área de interesse de medida no espectro infravermelho próximo (NIR - *Near InfraRed*) e no espectro do vermelho (R - *Red*) conforme a expressão abaixo, Rabatel (2011):

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (2)$$

O NDVI é um índice sensível a cobertura de vegetação e as condições da mesma. Seus valores de medida variam de -1 a 1. Quanto mais positivo os valores, maior a cobertura da vegetação e quanto maior os valores negativos, estes podem estar associados a superfícies e reservas de água.

A estimativa do NDVI permite adquirir informações importantes através do levantamento de imagens remotas. Desta forma, câmeras multiespectrais, trabalhando no espectro visível + NIR para permitir o cálculo remoto do NDVI, são soluções atrativas sendo embarcadas em VANTs para realizar o monitoramento de vastas áreas com o maior custo benefício possível.

Neste trabalho, uma câmera multiespectral foi embarcada no VANT desenvolvido no LITel para realizar levantamentos de NDVI de determinadas áreas no município de Juiz de Fora.

A câmera multiespectral a ser embarcada em VANTs necessita ser leve para não impactar no payload que a aeronave consegue carregar, ter baixo consumo para não diminuir a autonomia de voo ao exigir do módulo de bateria uma quantidade de carga substancial, ter integração com dados de GPS para armazenar imagens georeferenciadas e necessita trabalhar com espectro NIR e R para permitir o cálculo do NDVI. Para atender estas demandas foi escolhida uma câmera multiespectral da fabricante TETRACAM modelo ADC micro.

O modelo ADC Micro possui baixo consumo, em torno de 2W, sendo leve, em torno de 90g e possui integração com dados de GPS embarcados. Este modelo não possui bateria interna, sendo sua alimentação provida pela saída da bateria do VANT consumindo 1 A de corrente. Possui resolução espacial de 4 cm quando adquire imagens a alturas de 120 metros. Ela foi embarcada dentro do VANT com uso de um módulo gimbal, que provê estabilidade para câmera para que mesmo com trepidações durante o voo ela permaneça estável para uma melhor aquisição das imagens.

6 Resultados de imagens captadas pela câmera multiespectral

Foram realizados voos autônomos nas intermediações do Morro do Cristo (21,76° S; 43,34° W) no município de Juiz de Fora através de waypoints pré-determinados em uma configuração prévia a missão. As imagens adquiridas estavam georeferenciadas pelo módulo de GPS com erro de posição diminuído pela correlação com o módulo de Optical Flow para maior resolução espacial conforme descrito anteriormente nas seções 3 e 4. A escolha desta região foi devido a diversidade de áreas de mata verde cercaneadas por edificações. Foram levantadas imagens com câmeras comerciais de 16 MP e com a câmera multiespectral para determinar a eficiência na identificação de áreas de vegetação.

A figura 6a mostra a imagem RGB padrão aquisitada pela câmera comercial padrão embutida no VANT. A figura 5b mostra a a paleta de NDVI medida para o mesmo cenário pela câmera Multiespectral que foi especificada na seção 5.



Figura 6 – Imagem RGB (a) e paleta NDVI (b) do morro do cristo.

Analisando os resultados da figura 6 pode-se perceber que a imagem espectral foi capaz de detectar até concentração de árvores em meio a edificações. Foi levantado que na imagem

adquirida, em torno de 20% da área apresenta uma cobertura vegetal densa com folhagens saudáveis. A vegetação rasteira detectada foi de em torno de dez por cento. Uma resposta vermelho intensa detectaria mananciais de água ou concentrações de poças de água devido a chuvas o que não ocorreu pois nenhum dos dois cenários é satisfeito nesta localidade e no dia de aquisição. A detecção de edificações ocorrem porém se encontra com assinatura espectral semelhante ao solo exposto para faixa de trabalho da câmera multiespectral.

8 Conclusões

Este trabalho apresentou os procedimentos de projeto para a construção no LITel de um VAANT, veículo aéreo autônomo não-tripulado com procedimentos de voo, decolagem e aterrissagem totalmente autônomos, com o objetivo de embarcar uma câmera multiespectral georreferenciada para o levantamento do índice NDVI em uma determinada área.

Foi utilizado um módulo de estimação da posição pela correlação de dados do GPS junto com o algoritmo Optical Flow processado no módulo PX4FLOW, módulo este otimizado para operar com a PIXHAWK, que é a placa de controle de voo adotada na montagem do protótipo. A melhora da estimativa de posição desta solução foi verificada em teste sendo em torno de 58,5% melhor em relação ao posicionamento apenas com o módulo de GPS habilitado.

Foi desenvolvido um inovador sensor à fibra óptica que permitiu aferir a corrente de alimentação do motor que é um parâmetro de qualidade e performance de importância para o acompanhamento da missão do VANT.

A câmera multiespectral embarcada mostrou-se uma solução adequada por ser leve e de baixo consumo, levantando imagens georreferenciadas de alta precisão e conseguindo detectar o índice NDVI em alguns cenários testes de forma eficaz, além de detectar a presença de vegetação entre altas concentrações de edificações.

Em trabalhos futuros, serão utilizados módulos DGPS para melhoria da estimativa de posição e o sistema VAANT de inspeção será usado para o acompanhamento periódico de áreas de vegetação, importante em ações de preservação ambiental.

Referências

- BLEM, E. Power struggles: Revisiting the RISC vs. CISC debate on contemporary ARM and x86 architectures, **IEEE 19th International Symposium on High Performance Computer Architecture**, 2013.
- CORKE, P. Robotics, Vision and Control – **Fundamental Algorithms in MATLAB**. Springer, 2011. Cap.15, pp. 461.
- DELGADO, F. S., JUCÁ, M. A., COELHO, T. V. N. ; BESSA, A. S., BARBERO, A. P. L. ; SILVA, V. N. H. Propagation Characteristics of Optical Long Period Fiber Gratings using Graphical Solution Methods. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, 2016. vol. 15, pp. 135-145.
- GAGEIK, N.; STROHMEIER, M.; MONTENEGRO, S. **An Autonomous UAV with an Optical Flow Sensor for Positioning and Navigation**, International Journal of Advanced Robotics, vol. 10, 2013.
- RABATEL, G.; GORRETA, N.; LABBÉ, S. Getting NDVI Spectral Bands from a Single Standard RGB Digital Camera: A Methodological Approach. **Conference of the Spanish Association for Artificial Intelligence, CAEPIA 2011**, vol. 7023, pp. 333-342, 2011.
- Manual do QGround Control. Disponível em < http://qgroundcontrol.org/mavlink/waypoint_protocol > Acesso em maio de 2016.
- PARAGIOS, N.; Chen, Y.; FAUGERAS, O. **Mathematical Models in Computer Vision**. Springer, 2005. Cap. 15, pp. 239-258.
- ROUSE, J. W.; HASS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium**, 1973. vol. 1, pp. 309-317.
- SULTANA, S. R; ALI, A.; AHMAD, A.; MUBEEN, M.; ZIA-UL-HAQ, M.; AHMAD, S.; ERCISLI, S.; JAAFAR, H. Z. E. Normalized Difference Vegetation Index as a Tool for Wheat Yield Estimation: A Case Study from Faisalabad, Pakistan. **The Scientific World Journal**, 2014.
- TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, vol. 8, pp. 127-150, 1979.
- ZING, S.; SCARAMUZZA, D.; WEISS, S.; SIEGWART, R. MAV Navigation through Indoor Corridors Using Optical Flow, **IEEE International Conference on Robotics and Automation**, 2010.