

Análise bibliográfica sobre as potencialidades da aquisição de imagens multi e hiperespectrais por VANTs no auxílio à inspeção de obras de arte especiais

RESUMO

As Obras de Arte Especiais (OAEs) surgiram com o intuito de facilitar a mobilidade urbana. Logo, é fundamental a realização de inspeções periódicas e manutenções preventivas, a fim de identificar possíveis manifestações patológicas. Atualmente as técnicas empregadas são baseadas na inspeção visual, na qual a principal dificuldade é a acessibilidade a todos os locais da OAE. Neste sentido, buscam-se outros métodos que possam auxiliar tais inspeções, como, por exemplo, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) e as imagens multi e hiperespectrais. A metodologia do trabalho consistiu na análise dos atuais métodos de inspeção e a identificação das suas exigências para a composição de soluções baseadas em sistemas remotos de aquisição de imagens. A inspeção com estes sistemas garantiria agilidade e segurança, além de auxílio na interpretação e análise para o diagnóstico de manifestações patológicas em OAEs.

PALAVRAS-CHAVE: Obras de Arte Especiais. Veículos Aéreos Não Tripulados. Manifestações Patológicas. Inspeções.

Édina Regina Rauber

edinarrauber@hotmail.com
orcid.org/0000-0002-8462-8342
Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil.

Fabiane Bordin

fabianebor@unisinos.br
orcid.org/0000-0003-0037-4099
Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil.

Mônica Müller Anschau

mullera@edu.unisinos.br
orcid.org/0000-0002-1264-1222
Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil.

Mauricio Roberto Veronez

veronez@unisinos.br
orcid.org/0000-0002-5914-3546
Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil.

Luiz Gonzaga da Silveira Jr.

lgonzaga@unisinos.br
orcid.org/0000-0002-7661-2447
Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil.

Carlo Framarim

comercial@mo3.com.br
orcid.org/0000-0002-1525-7795
MO3 consultoria em gestão e operação de sistemas de transporte e mobilidade urbana, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

INTRODUÇÃO

No Brasil, a manutenção das construções, em especial a preventiva, tem sido tratada com pouca importância tanto por entidades privadas quanto por órgãos públicos municipais, estaduais e federais. O foco dos investimentos está na construção de novas obras, ficando em segundo plano todas as questões relacionadas à conservação da infraestrutura existente. Este cenário reflete também a realidade das obras de infraestrutura urbana, principalmente no que diz respeito às pontes e os viadutos (VITÓRIO, 2006).

Essas estruturas, também conhecidas como Obras de Arte Especiais (OAEs), são indispensáveis para o desenvolvimento e funcionamento viário dos grandes centros urbanos e também para o transporte e escoamento da produção industrial e agrícola no país. A interrupção no uso dessas estruturas gera grandes prejuízos para a sociedade e, neste contexto, é fundamental investir nas atividades de inspeções periódicas, pois elas podem reduzir os custos de manutenção e conservação, aumentando o desempenho da OAE.

As inspeções das OAEs têm por objetivo identificar manifestações patológicas que podem acometer estas estruturas, permitindo a avaliação dos problemas e a proposição de soluções em tempo adequado (DNIT, 2004a). No Brasil, estas inspeções são regulamentadas pelas normas DNIT 010/2004 – PRO (DNIT, 2004b), Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias (DNIT, 2004a), além da norma brasileira sobre vistorias de pontes e viadutos de concreto (NBR 9452, ABNT, 2012).

Em geral, essas inspeções são visuais e os dados referentes ao estado da estrutura são anotados em fichas e, posteriormente digitalizados. Este tipo de inspeção, embora convencional e utilizada em todo o mundo, oferece muitas limitações, devido à sua grande variabilidade e natureza subjetiva (ELLENBERG *et al.*, 2016). Uma das principais dificuldades é a acessibilidade em todos os pontos da estrutura, o que requer a mobilização de equipamentos e a interdição de vias, acarretando em custos elevados. Além disso, em alguns casos esse tipo de atividade pode colocar em risco a segurança do inspetor, visto que o mesmo fica preso à estrutura por uma linha de vida ou por um guindaste.

A dificuldade das inspeções das OAEs é um dos motivos que reflete a deficiência da gestão das pontes e viadutos em âmbito nacional. Uma auditoria realizada em 2012 pelo Tribunal de Contas da União (TCU) revelou que o Sistema de Gerenciamento de Obras de Artes Especiais (SGO) não teve atualização desde o ano de 2004. O SGO é responsável por inspecionar as OAEs sob a jurisdição do DNIT e segundo o levantamento realizado pelo TCU, das 4.469 obras que estão sob responsabilidade do DNIT, 3.351 encontram-se em situações que variam de condições precárias a mau estado de conservação (TCU, 2012).

Nesse contexto, as tecnologias baseadas em sensoriamento remoto possuem potencial para auxiliar nas tarefas de inspeção das OAEs, visto que o processamento de imagens adquiridas por sensores multiespectrais ou hiperespectrais permitem a avaliação e quantificação de danos na estrutura. Tais danificações podem ser o avanço de fissuras, fragmentação, manchamentos e biodeterioração, ou respostas mecânicas, como deslocamentos e deformações.

Os sensores remotos podem ser embarcados em uma plataforma aérea, como os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), possibilitando assim inspeções mais frequentes, de custo mais acessível e proporcionando um menor risco ao inspetor. As informações coletadas pelos sensores acoplados aos VANTs permitiriam o rastreamento em uma resolução temporal maior para compreender como a estrutura se deteriora ao longo do tempo, a fim de melhorar os modelos de previsão de vida útil da estrutura. Além disso, esses dados ajudariam nas decisões de gestão das OAEs.

