

Avaliação da Técnica de Casamento de Imagens para Navegação Autônoma de VANTs

Carlos Anderson Oliveira Silva
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901
Belo Horizonte, MG, Brasil
Email: calicinio@gmail.com

Gustavo Augusto Mascarenhas Goltz
Instituto de Pesquisas da Marinha
Rio de Janeiro, RJ
Email: gustavo_goltz@yahoo.com.br

Élcio Hideiti Shiguemori
Instituto de Estudos Avançados
São José do Campos, SP
Email: elcio@ieav.cta.br

Cristiano Leite de Castro
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, MG
Email: crislcastro@ufmg.br

Haroldo Fraga de Campos Velho
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
São José dos Campos, SP
Email: haroldo@lac.inpe.br

Antônio Pádua de Braga
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, MG
Email: apbraga@ufmg.br

Resumo—Este artigo apresenta resultados da abordagem de casamento de imagens aplicada à estimativa de posição para a navegação autônoma de VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados). O cálculo da posição absoluta se dá com a uniformização das imagens via extração de bordas e descoberta da posição na imagem georreferenciada que fornece a maior correlação com a imagem capturada em tempo de voo. A avaliação do método considera diferentes tipos de terreno (floresta, rodovia e zona urbana) e também sua capacidade em seguir rotas reais especificadas em um simulador de voo. Os resultados obtidos são promissores e indicam que nosso sistema de visão pode ser usado na substituição do GPS (*Global Positioning System*) em voos reais.

Keywords—VANT, navegação autônoma, casamento de imagens, extração de bordas, RBF, Canny.

I. INTRODUÇÃO

Sistemas de navegação autônoma de VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) frequentemente fazem uso dos sensores inercial (do inglês INS - *Inertial Navigation System*) e de posicionamento global por satélite (do inglês GPS - *Global Positioning System*). Caso o sinal de GPS, por algum motivo, se torne indisponível ou corrompido, a estimativa da posição fornecida apenas pelo INS diverge no tempo e tende a se tornar inútil dentro de poucos segundos [1], [2].

Falhas no sinal de GPS podem ser ocasionadas por diversos fatores, tais como perturbações na ionosfera [3], muito comuns na América do Sul, vulnerabilidade a *jamming* e ataques maliciosos. Adicionalmente, por não ser uma tecnologia nacional, seu uso para operações sigilosas (militares) fica restrito [2], [4]. Por essas razões, um sistema de navegação autônoma capaz de lidar com falhas de GPS, de curto ou longo prazo, é muito útil. Uma solução potencial para este problema é substituir o GPS por um sistema de visão computacional, capaz de estimar a posição geográfica da aeronave a partir de imagens capturadas em tempo real ao longo do voo.

Navegação visual de VANTs tem sido um tópico de grande interesse na literatura e diversas soluções têm sido propostas.

Entre elas pode-se citar as técnicas de navegação baseadas em SLAM (do inglês *Simultaneous Localization and Mapping*) [1], [5], em reconhecimento de pontos de referência (*landmarks*) [4], em odometria por imagens [2], [6], dentre outras. Contudo, a solução a ser proposta para o problema de navegação visual deve levar em consideração restrições relacionadas à velocidade de processamento da técnica empregada, carga útil da aeronave e variações nas imagens devido a ações do homem, tempo e luminosidade.

Uma abordagem recentemente investigada por nosso grupo de pesquisa é baseada no casamento de imagens do terreno sobrevoado com imagens de satélite georreferenciadas [7]–[9]. Partindo-se de uma rota planejada para o VANT, o casamento de imagens permite aferir se este encontra-se em rota ou se houve algum desvio. Na hipótese de que a rota não esteja sendo seguida, pode-se então corrigir a trajetória para que a aeronave possa cumprir com êxito o seu planejamento de voo. A estimativa da posição absoluta se dá com a uniformização das imagens via extração de bordas e descoberta da posição na imagem georreferenciada que fornece a maior correlação com a imagem aérea. Quando o casamento é realizado corretamente, a posição calculada por este procedimento é similar àquela fornecida pelo GPS.

