

Planejamento de Caminhos Tridimensionais para Veículos Aéreos Não Tripulados de Asa Fixa em Ambientes Hostis

Davisom da Cunha Correa e José Luiz de Souza Pio

Universidade Federal do Amazonas – Instituto de Computação, Av. Gen. Rodrigo O. J. Ramos, 3000, Campus Universitário, Setor Norte, Manaus/AM – Brasil

Resumo— Este trabalho aborda a construção de um planejador de caminhos para navegação de um veículo aéreo não tripulado de asa fixa no espaço tridimensional. Considera-se que a navegação do veículo ocorre em desempenho de missões militares sobre regiões hostis com restrição de voo devido às condições climáticas e a presença de baterias antiaéreas, mísseis ou monitoramento por radar. De maneira diferente das tradicionais, a metodologia aqui desenvolvida obtém pontos específicos em regiões do espaço tridimensional que favoreçam os critérios de segurança do voo e dirigibilidade da aeronave e que também atendam aos requisitos da missão. Testes experimentais por meio de simulação em diferentes cenários mostram a aplicabilidade do planejador de caminho em veículos aéreos não tripulados reais no atendimento a segurança e na melhoria do desempenho da missão.

Palavras-Chave— Planejamento de Caminhos, Veículos Aéreos Não Tripulados, Ambientes Hostis.

I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e aplicação das novas tecnologias nos conflitos modernos têm aumentado a complexidade dos teatros de operações e dos campos de batalha. Desde o final da guerra do Vietnã, nos meados dos anos de 1970, o uso de robôs aéreos nos campos de batalha é uma realidade. Atualmente, segundo os noticiários, existem mais de 12.000 veículos aéreos não tripulados, ou VANTs, comandados pelo exército americano nos conflitos do Oriente Médio. Essas aeronaves são sistemas robóticos móveis dotados de certo nível de autonomia cuja locomoção ocorre no espaço aéreo tridimensional por meio de empuxo aerodinâmico, como os aviões ou helicópteros, ou por meio da flutuação, como os balões e dirigíveis [1].

O problema abordado neste trabalho está relacionado com o planejamento de caminhos para VANTs em missões sobre regiões de conflito ou em estado beligerância, levando em consideração as condições do voo relativas ao clima e a navegação em ambientes hostis caracterizados pela presença de inimigos eventualmente dotados de baterias antiaéreas, mísseis e redes de radares.

Planejar o movimento do VANT significa determinar um caminho que interpole um conjunto de pontos definidos no espaço de navegação focando no cumprimento de uma dada

Davisom da Cunha Correa, dcc2@icomp.ufam.edu.br, José Luiz de Souza Pio, josepio@icomp.ufam.edu.br, Tel +55-92-99603-0752. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq e pela Fapeam.

missão, mas respeitando exigências da mesma, impostas por meio de condições internas (restrições de movimento, consumo de combustível, capacidade de carga, e outros) e externas (fatores meteorológicos, relevo da área de voo, zonas de exclusão, zonas hostis com presença de baterias antiaéreas, mísseis e radares) da aeronave ([1], [2] e [3]).

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para o planejamento de caminhos para um VANT de asa fixa (o que restringe a capacidade de mobilidade do veículo aéreo) em missões de monitoramento, vigilância ou de combate sobre regiões hostis. Esta abordagem utiliza um modelo de mundo tridimensional para facilitar a determinação do melhor caminho a ser realizado pelo VANT. Leva ainda em consideração o estado do espaço aéreo, a detecção de obstáculos e os requisitos da missão dispostos no plano de voo, como o sobrevoo de pontos de interesse (*waypoints*). Sistemas com o planejamento de caminhos viabilizam o melhor controle da missão e conseqüentemente o cumprimento da missão de forma confiável e segura.

Essas aeronaves são empregadas no meio militar em missões de monitoramento, reconhecimento, apoio aéreo e combate ([4] e [5]). A utilização de planejadores para a navegação de VANTs em ambientes hostis é muito importante para a obtenção de voos seguros com determinados níveis de autonomia. Os planejadores não só garantem a segurança do voo, como também reduzem os custos da missão e flexibilizam a experimentação de diferentes tipos de missões em diferentes cenários de forma segura e plenamente controlável ([6] e [7]).