As OAEs brasileiras são relativamente jovens, se comparadas com as de países europeus e norte-americanos. Neste contexto, o estudo dos mecanismos de deterioração, e a cultura de manutenção e restauração das OAEs é um assunto recente no Brasil. Isso justifica o fato de que estes países estão mais avançados no que diz respeito ao desenvolvimento de novas técnicas e metodologias de inspeção que possam trazer vantagens sobre as limitações dos métodos convencionais. Dentre as vantagens que um sistema de sensores acoplado aos VANTs podem trazer sobre as inspeções convencionais, Metni e Hamel (2006) citam a minimização dos riscos de acidente, diminuição da logística e as horas de trabalho, além do fato de ser uma maneira não destrutiva para a obtenção de dados.

Dessa forma, o objetivo desta pesquisa foi realizar um estudo bibliográfico sobre as potencialidades de um sistema de aquisição de imagens para auxiliar na inspeção de OAEs, por meio de sensores embarcados em VANTs. Para isto, analisou-se os elementos necessários (conjunto de softwares, hardwares, equipamentos auxiliares e *etc.*) mais adequados e, suas limitações à atividade de aquisição de imagens para inspeção, para assim compor um sistema remoto que possa auxiliar e realizar inspeções das OAEs futuramente.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

SENSORES MULTI E HIPERESPECTRAIS

O constante aprimoramento das geotecnologias permitiu muitos avanços na área de sensoriamento remoto. Principalmente a que utiliza sensores para a obtenção de imagens digitais por meio da detecção do fluxo de radiação eletromagnética, refletida pelas superfícies dos objetos terrestres, em diversos comprimentos de onda do espectro eletromagnético.

Segundo Meneses (2012), os sensores imageadores multiespectrais são instrumentos eletro-ópticos capazes de obter múltiplas imagens simultâneas da superfície terrestre, em regiões distintas do espectro, entre os comprimentos de onda da luz visível azul e a região termal (infravermelho). Enquanto os sensores multiespectrais têm capacidade de registrar imagens em um limitado número de bandas, os sensores hiperespectrais tem potencial de avaliar centenas de bandas contínuas. Desta forma, o sensoriamento remoto hiperespectral possibilita a extração de feições espectrais de reflectância/absorção para cada pixel da imagem gerada, identificando diversas características do alvo, como a composição dos materiais (BAPTISTA, 2012).

Dentre as aplicações desses sensores, no campo da Engenharia Civil, pode-se citar trabalhos como os de Valença (2011), que propôs o uso desta tecnologia para a análise de estruturas de concreto em serviço, uma vez que ela pode permitir o monitoramento dos deslocamentos, deformações e do padrão das fissuras com o uso de métodos envolvendo fotogrametria com processamento digital de imagens e análise multiespectral. Pavi *et al.* (2015) identificaram biodeterioração e umidade pela classificação da intensidade da nuvem de pontos 3D, realizada por algoritmos, a fim de auxiliar as inspeções. Além disso, as técnicas de sensoriamento remoto têm sido utilizadas para avaliar outras propriedades do concreto. Santos *et al.* (2015) estudaram a espectroscopia para avaliação da resistência mecânica de materiais cimentícios. Gorkos *et al.* (2016) propuseram um método não destrutivo para a avaliação da resistência do concreto *in situ* também baseado em espectroscopia.

USO DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS COMO PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Os VANTs, segundo o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DCEA), são veículos projetados para voar sem piloto a bordo e com carga útil acoplada (DCEA, 2010). Atualmente existem vários modelos de VANTs, de diferentes características e tamanhos. Conhecer os aspectos de cada um desses equipamentos é de fundamental importância, pois só assim será possível definir o modelo ideal para cada finalidade. Segundo Agostinho (2012), os principais condicionantes para o uso desses sistemas são: os objetos a serem analisados, os sensores a serem acoplados, a sua carga útil e as restrições de voo.

Os VANTs oferecem novas perspectivas para o setor de transportes e serviços. Embora as exigências legais permaneçam um pouco restritivas, as aplicações de VANTs estão se tornando generalizadas, desde usos militares a aplicações civis, como imagens aéreas ou várias tarefas de inspeção (MÁTHÉ e BOŞONIU, 2015).

Mader et al (2016) adaptaram sensores em VANTs para realizar a inspeção em um farol. Segundo a metodologia abordada, inicialmente foi acoplado um equipamento Laser scanner a fim de gerar uma nuvem de pontos 3D georreferenciada. Para gerar uma gama maior de informações, posteriormente foram acopladas uma câmera infravermelha termal e uma RGB. Ao processar os dados foi possível gerar um mapa de danos baseado em imagens georeferenciadas e atributos multiespectrais.

Rathinam et al (2006) utilizaram VANT para inspeção de edificações em tempo real, a fim de facilitar a verificação de incidentes em locais como rodovias e canalizações de grande porte. Para ter a informação em tempo real, foi utilizado um algoritmo capaz de identificar e localizar as estruturas por meio de uma imagem da estrutura.

Já Hellermann e Morgenthal (2014) utilizaram uma câmera de alta resolução acoplada a um VANT multirrotor, para a verificação de anomalias em parte de um muro de contenção de aproximadamente 12m de altura e 70º de inclinação. Durante a aquisição das imagens, o VANT permaneceu a uma

distância de 35m do muro. O voo do VANT foi pré-programado, já que o mesmo apresentava sistema de posicionamento por GPS. Além disso, os autores indicam o equipamento para outros tipos de câmera como termais e infravermelhas e o controle das mesmas pode ser realizado por meio de um aparelho celular.