Como uma extensão de nossos estudos anteriores [7]–[9], este artigo tem como objetivo avaliar o desempenho da abordagem de casamento de imagens sob duas perspectivas: (i) com relação a diferentes tipos de terreno (floresta, rodovia e zona urbana) e, (ii) sua capacidade em seguir rotas reais especificadas em um simulador de voo. A avaliação considera também o desempenho de dois diferentes métodos de extração de bordas: *Canny* e RBF (do inglês *Radial Basis Functions*). Os resultados obtidos são promissores e indicam que nosso sistema de visão pode ser usado na substituição do GPS em voos reais.

Para que fosse possível realizar testes com o simulador de voo, uma etapa deste trabalho envolveu a implementação dos algoritmos de casamento de imagens em um sistema computacional [8], cuja finalidade é permitir a comunicação

(via TCP-IP) entre o banco de imagens georreferenciadas e o simulador de voo. A incorporação de nossos algoritmos a este sistema possibilitou o planejamento de uma rota, a captura de imagens em tempo de voo (simulando a câmera acoplada ao VANT), bem como a coleta de coordenadas geográficas reais e obtidas pelo processo de casamento de imagens.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II fornece uma visão geral do sistema de navegação visual como uma alternativa ao uso do GPS. A Seção III descreve o mecanismo de casamento de imagens, detalhando as técnicas usadas para extração de bordas. O protocolo usado nos experimentos e os resultados obtidos são discutidos nas Seções IV e V, respectivamente. Finalmente, a Seção VI traz as conclusões.

II. SISTEMA DE VISÃO

O sistema de visão proposto estima a posição do VANT através de informações extraídas do sensor inercial, do computador de bordo e de um mecanismo que faz o casamento da imagem capturada pela câmera do VANT com a imagem georreferenciada, conforme ilustrado no diagrama da Figura 1.

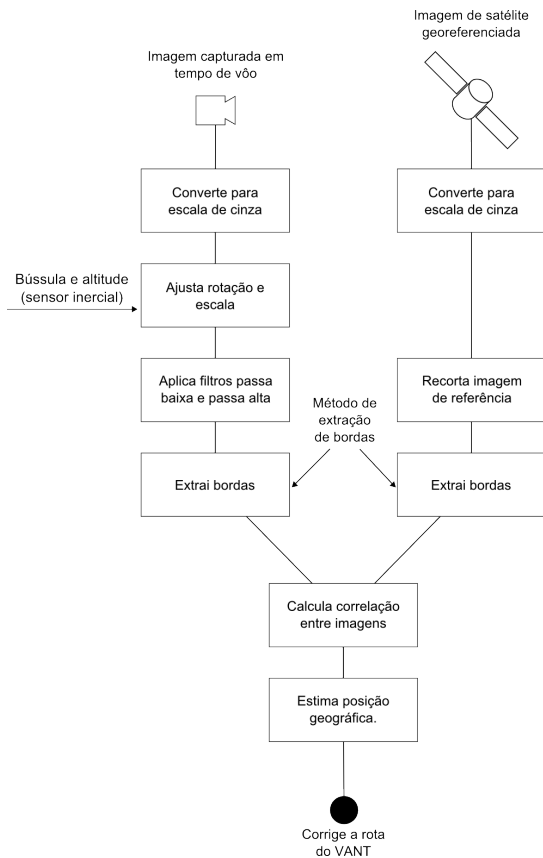


Figura 1. Sistema de visão baseado em casamento de imagens.

O mecanismo de casamento de imagens (do inglês *template matching* [8]) possui dois estágios principais: extração de características (bordas) e correlação espacial para estimação da posição geográfica, os quais serão detalhados na Seção III, a seguir.

Fatores que dificultam o casamento de imagens são as diferenças de escala, rotação, luminosidade e resposta espectral

entre as imagens *template* (capturada pela câmera do VANT) e *target* (imagem de satélite georreferenciada). Conforme observado em nosso trabalho anterior [7], estes fatores podem ser contornados aplicando-se os seguintes procedimentos:

- captura em visada nadir, eliminando efeitos de perspectiva [10];
- conversão para tons de cinza;
- aplicação de um filtro de mediana [11] com uma máscara de convolução 3x3 para eliminação de pequenos detalhes;
- correção de rotação através de informação de posição de proa fornecida pela bússola do VANT;
- correção do fator de escala através de informação de altitude fornecida pelo computador de bordo do VANT;
- aplicação de filtro passa-baixa [11] para suavização da imagem e eliminação de detalhes do terreno;
- aplicação de filtro passa-alta [11] para realçar as bordas da imagem.