Embora alguns trabalhos sejam eficientes na geração de caminhos tridimensionais, suas abordagens apresentam elevado custo computacional e não encontram rotas realizáveis por VANTS com restrições de movimento ([8] e [9]). Diferente das abordagens tradicionais ([10] e [3]) a metodologia aqui desenvolvida obtém pontos específicos em regiões do espaço tridimensional que favoreçam os critérios de segurança do voo e dirigibilidade da aeronave e também atendam aos requisitos da missão.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

O planejamento de caminhos para robôs móveis têm amadurecido muito desde os trabalhos originais na década de 1970. No entanto, planejar caminhos que propiciem a navegação segura de veículos aéreos não tripulados em ambientes complexos e hostis ainda é um tema de pesquisa ativo e desafiante.

Os VANTs possuem uma dinâmica rápida e complicada e os problemas da geração de caminhos são agravados pelas questões de navegação em tempo real no espaço tridimensional (3D) e a exposição a situações de perigo em regiões hostis ou de conflito como nos teatros de operações da guerra moderna.

A utilização de métodos heurísticos tem sido uma proposta frequente para o problema de planejamento de caminhos. Fan et al. [5] propôs um planejador de caminho para um VANT que navega em baixa altitude, considerando um mapa de navegação seguro em ambiente hostil. A tarefa principal do sistema era gerenciar as informações do ambiente relativas aos tipos de ameaças sobre a aeronave. Os autores utilizaram uma heurística melhorada do algoritmo A^* (lê-se A-estrela, uma heurística gulosa muito eficiente para encontrar caminhos em grafos planares). Os resultados obtidos por meio de simulações mostraram a eficiência da abordagem, relativamente rápida na escolha do melhor caminho com facilidade de adaptação às necessidades da missão.

Lentilhac [11] desenvolveu um planejador para a navegação segura de um esquema cooperativo de VANTs. A abordagem leva em conta a distância mínima de um veículo para outro com as restrições dadas pelo limite do alcance dos sensores da aeronave. Os resultados mostraram-se interessantes para os ambientes de guerra, uma vez que espaço de navegação conta com o auxílio de vários veículos que trabalham de maneira cooperativa para colher o máximo de informações possíveis do ambiente. A construção do planejamento de voo foi dividida em duas etapas: A primeira etapa trata do algoritmo que calcula o plano de voo conectando dois pontos no espaço, considerando o ambiente e as características dos veículos; a segunda etapa é a tomada de decisão para a escolha correta do caminho no espaço de navegação. Um Algoritmo Genético foi utilizado para calcular o plano de voo do VANT. Uma característica notória nesse trabalho é a limitação dos sensores. As informações percebidas pelas aeronaves limitam-se a cobertura dos seus próprios sensores, necessitando de vários veículos para que as informações sejam satisfatórias para o mapeamento completo da aérea de interesse.

Para o planejamento de caminhos para um VANT abordado em Hao Meng e Guizhou Xin [12] foi utilizado os Algoritmos Genéticos com Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*). O algoritmo usa o mapa de elevação digital do terreno para obter uma superfície de ameaça mínima, mais suave para o voo. O planejamento é feito em quatro direções sobre a superfície e o algoritmo genético com o recozimento simulado são utilizados para se obter os caminhos mais seguros sobre a superfície de ameaça mínima.

Mais recentemente, Shadab e Xu [13] trataram do problema da segurança do voo e da integração das fases da missão de um VANT. Nesse artigo, os autores tratam um conjunto de abordagens para todo o processo de planejamento da missão. O processo se inicia a partir da entrada de informações sobre os conceitos operacionais e requisitos da missão e é finalizando em um ambiente para simulação, onde podem ser analisados e projetados diversos segmentos da missão, como o planejamento de caminhos e a tomada de decisões em situações de risco.

Zao et al. [7] trataram do problema de planejamento de

caminhos em um nível mais operacional. Os VANTs norte-americanos do tipo Stealth são projetados com a finalidade de não serem detectados e utilizam um conjunto de tecnologias que reduzem a emissão/recepção de sinais de radar. Uma dessas tecnologias está presente no desenho do VANT, que é projetado com uma variedade de angulações sobre o próprio corpo. Porém, redes de múltiplos radares são um grande desafio para essas aeronaves, que podem ser identificadas a partir das diferentes posições dos radares. De maneira similar ao planejador desenvolvido aqui neste trabalho, os autores fazem uma adaptação do Algoritmo A^* , considerando as limitações de voo e a influência de todos os radares em uma rede projetada no ambiente de simulação.