Outros estudos realizados na área também mostraram que a aplicação de VANTs é promissora. Agostinho (2012) desenvolveu um trabalho utilizando um VANT equipado com uma câmera fotográfica convencional e uma câmera térmica para captar imagens de diversas estruturas e detectar anomalias de edificações. Máthé e Buşoniu (2015) avaliaram o uso de VANT de baixo custo para a inspeção em lugares externos, como rodovias, ferrovias e fachadas de edificações. Também foram desenvolvidos estudos com sensores embarcados em VANTs para reconhecimento e medição de fissuras em estruturas (KIM *et al.*, 2015). Zink e Lovelace (2015) testaram várias tecnologias de imageamento (imagens estáticas, vídeos e câmeras infravermelhas) embarcadas em VANTs para construção de modelos 3D e inspeções de pontes. Baseado no tamanho, peso, controlabilidade e sistema à prova de falhas, os autores concluíram sobre a usabilidade e a segurança dos VANTs para tais fins.

METODOLOGIA

Para definir as exigências do sistema, foi realizada uma exploração sobre a bibliografia para o conhecimento das principais manifestações patológicas que se apresentam nas OAEs. Além disso, foi necessário analisar as inspeções comumente realizadas e as padronizadas no Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias (DNIT, 2004a) e DNIT 010/2004 – PRO (DNIT, 2004b), a fim de identificar as partes da estrutura e demais pontos das OAEs que necessitam serem inspecionados, considerando situações distintas de dificuldade de acesso, definindo assim as exigências de cada componente do sistema.

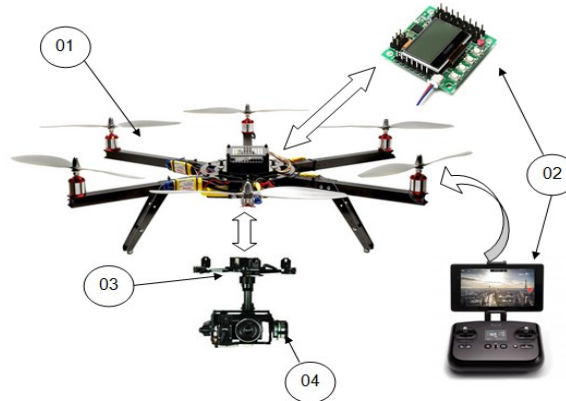
O levantamento dos dados referentes aos sensores e VANTs foi realizado diretamente em catálogos de fabricantes disponibilizados pelas empresas. Neles foram coletadas e analisadas características que pudessem influenciar em cada modelo de sensor e de VANT para esse fim. Ao selecionar os sensores, optou-se por modelos que tivessem como característica a capacidade de serem aerotransportados (tamanho e peso compatível com a carga suportada pelos VANTs), além de possuírem boa resolução espectral para a identificação das diversas manifestações patológicas.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Com base no que está descrito no Manual de Inspeção de Pontes Rodoviárias (DNIT, 2004a), foi possível definir quais as principais manobras e pontos de visão que devem ser considerados pelo sistema. Para que tais manobras sejam realizadas, o VANT deve realizar movimentos em direções específicas, possibilitando assim a realização da inspeção em todos os pontos da OAE. Além disso, é indispensável a utilização de um gimbal - suporte pivotante para acoplar o sensor - que permite rotações em torno dos eixos vertical e horizontal, mantendo o sensor totalmente nivelado e sem vibrações.

Para que os sensores possam obter dados da estrutura como um todo, foram identificadas e definidas as características fundamentais de um VANT como plataforma móvel, bem como as características do sensor e dos elementos auxiliares. A Figura 1 demonstra os principais componentes do sistema proposto e os números indicados em cada componente estão descritos na Tabela 1.

Figura 1- Sistema remoto para aquisição de imagens



Fonte: Elaborado pelos autores com base em Delamura (2015), Starek et al (2015) e Trew (2015).

Tabela 1- Descrição do sistema e suas exigências







| Componente | Descrição | Exigências |
|-------------------------------|---|--|
| 1 VANT | Possui a função de transportar o sensor para aquisição das imagens | Deve se movimentar em todas as direções, mantendo-se estático no ar, além de ter capacidade de carga útil suficiente para transportar o sensor e seus acessórios |
| 2 Software de controle de voo | Sistema instalado no VANT e controlado remotamente a partir do solo. Possui diversas funções, que dependem da marca e do modelo | Controlar a decolagem, o percurso e o retorno do VANT. Deve proporcionar o controle do VANT pelo "modo GPS", possibilitar a sua estabilização para o registro das imagens, além de assegurar o voo totalmente autônomo e seguro. Deve também possuir sensores inerciais (giroscópios e acelerômetros) |
| 3 Suporte do sensor / gimbal | Suporte fixado no VANT que tem a função de acoplar o sensor para a aquisição das imagens | Este suporte deve permitir que o sensor gire em torno dos dois eixos, vertical e horizontal viabilizando o registro de imagens de elementos que estejam no seu entorno. Além disso, deverá estabilizar o sensor durante o voo |
| 4 Sensor embarcado | Sensor multi ou hiperespectral embarcado no VANT para aquisição das imagens para inspeção | Captar imagens simultâneas em diferentes regiões do espectro eletromagnético, para posterior processamento, visualização e análise. Deverá garantir uma boa resolução espectral, para que o sensor consiga distinguir entre os níveis de intensidade dos sinais de retorno e entre os contrastes das características dos objetos inspecionados |

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Delamura (2015), Starek et al (2015) e Trew (2015).