Das etapas de pré-processamento acima descritas, é importante ressaltar que as correções envolvendo rotação e escala são aplicadas apenas na imagem capturada pelo VANT. Além disso, os fatores ligados às diferenças de luminosidade e resposta espectral são eliminados, inerentemente, através das metodologias de extração de bordas, a serem discutidas na Seção III.

Em se tratando da imagem georreferenciada, o *target* é obtido a partir de um recorte feito com base na informação de localização fornecida pelo sensor inercial. Esta posição se torna o ponto central da imagem. A partir deste ponto são acrescidos n pixels nas direções norte, sul, leste e oeste, onde n é a metade do tamanho pretendido para aquela imagem. As dimensões das imagens alvo e *template* são discutidas na Seção V.

III. CASAMENTO DE IMAGENS

Como mencionado anteriormente, o mecanismo de casamento de imagens é baseado em um extrator de bordas e posterior aplicação de correlação espacial entre pixels. A escolha de um extrator baseado em bordas se deu pelo fato das bordas serem bastante robustas às mudanças de luminosidade [2]. A imagem georreferenciada e a imagem capturada pela câmera do VANT são geralmente produzidas em instantes distintos, o que faz com que haja uma diferença nas condições de luminosidade no momento de sua captura. Faz-se portanto necessário, um extrator que produza características robustas às condições de luminosidade. Para extração das bordas duas técnicas foram usadas: filtro de *Canny* [12] e redes neurais do tipo *Radial Basis Function* (RBF) [13]. Tais técnicas são descritas nas Seções III-A e III-B, a seguir.

Uma vez que as bordas das imagens *target* e *template* são extraídas, o casamento é feito com base na sua correlação. O cálculo da correlação no domínio espacial é dado pela Equação 1,

$$c(s, t) = \sum_x \sum_y F(x, y)W(x - s, y - t) \quad (1)$$

onde $c(s, t)$ denota a correlação c dos pixels (s, t) , com $s = 0, 1, \dots, M - 1$ e $t = 0, 1, \dots, N - 1$; M e N correspondem às dimensões da matriz F que armazena as bordas da imagem georreferenciada (*target*); W com dimensões $J \times K$, com $J \leq M$ e $K \leq N$, representa a matriz que armazena as bordas da imagem capturada pelo VANT (*template*).

A partir da Equação 1, a posição do VANT pode ser estimada da seguinte forma: registra-se a posição (s^*, t^*) de maior correlação entre as matrizes F (*target*) e W (*template*) e toma-se as coordenadas do pixel de F que coincidem com o pixel central de $W(x - s^*, y - t^*)$.

A imagem *template* deve ter dimensões ímpares para que seja possível tomar como referência seu pixel central. As coordenadas do pixel na imagem georreferenciada que coincidem com o pixel central da imagem aérea correspondem à posição geográfica do VANT.

A. Detector de bordas de Canny

O detector de *Canny* é um filtro de convolução robusto ao ruído. *Canny* [12] definiu três critérios que um filtro de detecção de bordas deve atender, o qual ele denominou de filtro ótimo:

- 1) Boa detecção: o detector de bordas deve encontrar somente bordas, consistindo na maximização da razão sinal/ruído.
- 2) Boa localização: a distância entre os pixels de borda encontrados pelo detector deve ser a menor possível com os pontos de bordas bem localizados.
- 3) Apenas uma resposta para um única aresta: evita que o detector de bordas identifique múltiplos pixels de borda onde somente exista um único pixel.

Logo um filtro para detecção de bordas envolve a maximização do itens 1 e 2, o que equivale a maximização do produto entre eles [12], conforme a Expressão 2 a seguir

$$\left(\frac{|\int_{-w}^w G(-x)f(x)dx|}{n_0 \sqrt{\int_{-w}^w f^2(x)dx}} \right) \left(\frac{|\int_{-w}^w G'(-x)f'(x)dx|}{n_0 \sqrt{\int_{-w}^w f'^2(x)dx}} \right) \quad (2)$$

onde $f(x)$ é a resposta de impulso do filtro definido no intervalo $[-w; w]$, $G(x)$ é uma borda unidimensional e n_0 a quantificação do ruído da imagem. Assume-se que a borda está centrada em $x = 0$.