Atualmente o emprego de múltiplos VANTs sob condições de incerteza tem sido um tema bem explorado pela comunidade científica. O planejamento de caminhos para múltiplos VANTs de combate em ambientes complexos e incertos foi o problema tratado por Huang et al.[6]. Os autores desenvolveram um arcabouço computacional para o combate cooperativo e ataque autônomo. A base do arcabouço computacional é um algoritmo de colônia de formigas melhorado. São utilizadas várias restrições como as características aerodinâmicas, projeção de alvos no solo e a delimitação de áreas de conflito. O planejador de caminhos encontra as trajetórias ótimas a partir de uma localização corrente para o lançamento das aeronaves sobre uma possível região de conflito.

III. METODOLOGIA

Planejar a trajetória de um VANT consiste em encontrar pontos no espaço tridimensional, segundo algum critério de otimalidade, que definem um caminho seguro e livre de obstáculos no qual o VANT navega para o cumprimento de uma missão específica. A Fig. 1 mostra o fluxograma do planejador de trajetórias desenvolvido neste trabalho. São dados como entrada todas as informações disponíveis sobre o tempo, o clima, as condições e previsões meteorológicas para o voo, assim como informações sobre o relevo, obstáculos naturais e artificiais e a localização (real ou presumível) das baterias antiaéreas e radares. A entrada também é composta pelas informações do plano de voo e as características da missão como os pontos de observação ou coordenadas de ataque. O termo missão descreve a tarefa que a aeronave deve cumprir sobre uma determinada região durante um período restrito de tempo, visando cumprir algum objetivo.

O plano de voo define a sequência de manobras a serem executadas pela aeronave durante a missão. É constituído por diversas etapas especificadas, normalmente pelas coordenadas de *waypoints* e por pontos de controle que caracterizam, por exemplo, o pouso e a decolagem. Etapas especificadas dessa forma são consideradas completas no momento de passagem da aeronave sobre esses pontos pré-determinados. O plano de voo é representado nesta metodologia por uma lista de coordenadas tridimensionais P_{voo} , que representa o conjunto de *waypoints* e pontos de controle específicos da missão.

O problema de planejamento de trajetórias pode englobar considerações de restrições geométricas, além de restrições físicas e temporais por abranger diversos aspectos como planejamento de movimento entre obstáculos estáticos e móveis,

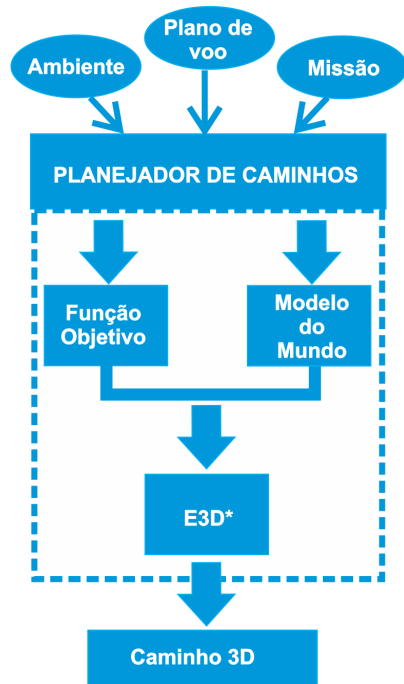


Fig. 1 - Fluxograma do Planejador de Caminhos. Os dados ambientais de clima, tempo, regiões hostis, posições de radar e ainda o plano de voo e as características da missão são dados como entrada. A função objetivo e o modelo do mundo são construídos a partir dessas informações. O Algoritmo E3D* encontra o melhor caminho que é enviado para o módulo de navegação da aeronave.

entre outros veículos aéreos e a aerodinâmica do próprio veículo. A obtenção do caminho é feita com base em um conjunto limitado de informações sobre o ambiente, descritas em um modelo de mundo, sobre a missão e sobre o plano de voo.

A. O Modelo do Mundo

O modelo do mundo é a representação interna do ambiente de navegação e atuação do VANT. A boa definição de um modelo do mundo é um dos principais fatores que influenciam no sucesso da missão. Essas representações devem ser capazes de armazenar informações suficientes para que o veículo possa:

- 1) Reconhecer o ambiente de navegação, o que envolve um certo grau de conhecimento prévio de toda a área a ser sobrevoada;
- 2) Identificar obstáculos e ameaças, mapeando todo o ambiente como área ocupada ou intransitável, área livre e áreas de alto risco livres para sobrevoo, mas arriscadas para a sobrevivência do VANT por conter ameaças militares, identificando cada célula da matriz ou grid;
- 3) Garantir o traçado de uma rota segura, livre de ameaças (ou com as melhores chances de sobrevivência possível), favorecendo o cumprimento da missão.

O modelo do mundo é definido por uma grade ocupacional regular multivolume. Essa estrutura consiste em uma grade tridimensional formada por um conjunto de pontos ortogonalmente espaçados por distâncias Δ_x , Δ_y e Δ_z .