VANTS E SENSORES

Uma das principais exigências do VANT na inspeção é atender a capacidade de se mover em todas as direções num espaço bastante limitado, sem perder a estabilidade. Por isso, os VANTS de asas móveis são os ideais para esta atividade. Já os de asas fixas, por não conseguirem realizar manobras complexas em espaços limitados, não são indicados para este fim, sendo estes mais adequados para voos longos sobre áreas abertas e de grande extensão. Os VANTS de asas rotativas, também conhecidos como multirrotores, realizam manobras ágeis e com estabilidade. Desta forma, na Tabela 2, estão relacionados alguns modelos que foram considerados aptos a executar inspeções em OAEs.

Tabela 2- VANTS selecionados e suas características

| VANT (marca/modelo) | Autonomia* | Carga útil aproximada | Software de controle de voo ** |
|---------------------|--|-----------------------|--------------------------------|
| DJI - S1000 |  15 min | 6 kg | DJI A2 |
| Turbo Ace - X88 |  15 min | 2,7kg | DJI – WooKong |
| Aibot X6 |  30 min | 2kg | AiProFlight |
| DJI - S900 |  18 min | 4kg | DJI A2 |
| Gyro 1000 X4 |  80 min sem carga / 20 min com 8kg de carga | 3kg | Tecnologia própria |
| Gyro 500 X4 |  35 min sem carga | 1kg | Tecnologia própria |

* A autonomia do sistema possui influência de vários fatores como velocidade do vento e do voo, carga de decolagem, potência utilizada e estado de conservação das baterias.

** Maiores detalhes sobre os softwares de controle de voo estão descritos na Tabela 5.

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Aibotix (2015), Drone Store (2015a; 2015b), Gyrofly (2015a; 2015b), Turbo Ace (2015) e UAV Brasil (2015?)

A Tabela 2, apresenta a autonomia do sistema informada pelo fabricante. Contudo, a autonomia efetiva de uso, depende de vários fatores (vento, carga,

potência, etc.) e, embora seja um fator importante, este não é um fator determinante, visto que a inspeção das OAEs pode ser realizada em etapas.

Os tricópteros, mesmo sendo de asas rotativas, não foram relacionados na Tabela 2, pois os modelos disponíveis no mercado são, em sua maioria, desenvolvidos para uso recreativo ou possuem capacidade de carga relativamente baixa, o que não possibilitaria o acoplamento dos sensores. A principal diferença entre a quantidade de hélices de um VANT está ligada à estabilidade do sistema durante o voo. Os modelos com maior quantidade de hélices são mais estáveis quando submetidos a voos em condições climáticas adversas.

Para a escolha dos sensores, considerou-se como critério os que permitam a captura de imagens em diferentes faixas do espectro eletromagnético e com adequada resolução espectral para a identificação das manifestações patológicas que podem incidir sobre a OAE. A Tabela 3 relaciona alguns sensores multiespectrais, suas principais aplicações e especificações.

Tabela 3 - Sensores multiespectrais

| Sensor (marca/modelo) | Principais Aplicações | Especificações |
|---|---|---|
| <i>Tetracam/ADC Lite</i>  | Agricultura de precisão | Faixa espectral: verde, vermelho e infravermelho próximo (520 nm a 920 nm); Peso: 200 g; Imagem: 3,2 megapixels (2048x1536 pixels); |
| <i>Micasense/RedEdge</i>  | Agricultura, controle de nutrientes, prevenção de doenças e estresse dos produtos cultivados | Faixa espectral: visível e infravermelho próximo (380 nm até 900 nm); Peso: 150 g; |
| <i>FluxData/FD-3SWIR</i>  | Índice de reprodução de cor, defesa civil, pirometria, farmacêutica, processamento de comida e visão industrial | Faixa espectral: bandas do visível e infravermelho próximo (400 nm a 1700 nm); Peso: 1250 g; Imagem: 1,5 megapixels (1392x1040 pixels); |
| <i>Tetracam/ADC Air</i>  | Controle da vegetação | Faixa espectral: verde, vermelho e infravermelho próximo (520 nm a 920 nm); Peso: 630 g; Imagem: 3,2 megapixels (2048x1536 pixels); |

Fonte: Elaborado pelos autores com base em FluxData (2014), MicaSense (2015), Tetracam (2011a; 2011b)





As imagens geradas por sensores multiespectrais possuem maior potencial de identificação das manifestações patológicas do que imagens tradicionais captadas por uma câmera fotográfica convencional, pois geram arquivos contendo informações coletadas em regiões do espectro eletromagnético que não são visíveis. Conforme demonstrado por Valença (2011), qualquer um dos sensores da Tabela 3 têm potencial para a aquisição de dados no auxílio à inspeção de OAEs, pois o autor utilizou sensores multiespectrais, nos mesmos intervalos de comprimento de onda, para identificar manifestações patológicas como fissuras, colonização biológica, umidade, dentre outros.

Os sensores hiperespectrais têm o potencial de captar, para cada pixel de uma imagem, centenas de bandas contíguas na região do visível ao infravermelho e permitem a extração de espectros de reflectância para cada um desses pixels. Assim, é possível extrair das imagens captadas por estes sensores as feições espectrais de reflectância de cada material constituinte da imagem (BAPTISTA, 2012; SOUZA FILHO, 2004). Os sensores hiperespectrais analisados na pesquisa, suas aplicações e características estão descritas na Tabela 4.

Por meio da análise do comportamento espectral dos alvos, obtidos pelos sensores hiperespectrais, é possível diferenciar os pixels das imagens e identificar diversos tipos de materiais e feições. De acordo com Santos *et al.* (2015) sensores hiperespectrais conseguem identificar a presença de água nos poros das estruturas de concreto e, portanto, poderiam detectar a existência de umidade nas OAEs. Rodrigues *et al.* (2007), ao classificar uma imagem hiperespectral de um trecho urbano, conseguiram identificar através das características espectrais, diferentes tipos de vegetação presentes na imagem. Deste modo a presença de biodeterioração causada por algas ou líquens nas OAEs, também poderia ser identificada.