A condição de filtro ótimo (Expressão 2) deve ainda atender ao terceiro critério (item 3). A ideia básica é que deve haver um único ponto de borda onde existe uma única borda verdadeira [12]. A expressão matemática para a distância (X_{max}) entre máximos adjacentes na resposta do filtro $f(x)$ é dada pela Equação 3.

$$X_{max} = 2\pi \left(\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f'^2(x)dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} f''^2(x)dx} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Assim, ao maximizar a condição dada pela Expressão 2, deve-se também garantir que X_{max} seja o maior possível, aumentando a possibilidade de separação entre máximos verdadeiros e máximos falsos na saída do filtro $f(x)$.

A Figura 2 ilustra um exemplo da aplicação do extrator *Canny* a uma imagem de satélite georreferenciada.

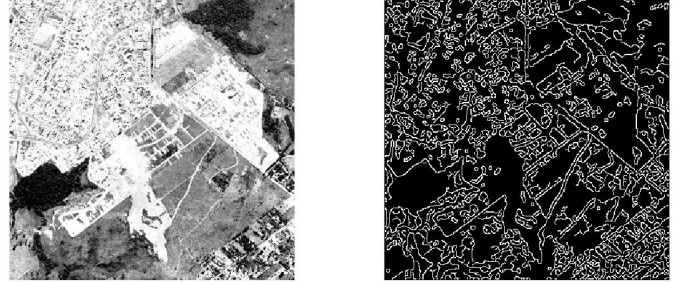


Figura 2. Exemplo da aplicação do extrator de bordas *Canny* em uma imagem de satélite

B. Detector de bordas via RBF

RBF (*Radial Basis Function*) é considerada uma rede neural do tipo *feed-forward* que usa funções de base radial como funções de ativação dos neurônios da camada escondida. O mapeamento entrada-saída produzido pela RBF devido a apresentação de um padrão arbitrário $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$ é dado por [13]

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^h w_j \exp \left(-\frac{\|\mathbf{x} - c_j\|^2}{2\sigma_j^2} \right) \quad (4)$$

onde c_j e σ_j representam, respectivamente, o centróide e o raio para o j -ésimo neurônio da camada escondida.

A extração de bordas via RBF se deu a partir do aprendizado pela rede dos possíveis padrões de borda presentes em uma imagem, sendo que cada padrão possui um valor associado (saída desejada), conforme ilustrado pela Figura 3.

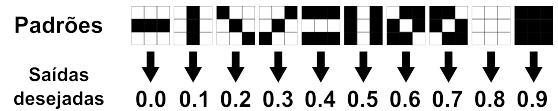


Figura 3. Padrões de treinamento representando as possíveis bordas de uma imagem.

Durante o processo de treinamento, os vetores centróide (c_j) e raio (σ_j) de cada neurônio oculto foram estimados a partir do algoritmo de agrupamento *Fuzzy C-Means* [14]. Os pesos da camada de saída (w_j) foram calculados segundo a regra de Widrow-Hoff [13]. A camada de saída possui um único neurônio com função de ativação sigmoide logística, com saída entre 0 e 1.

Uma vez treinada, o processo de extração de bordas via RBF ocorre da seguinte forma: desliza-se um quadro de tamanho 3×3 sobre a imagem a ser processada, um pixel por iteração, da esquerda para direita até o final da linha, quando então o quadro desliza um pixel pra baixo e percorre novamente a imagem da esquerda para direita. Cada quadro

pode ser visto como um vetor de 9 posições, correspondendo a um padrão de entrada para a rede RBF. O escalar obtido na saída da rede é comparado com os valores de saída associados a cada padrão de treinamento (vide Figura 3). O padrão de treinamento cuja saída mais se aproxima da saída da RBF fornece seu valor central (0 ou 1) à posição correspondente na imagem processada.

No processo de extração de bordas das imagens, a rede RBF que apresentou melhor desempenho sobre um conjunto independente de validação foi a de arquitetura 9:5:1.