A análise das informações realizada computacionalmente minimizaria os riscos de erro relativo à interpretação do operador. A partir das imagens geradas, o processamento realizado por algoritmos poderia identificar previamente as manifestações patológicas existentes no elemento estrutural analisado. Esta pré-análise facilitaria o trabalho do inspetor, fazendo com que ele pudesse realizar apenas inspeções de verificação em pontos pré-definidos da OAE.

Tabela 4 - Sensores hiperespectrais

| Sensor (marca/modelo) | Principais Aplicações | Especificações |
|--|---|---|
|  BaySpec/ OCI™-UAV 1000 (VNIR) | Agricultura de precisão, sensoriamento remoto, levantamento de terra e floresta, segurança e defesa civil, exploração de gás e óleo, monitoramento de oceanos, mineração, geologia e estudos ambientais | Faixa espectral: banda do vermelho visível e infravermelho próximo (600 a 1000 nm); Nº de bandas espectrais: 100; Resolução espectral: 5nm; Peso: 320 g – 630 g; |
|  Headwall/ High-Efficiency Micro- hyperspec® (A-Series VNIR) | Aplicação específica para ambientes críticos | Faixa espectral: visível e infravermelho próximo (400 a 1000 nm); Nº de bandas espectrais: 325; Resolução espectral: 1.9 nm; Peso: 680 g sem lentes; |
|  Xenics/ Lynx 2048 (SWIR) | Espectroscopia, inspeção de alimentos; testes não destrutivos, inspeção de semicondutores, termografia de objetos e tomografia de coerência óptica | Faixa espectral: infravermelho próximo e curto (900 a 1700 nm); Peso: 150 g sem lentes; Peso lentes: 42 g – 1000 g (SWIR); |
|  Headwall/ Nano Hyperspec® (VNIR) | Aplicação específica para ambientes críticos | Faixa espectral: visível e infravermelho próximo (400 a 1000 nm); Nº de bandas espectrais: 270; Imagem: 640x480 pixels; Resolução espectral: 5nm; Peso: 520 g sem lentes; |

Fonte: Elaborado pelos autores com base em BaySpec (2014), Headwall (2015a; 2015b) e Xenics Headquarters (2015)

SOFTWARES E EQUIPAMENTOS AUXILIARES

Além dos tipos de VANTs e sensores, foram analisados nesta pesquisa os demais itens que compõem o sistema, como o controlador de voo e o suporte do sensor, foram avaliadas ainda as características que esses componentes devem apresentar para que o sistema de aquisição de imagens possa ser utilizado em inspeções de OAEs.

A principal característica que o suporte do sensor, ou gimbal, deverá apresentar é a de permitir os movimentos do sensor, para que o mesmo realize a aquisição das imagens necessárias de todos os elementos das OAEs. Ele deve estabilizar nos dois eixos, vertical e horizontal. Assim, mesmo que o VANT incline, o sensor embarcado permanecerá na posição correta para a aquisição das imagens. Devido às diferenças de tamanho entre os sensores, é provável que não se encontre um gimbal com as dimensões exatas para acoplar o sensor. Nestes casos, será necessário executar algumas adaptações ou até mesmo desenvolver um gimbal específico para o atendimento deste sistema.

Um requisito essencial para o software de controle de voo é que este permita o controle do VANT através do “modo GPS”. Além disso, é fundamental que o VANT permaneça estático para o registro das imagens com o sensor embarcado. Alguns dos sistemas de controle possuem características que garantem voos mais seguros e estáveis, bem como a comodidade ao operador. A Tabela 5 resume as características de cada software instalado nos VANTs selecionados.

Tabela 5 - Softwares de controle de voo

| Características | DJI A2 | DJI WooKong | AiProFlight | Software Gyro 1000 | Software Gyro 500 |
|---|--------|----------------|-------------|--------------------------|----------------------|
| Modalidades de voo (Manual/Atti/GPS) | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim |
| Comando ponto de interesse | Sim | Sim | Sim | Não | Não |
| Sistema a prova de falhas devido à perda do sinal | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim |
| Sistema a prova de falhas do motor | Sim | Sim | Sim | Não | Não |
| Controle de altitude | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim |
| Alerta dos níveis de bateria | Sim | Sim | Sim | Não | Não |
| Modo estabilização do gimbal (2 eixos) | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim |
| Giroscópios e acelerômetros | Sim | | Sim | Sim | Sim |

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Aibotix (2015), Drone Store (2015a), Gyrofly (2015a; 2015b) e Megacopter (2015)

Os softwares de controle de voo instalados nos modelos de VANT relacionados na Tabela 2 possuem o controle de voo no “modo GPS”, que além de possibilitar a estabilização do VANT no ar para a aquisição das imagens (comando “ponto de interesse”), garante que o voo seja totalmente independente e mais seguro em comparação com os demais. Além dos softwares, os VANTs possuem sensores giroscópios e acelerômetros instalados, os quais podem fornecer os dados necessários para compor o sistema de navegação inercial. Assim, os softwares analisados são aptos para controlar os voos de inspeção. Como características que podem ajudar na escolha do VANT em função do software instalado, pode-se citar o aviso de níveis baixos de bateria e o sistema a prova de falha dos motores. Com isso, as chances de queda e de falha seriam minimizadas e o uso de VANTs com softwares que possuam tais características garantiriam maior segurança.

De maneira geral, este sistema de aquisição de dados possibilitaria inspeções mais frequentes, atribuindo maior agilidade tanto ao diagnóstico das estruturas, quanto na execução das intervenções de reparo ou reforço estrutural. Esta análise também poderia ser usada de forma complementar às inspeções tradicionalmente executadas, agregando maior qualidade e agilidade a estas atividades. Como resultados deste trabalho, após a análise das inspeções regulamentadas pela Norma DNIT 010 – PRO (DNIT, 2004b), foi possível propor uma sugestão de uso do sistema, conforme descrito na Tabela 6.

Tabela 6 - Tipos de inspeção e sugestão de inspeção por VANTs

| Tipo de inspeção | Periodicidade (DNIT, 2004b) | Inspeção com uso de VANTs e imagens multi ou hiperespectrais |
|-------------------------|---|--|
| Inspeção cadastral | Após o término da obra/ início da utilização, ou após alguma alteração estrutural relevante | Continuaria sendo realizada pelo inspetor, mas poderia contar com o auxílio do sistema na aquisição de imagens |
| Inspeção rotineira | É uma inspeção programada e em geral acontece a cada um ou dois anos. | A inspeção poderia ser anual e intercalada, onde em um ano seria realizada pelo inspetor e no outro pelo sistema. |
| Inspeção especial | É realizada em OAEs a cada 5 anos | Neste caso a inspeção feita pelo inspetor poderia ser mantida a cada 5 anos, porém poderia ser realizada uma inspeção intermediária a cada 2,5 anos com o sistema |
| Inspeção extraordinária | Inspeção não programada, efetuada quando ocorre algum dano estrutural repentino | Continuaria sendo realizada pelo inspetor, mas poderia contar com o auxílio do sistema, conferindo agilidade e apoiando as análises do inspetor |
| Inspeção intermediária | É uma inspeção para monitorar alguma manifestação suspeita ou já detectada | Neste caso, dependendo do local da manifestação patológica, seria interessante utilizar de forma a auxiliar o sistema proposto, pois o VANT acessa com maior facilidade os pontos da estrutura |

Fonte: Elaborado pelos autores com base em DNIT (2004b)

Assim, a partir dessa pesquisa, foi visto que a aquisição de imagens multi ou hiperespectrais por VANTs tem grande potencial de auxiliar nas inspeções de OAEs, sem que as devidas inspeções tradicionais sejam extintas. A partir disso, as inspeções asseguradas em normas não seriam substituídas, e sim complementadas quanto às suas limitações, facilitando o trabalho de inspeção e diagnóstico.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da identificação dos elementos da estrutura a serem inspecionados e pelas normas que definem as diretrizes para inspeções, foi possível definir quais os componentes necessários para o sistema de aquisição remota de imagens, composto por VANT, sensor, software, controle de voo e gimbal. Além disso, foram apresentados e discutidos os requisitos mínimos para cada um destes componentes a fim de que este sistema possa ser utilizado com segurança para a inspeção da meso e supraestrutura de OAEs.

Dentre os VANTs, foram selecionados os de asas rotativas (quadri, hexa e octacópteros), pois estes possuem capacidade para transportar o sensor durante os voos, movimentando-se em todas as direções para o acesso aos elementos da estrutura de forma segura. Os modelos considerados aptos foram os VANTs *DJI S1000, Turbo Ace X88, Aibot X6, DJI S900, Gyro 1000 X4 e Gyro 500 X4*.

Os sensores multiespectrais *ADC Lite, RedEdge, FluxData FD-3SWIR, ADC Air* e hiperespectrais *OCI-UAV 1000, High-Efficiency Micro-hyperspec, Lynx 2048 e Nano Hyperspec*, mencionados neste estudo, são considerados aptos a realizar a aquisição das imagens, pois possibilitariam a identificação de fissuras, biodeterioração, umidade, entre outras manifestações patológicas que as OAEs possam vir a apresentar.

Em relação ao software de controle de voo, todos mencionados no trabalho são adequados para compor o sistema, pois possuem modalidades de voo por meio de sistemas GPS. Para garantir maior segurança, pode-se optar por VANTs cujo software de controle de voo possua o alerta de baixos níveis de bateria e sistema a prova de falhas do motor.

Para o desenvolvimento dos primeiros protótipos, alguns componentes do sistema podem requerer adaptações, como é o caso do gimbal. A exigência principal para este equipamento é que ele apresente um sistema de rotação horizontal e vertical para que o sensor acoplado possa efetuar o registro das imagens de todos os pontos da estrutura.

A partir da análise dos resultados, foi possível concluir que este tipo de sistema garantiria agilidade e segurança nas inspeções das pontes e viadutos e o processamento das imagens obtidas pelos sensores auxiliaria o inspetor na interpretação e no diagnóstico das manifestações patológicas. Logo, os intervalos de tempo entre as inspeções poderiam diminuir, favorecendo a redução dos custos de manutenção e também levando a um aumento na vida útil da estrutura. Além disso, a inserção desse sistema de aquisição de dados proporcionaria um avanço tecnológico significativo nas atividades de inspeção.

Os dados contidos nos relatórios de inspeção poderiam ser substituídos ou complementados pelas informações digitais coletadas pelos sensores, melhorando quanti e qualitativamente os resultados destas análises. Futuramente, as inspeções poderiam ser realizadas digitalmente, por meio de um modelo 3D completo da estrutura, e desta forma, abordando a multidisciplinaridade da inspeção por diversos profissionais, não dependendo apenas do critério do inspetor.