IV. EXPERIMENTOS

Para avaliar a acurácia do sistema de navegação visual foram realizados dois experimentos. O primeiro teve como objetivo testar sua acurácia frente a diferentes tipos de terreno. Isso se justifica pelo fato de que o reconhecimento baseado em bordas pode ter seu desempenho prejudicado em imagens contendo terrenos não estruturados, tais como regiões de floresta e zona rural. Por outro lado, é esperado que seu desempenho seja melhor em terrenos contendo características “robustas” como, por exemplo, em interseções de rodovias e construções urbanas. Um banco de dados foi então formado a partir da seleção de 80 imagens de satélite da cidade de São José do Campos - SP. As imagens desse banco foram classificadas, por inspeção visual, em três grupos: Floresta, Rodovia e Urbana.

O objetivo do segundo experimento foi verificar a capacidade do método em seguir uma rota planejada usando um simulador de voo. Para tanto, nossos algoritmos de casamento de imagens tiveram que ser implementados em um sistema computacional [8], cuja finalidade é a comunicação (via TCP-IP) entre o mapa de imagens georreferenciadas e o simulador FlightGear [15]. A incorporação de nossos algoritmos a este sistema possibilitou o planejamento de uma rota, a captura de imagens em tempo de voo (simulando a câmera acoplada ao VANT) e a coleta dos seguintes dados: altitude, posição de proa, coordenadas geográficas reais e obtidas pelo sistema de visão.

Em ambos os experimentos, a distância Euclidiana foi usada como métrica de desempenho para calcular a diferença entre a posição real (obtida previamente) e a posição calculada via casamento de imagens. No caso do primeiro experimento, essa distância foi calculada em relação aos pixels das imagens. O processo de escolha do pixel que representa a posição real é descrito na Seção V-A. Um falso positivo (FP) foi considerado quando a distância, em pixels, é maior que 100. No caso do experimento usando o simulador de voo, a distância foi calculada em relação a posição geográfica (latitude e longitude) real da aeronave. O cálculo dessa distância é dado de acordo com a equação [16]

$$d = R_T \arccos(\cos(lat_1) \cos(lat_2) \cos(lon_1 - lon_2) + \sin(lat_1) \sin(lat_2)) \quad (5)$$

onde R_T representa o raio médio da circunferência da terra, lat_1 , lat_2 , lon_1 e lon_2 são, respectivamente, as latitudes e longitudes relativas a duas posições. Seguindo a recomendação de [2], um falso positivo foi considerado quando essa distância, em metros, é maior que 200.

V. RESULTADOS

A. Tipos de terreno

A avaliação do sistema de visão frente a diferentes tipos de terreno se deu a partir do casamento entre os *targets* (350x350 pixels) pertencentes ao banco de imagens e seus correspondentes *templates*. Cada *template* foi gerado a partir da escolha aleatória de um pixel $\alpha(x, y)$ no *target*, o qual representa a posição real da aeronave. A acurácia da posição estimada pelo sistema de visão pôde então ser calculada como a distância Euclidiana entre $\alpha(x, y)$ e o pixel de maior correlação retornado via processo de casamento de imagens descrito na Seção III. A imagem *template*, com dimensão 119x119 pixels, foi gerada tomando-se 59 pixels nas direções norte, sul, leste e oeste a partir de $\alpha(x, y)$. A Figura 4 ilustra a geração da imagem *template*.

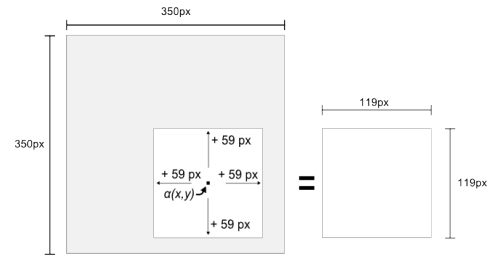


Figura 4. Geração da imagem *template* a partir do pixel $\alpha(x, y)$.

Para simular a diferença da resposta espectral causada pelos diferentes sensores, um filtro Gaussiano de dimensão 5x5 e $\sigma = 2$ foi aplicado a cada imagem *template* gerada [11]. O resultado da aplicação deste filtro é ilustrado na Figura 5.