A busca por sistemas de aquisição de imagens visando complementar e auxiliar as inspeções de obras de arte especiais é um assunto emergente no mundo todo. No entanto, no Brasil, esse tema começa a dar os primeiros passos. Muitos estudos deverão ser desenvolvidos objetivando a aplicação e validação das metodologias aqui sugeridas, para testar a viabilidade de aplicação do sistema, e desta forma identificar as potencialidades ou outras limitações aqui não identificadas.

Bibliographical analysis on the potential of the acquisition of multi and hyperspectral images by UAVs to help the inspection in bridges

Bridges arose with the intention to facilitate the urban mobility. Therefore, it is essential the realization of periodic inspections and preventive maintenance, in order to identify possible pathological manifestations. Nowadays the techniques used are based on visual inspection, which the main problem is accessibility to all places in the bridge. In this sense, it is search other methods that can help these inspections, such as the use of unmanned aerial vehicles (VANTs) and multi and hyperspectral images. The methodology of the work consisted on the analysis of the current methods of inspection and identification of its requirements to compose solutions using the remote acquisition system. The inspection with this system ensures agility and security, as well as aid in the interpretation and analysis for the diagnosis of pathological manifestations.

KEYWORDS: Bridges. Unmanned aerial vehicles. Pathological Manifestations. Inspections.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT *NBR 9452* - Vistoria de Pontes e Viadutos de Concreto - Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2012.

Agostinho, S. L. **Inspeção e monitorização de estruturas em engenharia civil: utilização de UAV na inspeção e monitorização**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade da Madeira, Portugal 2012.

Aibotix The Aibot X6 saves time and costs, 2015. Disponível em: <<https://www.aibotix.com/en/inquiry.html>>. Acesso em: 16 set. 2015.

Baptista, G. M. M. **Processamento de dados hiperespectrais**. In: Meneses, P. R. e Almeida, T. (eds.). Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto, 2012, p. 221-238. Editora UnB, Brasília, DF.

Bayspec OCITM – UAV hyperspectral camera: aerial hyperspectral imaging at your fingertips, 2014. Disponível em: <<http://www.bayspec.com/spectroscopy/oci-uav-hyperspectral-camera/>>. Acesso em: 11 set. 2015.

DCEA AIC N 21/10: veículos aéreos não tripulados. Departamento de Controle do Espaço Aéreo, Rio de Janeiro, 2010.

Delamura, D. Argentina libera regulamentação para uso de drones, 2015. MundoGeo, [s.l.]. Disponível em: <<http://mundogeo.com/blog/2015/07/16/argentina-libera-regulamentacao-para-o-uso-de-drones/>>. Acesso em: 04 out. 2015.

DNIT. **Manual de inspeção de pontes rodoviárias**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2004a (Publicação IPR - 709).

DNIT. **Norma DNIT 010/2004 – PRO: inspeções em pontes e viadutos de concreto armado e protendido – Procedimento**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2004b.

Drone Store DJI S1000 Plus + A2 + Z15, 2015a. Disponível em: <<http://dronestore.com.br/produto/dji-s1000-plus-a2-z15-escolha-o-gimbal/8218>>. Acesso em: 14 set. 2015.

Drone Store S900 Spreading Wings com A2, 2015b. Disponível em: <<http://dronestore.com.br/produto/s900-spreading-wings-com-a2/10002>>. Acesso em: 14 set. 2015.

Ellenberg, A; Kontsos A.; Moon F. e Bartili I. Bridge related damage quantification using unmanned aerial vehicle imagery. **Structural Control and Health Monitoring**, 2016, v. 23, p. 1168-1179.

Fluxdata Incorporated FD-1665 3CCD Multispectral Camera, 2014. Disponível em: <<http://www.fluxdata.com/products/fd-1665-ms3>>. Acesso em: 11 set. 2015.

Gorkos, P.; Bordin, F.; Veronez, M. R.; Santos, J. P.; Santos, A. e Larocca, A. P. **Studying the spectral behavior of concrete for evaluation non-destructively of resistance in situ**. 2016 In: Bittencourt, T. N.; D. M. Frangopol e A. Beck. (Org.). Maintenance, Monitoring, Safety, Risk and Resilience of Bridges and Bridge Networks, p. 2473-2479. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA.

Gyrofly Gyro 1000 X4: aeronave de maior produtividade para suas operações, 2015a. Disponível em: <<http://www.gyrofly.com.br/gyro-1000-x4>>. Acesso em: 15 set. 2015.

Gyrofly Gyro 500 X4: projetado para você ter tudo sob controle, 2015b. Disponível em: <<http://www.gyrofly.com.br/gyro-500-x4>>. Acesso em: 15 set. 2015.

Hallermann, N. & Morgenthal, G. Visual inspection strategies for large bridges using Unmanned Aerial Vehicles (UAV). 2014, **Proc. of 7th IABMAS**, International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management.

Headwall High efficiency micro-hyperspec: sensors provide superb spectral/spatial imaging and very high sensitivity in a small, lightweight, power-efficient package, 2015a. Disponível em: <<http://www.headwallphotonics.com/spectral-imaging/hyperspectral/micro-hyperspec>>. Acesso em: 10 set. 2015.

Headwall Nano-hyperspec: small, light airborne hyperspectral sensor, 2015b. Disponível em: <<http://www.headwallphotonics.com/spectral-imaging/hyperspectral/nano-hyperspec>>. Acesso em: 10 set. 2015.

Kim, J. W.; Kim; S. B.; Park, J. C. e Nam; J. W. Development of crack detection system with unmanned aerial vehicles and digital image processing, 2015. **Advances in Structural engineering and Mechanics**, ASEM15.

Mader, D., Blaskow, R., Westfeld, P., & Weller, C. Potential of UAV-based Laser Scanner and multispectral camera data in building inspection, **2016 International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, 41.