Figura 5. Resultado da aplicação do Filtro Gaussiano.

A Tabela I compara os resultados obtidos pelos extratores *Canny* e RBF para todas as 80 imagens pertencentes ao banco de imagens. Todos os valores foram obtidos em função da distância Euclidiana. São listadas a distância média, a moda e o número de falsos positivos (FP), representando o número de estimativas de posição com distância superior a 100 pixels.

Tabela I. RESULTADOS A PARTIR DO BANCO DE IMAGENS.

Método	distância média	moda	FP
RBF	2.6487	1.4142	1
<i>Canny</i>	0	0	0

A Tabela I mostra que o casamento de imagens via extrator *Canny* foi capaz de estimar corretamente a posição real da aeronave para todas as 80 imagens, independentemente do tipo de terreno. O mesmo já não pode ser afirmado do extrator RBF, que embora tenha alcançado um valor pequeno para o erro

médio em relação a posição real, apresentou um erro do tipo falso positivo. A Figura 6 ilustra as distâncias obtidas pela RBF para todas as 80 imagens do banco. O falso positivo ocorre no casamento do *target* 52, que possui uma parcela dominante de terreno não-estruturado (tipo Floresta), conforme pode ser visto na Figura 7.

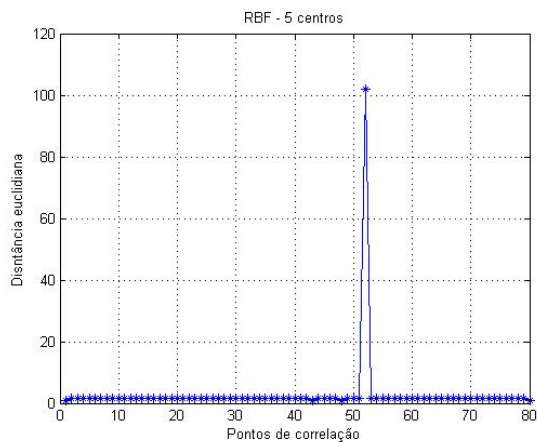


Figura 6. Distâncias obtidas por RBF para todas as 80 imagens do banco.



Figura 7. Imagem 52 apresentando terreno não-estruturado.

A Tabela II divide os resultados por terreno: Floresta, Rodovia e Urbana. Como esperado, Canny mostrou-se insensível ao tipo de terreno. Já o RBF, mostrou-se melhor com terrenos contendo características estruturadas (Rodovia e Urbana) do que com texturas não estruturadas da classe Floresta.

Tabela II. RESULTADOS POR TIPOS DE TERRENO.

Classe	no. de imagens	Método	distância média	moda	FP
Floresta	29	RBF	4.834087	1.414214	1
		Canny	0	0	0
Rodovia	13	RBF	1.382351	1.414214	0
		Canny	0	0	0
Urbana	38	RBF	1.414214	1.414214	0
		Canny	0	0	0

B. Simulador de voo

A Tabela III compara os desempenhos dos extratores Canny e RBF na estimativa de posições sobre uma rota planejada no simulador *FlightGear*. Encontram-se listados o número total de estimativas de posição ao longo da rota (No. estimativas), a distância média medida em relação a posição real, a moda, e as taxas de falsos positivos (FP) e de verdadeiros positivos

(TP). As rotas calculadas via Canny e RBF podem ser visualizadas juntamente com a rota planejada nas Figuras 8 e 9, respectivamente.

Tabela III. DESEMPENHOS DOS EXTRATORES Canny E RBF NA ESTIMATIVA DE POSIÇÕES SOBRE UMA ROTA PLANEJADA NO SIMULADOR

Método	No. estimativas	Distância média (m)	Moda (m)	FP(%)	VP(%)
RBF	26	307.76	2.06	46.15	53.85
Canny	85	144.29	1.25	25.9	74.1

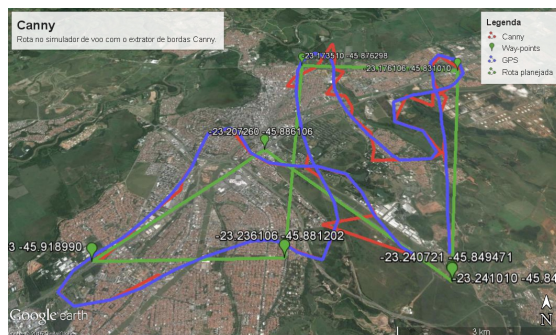


Figura 8. Trajeto do VANT utilizando Canny.

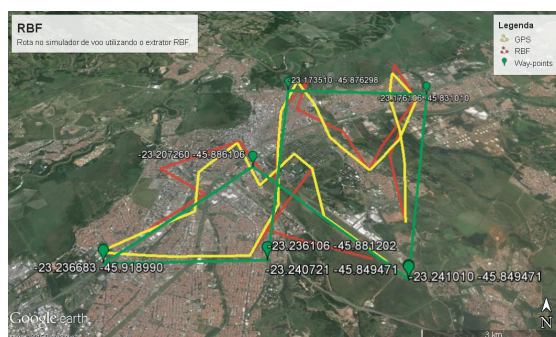


Figura 9. Trajeto do VANT utilizando RBF.

A Tabela III mostra que, ao longo da mesma rota, Canny calculou a posição 85 vezes enquanto RBF calculou apenas 26 vezes. Essa diferença pode ser atribuída ao custo dispendido por cada um desses métodos durante a extração de bordas das imagens. Adicionalmente, Canny obteve desvio médio em relação a posição real inferior a 200 metros e uma taxa menor de falsos positivos quando comparado ao RBF. Cabe ressaltar, no entanto, que apesar dessas diferenças, ambos os métodos foram capazes de atingir os *way-points* da rota planejada, conforme mostrado nas Figuras 8 e 9.

No canto superior direito das Figuras 8 e 9 pode-se notar um desvio proposital na trajetória do VANT. Isso ocorre porque o sistema NAV [8], originalmente, possui uma configuração que indica um obstáculo entre aqueles *way-points*. Essa é uma característica inerente do simulador de voo utilizado e não prejudica a análise dos resultados feita neste estudo.

Uma análise detalhada dos desvios entre a localização real e a localização obtida considerando todas as estimativas de posição é dada pelas Figuras 10 e 11. Nota-se com base nestas figuras que Canny apresenta menor variância que RBF, sendo capaz de estimar inúmeras posições com desvios (em metros) bem próximos de zero.

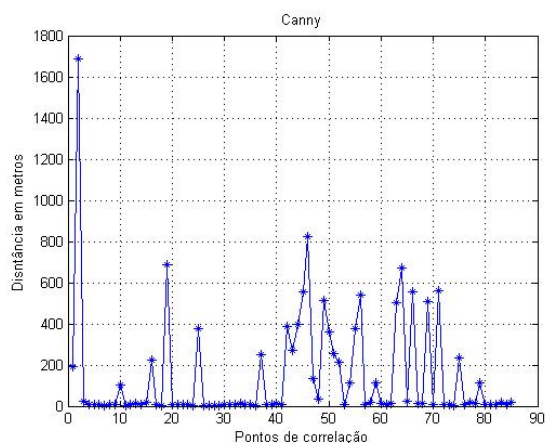


Figura 10. Desvios obtidos por *Canny* no simulador do voo.

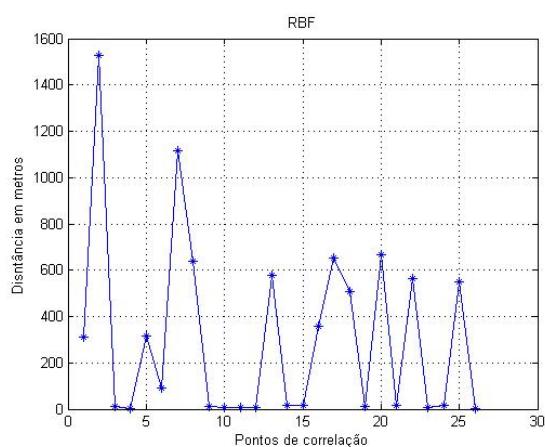


Figura 11. Desvios obtidos pela RBF no simulador do voo.