Máthé, K. e L. Bosoniu. Vision and control for UAVs: a survey of general methods and of inexpensive platforms for infrastructure inspection. 2015. **Sensors**, v. 15, n. 7, 14887-14916.

Megacopter Wookong-m: DJI WKM multirotor, (2015?). Disponível em: <<http://megacopter.com.br/item/Wookong%252dm-%28DJI-WKM-Multirotor-%29.html>>. Acesso em: 17 set. 2015.

Meneses, P. R. **Sensores imageadores multiespectrais na faixa óptica**. In: Meneses, P. R. e Almeida, T. (eds.). Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto, 2012, p. 34-46, UnB, Brasília, DF.

Metni, N. e T. Hamel. A UAV for bridge inspection: Visual servoing control law with orientation limits. **Automation in Construction**, 2006, v. 17, p. 3–10.

Micasense MicaSense RedEdge: multispectral sensing for any platform, 2015. Disponível em: <<http://www.micasense.com/#products>>. Acesso em: 10 set. 2015.

Pavi, S.; Gorkos, P.; Bordin, F.; Veronez, M. R. e Kulakowski, M. P. **Laser Scanner in identification of pathological manifestations in concrete**. 2015. In: Pedro Pacheco, Filipe Magalhaes. Multi-Span Large Bridges, v. 1, p. 879-886. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA.

Rathinam, S.; Kim, Z. & Sengupta, R. Vision-based following of structures using an unmanned aerial vehicle (UAV). Institute of Transportation Studies, 2006.

Rodrigues, L. M.; Resende; M. R. E Timoszuk; A. P. Sistema de imageamento hiperespectral de alta resolução embarcado em plataforma aérea de baixo custo. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2007, INPE, p. 7079-7085.

Santos, R. S.; Rolim, S. B. A. e Pulgati, F. H. Application of visible and near infrared spectroscopy in non-destructive evaluation of cement materials. **International Journal of Remote Sensing**, 2015, v. 36, p. 917-938.

Souza Filho, C. R. Sensoriamento remoto hiperespectral, 2004. MundoGeo. [S.l.]. Disponível em: <<http://mundogeo.com/blog/2004/08/23/sensoriamento-remoto-hiperespectral/>>. Acesso em: 04 abr. 2015.

Starek, M. e Jung, J. The state of lidar for UAV applications: lidar next geospatial frontier. **GIM International**, 2015, v. 29, p. 25, 2015.

Tetracam INC. ADC Air: The Weather-proof ADC Ideal for manned aircraft, 2011a. Disponível em: <http://www.tetracam.com/Products-ADC_Air.htm>. Acesso em: 10 set. 2015.

Tetracam INC. ADC Lite: Tetracam's lightweight ADC Ideal for unmanned aircraft, 2011b. Disponível em: <http://www.tetracam.com/Products-ADC_Lite.htm>. Acesso em: 10 set. 2015.

Trew, J. 3D robotics takes on DJI with solo smart drone, 2015. Engadget, [S.l.]. Disponível em: <<http://www.engadget.com/2015/04/13/3d-robotics-solo-smart-drone/>>. Acesso em: 02 out. 2015.

Tribunal de Contas Da União TC 003.134/2011-3. TCU, Brasília, 2012. Disponível em: <http://portal3.tcu.gov.br/portal/page/portal/TCU/imprensa/noticias/noticias_arquivos/Dnit%2020Artes%20Especiais>. Acesso em: 15 mai. 2015.

Turbo Ace Turbo Ace X88-J2 octocopter w/ devo 7 RTF: DJI WK-M, GPS/carefree modes, BL motors, 35A ESC's, foldable, 6LB payload-gigantic octo sale, 2015. Disponível em: <<http://www.turboace.com/turboacex88-j2octocopterwdevo7rtfdjiwk-mgpscarefreemodesblmotors35aescsfoldable6lbpayload-giganticosale.aspx>>. Acesso em: 13 out. 2015.

UAV Brasil VANT Civil X6, 2015. Disponível em: <<http://www.uav-online.com.br/uav/vants>>. Acesso em: 16 set. 2015.

Valença, J. M. A. **Monitorização do estado de conservação de estruturas de betão por processamento de imagem e análise multiespectral**. Dissertação (doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2011.

Vitório, J. A. P. Vistorias, conservação e gestão de pontes e viadutos de concreto. **Anais do 48º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2006, p. 1-16. Ibracon, Rio de Janeiro, RJ.

Xenics Headquarters Lynx-2048-GigE: high resolution, high speed uncooled SWIR line-scan camera World's highest resolution: SWIR line-scan camera with excellent sensitivity, 2015. Disponível em: <<http://www.xenics.com/pt/camera/lynx-2048-gige>>. Acesso em: 13 ago. 2015.

Zink e Lovelace Unmanned Aerial Vehicle Bridge Inspection Demonstration Project. Minnesota Department of Transportation - Research Services & Library, St. Paul, MN, USA, 2015.

Recebido: 22 mai. 2017

Aprovado: 22 mar. 2018

DOI: 10.3895/rbgeo.v6n1.5924

Como citar: RAUBER, E. R.; BORDIN, F.; ANSCHAU, M.; VERONEZ, M. R.; GONZAGA Jr., I; FRAMARIM, c. Análise bibliográfica sobre as potencialidades da aquisição de imagens multi e hiperespectrais por VANTs no auxílio à inspeção de obras de arte especiais. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 44-61, jan/mar. 2018. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Fabiane Bordin

Av. Unisinos, 950, CEP 93022-750, São Leopoldo, Rio Grande do Sul, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