VI. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram que a abordagem de casamento de imagens pode ser usada como alternativa à tecnologia de GPS na estimação da localização geográfica de uma VANT. Na análise comparativa entre os extratores de borda, *Canny* mostrou-se, no geral, mais robusto que RBF. *Canny* apresentou 100% de acurácia para o experimento envolvendo diferentes tipos de terreno enquanto a RBF apresentou um erro do tipo falso positivo para uma imagem pertencente a classe Floresta.

Em relação ao experimento que usa o simulador de voo, *Canny* apresentou uma rota mais suave que RBF, com erro médio de estimação de posição abaixo dos 200m e uma taxa de falso de positivos na ordem de 25.9%. Adicionalmente, por apresentar menor custo computacional na extração de bordas, *Canny* permitiu realizar um maior número de casamentos, o que faz com que sua rota estimada seja mais próxima da rota planejada.

Embora a rota produzida pelo extrator RBF tenha produzido uma taxa maior de falsos positivos, é importante ressaltar que ambos os extratores foram capazes de atingir os *way-points* estabelecidos pelo projetista da rota. Este fato reforça os indícios de que a metodologia proposta pode ser usada para voos autônomos em regiões controladas.

Apesar dos resultados promissores, muito ainda precisa ser feito. Desde que os testes realizados neste artigo foram feitos em ambientes controlados (banco de imagens e simulador), o próximo passo é testar a metodologia usando imagens de um voo real de VANT, contrastando as posições estimadas por nosso sistema com aquelas estimadas por um GPS. Além disso, pretende-se estender a metodologia para a realização de voos fora da faixa do visível, investigando outros extratores de características e tipos de imagens, tais como, termais, Lidar, entre outras.

VII. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES - Brasil e do CNPq, processo No. 485118/2013-0.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Kim and S. Sukkarieh, "Real-time implementation of airborne inertial-slam," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 55, no. 1, pp. 62–71, 2007.
- [2] G. Conte and P. Doherty, "An integrated uav navigation system based on aerial image matching," in *Aerospace Conference*. IEEE, 2008, pp. 1–10.
- [3] M. T. A. H. Muella, *Morfologia e dinâmica das irregularidades ionosféricas de pequena escala e imageamento ionosférico por GPS*.
- [4] E. H. Shiguemori, M. P. Martins, and M. V. T. Monteiro, "Landmarks recognition for autonomous aerial navigation by neural networks and gabor transform," in *Image Processing: Algorithms and Systems*, vol. 29, 2007, p. 64970.
- [5] T. Lemaire, C. Berger, I. Jung, and S. Lacroix, "Vision-based slam: Stereo and monocular approaches," vol. 74, no. 3. Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers, 2007, pp. 343–364.
- [6] A. Canhoto, E. H. Shiguemori, and M. A. P. Domiciano, "Image sequence processing applied to autonomous aerial navigation," in *IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA)*, vol. 1, 2009, pp. 496 – 499.
- [7] G. A. M. Goltz, E. H. Shiguemori, and H. F. C. Velho, "Position estimation of uav by image processing with neural networks," in *X Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional*. CBIC, 2011, pp. 9–17.
- [8] A. Santos, L. Torres, E. H. Shiguemori, H. F. d. C. Velho, and A. P. Braga, "Controle e navegação de vants através de utilização de template matching," in *Anais do Computer on the beach*. Computer on the beach, 2013.
- [9] E. G. Horta, E. H. Shiguemori, H. F. C. Velho, and A. P. Braga, "Extração de características e casamento de padrões aplicados à estimação de posição de um vant," in *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automação*, 2012, pp. 5045–5050.
- [10] C. G. José and E. H. Shiguemori, "Processamento de imagens obtidas com diferentes ângulos de visada para aplicação na navegação autônoma," in *Anais do Seminário Anual de Iniciação Científica e Pós-Graduação do IEAv*. IEAv, 2010.
- [11] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Processamento de Imagens Digitais*, 3rd ed.
- [12] J. Canny, "A Computational Approach to Edge Detection," *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-8, no. 6, pp. 679–698, 1986.
- [13] S. Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 1998.
- [14] J. R. Jang and C. Sun, *Neuro-fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1997.
- [15] "Flight gear - simulador de voo." [Online]. Available: <http://www.br.flightgear.org/>
- [16] P. Longley, *Geographic information systems and science*, ser. 2nd ed. Wiley, 2005.