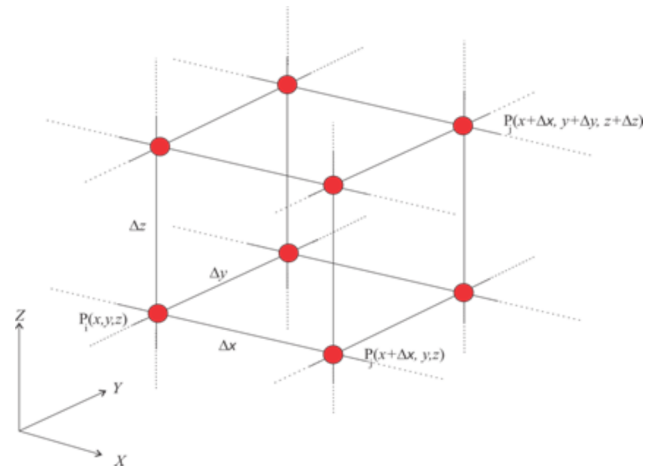


Fig. 2 - Uma região do espaço no modelo do mundo. O modelo do mundo é um espaço regular multivolume, formados por pontos fixos igualmente espaçados nas três dimensões.

A Fig. 2 mostra elementos de volume da grade, caracteristicamente definidos pelos seus vértices. A cada ponto da grade regular está associado um "peso", w_i , um valor que caracteriza as condições do espaço de navegação, identificando a presença ou não de obstáculos ou ameaças.

B. Ponderação dos Pontos no Modelo do Mundo

Para cada ponto P_i da grade ocupacional é atribuído um peso w_i definido em uma escala que expressa às características da missão, do plano de vôo e as condições climáticas. Nessa ponderação também são consideradas as informações referentes aos níveis de hostilidades na região, como a presença de defesa antiaérea de pontos sensíveis, dotados de armas de curto alcance, ou de regiões onde se empregam sistemas de armas de longo e de médio alcance com monitoramento por redes de radares.

TABELA I
PONDERAÇÃO DOS PONTOS DA GRADE 3D

Representação	Valor de w
Obstáculos naturais ou artificiais. Defesa antiaérea com mísseis terra-ar e monitoramento com radares.	10.000 (máx)
Zonas hostis ou de exclusão, proteção local com bateria antiaérea de curto alcance, região monitorada por radares móveis. Tempestades.	8.000 – 9.500
Área de conflito não mapeada, possível presença de tropas. Chuva e ventos moderados a fortes.	4.000 – 7.000
Área identificada com alvos já reconhecidos. Possível variação climática.	1.000 – 2.000
Áreas livres. Território aliado com monitoramento. Condições climáticas favoráveis.	1 – 100

A Tabela I mostra a distribuição dos pesos associados ao

grau de hostilidade da região e às condições climáticas usadas. Obstáculos e regiões com proteção antiaérea de área assumem o valor w_i mais alto na escala (máx). Valores menores que o valor máximo são usuais para representar zonas de exclusão ou com restrição ao voo, seja por condições climáticas ou por diferentes níveis de hostilidade.

C. A Função Objetivo

O caminho de menor custo é obtido por meio de uma função objetivo que leva em consideração as características do ambiente e a distância percorrida pela aeronave em cada etapa da missão, informadas pela lista de pontos objetivos dados no plano de voo do VANT, P_{voo} . O custo associado ao ambiente é ponderado por um peso w_i com a distância entre o ponto corrente P_c e a menor distância entre o ponto P_i da vizinhança, com ponto objetivo da k -ésima etapa da missão P_{voo_k} . A Fig. 3 mostra a distância associada entre os pontos da vizinhança (pontos mais escuros) com o ponto destino, P_{voo_k} .

O custo

$$C_{c,i} = w_i d(P_i, P_{voo_k}), \quad (1)$$

está associado ao movimento do VANT a partir da posição corrente $P_c(x_c, y_c, z_c)$ para uma posição $P_i(x_i, y_i, z_i)$ em uma vizinhança da grade ocupacional; $P_{voo_k}(x_v, y_v, z_v)$ é o ponto objetivo da k -ésima etapa da missão, informado no plano de voo; w_i é o peso associado ao ponto P_i e

$$d(P_i, P_{voo_k}) = \sqrt{(x_i - x_v)^2 + (y_i - y_v)^2 + (z_i - z_v)^2}, \quad (2)$$

é a distância Euclidiana entre o ponto destino P_i e o ponto objetivo do plano de voo na etapa da missão P_{voo} .

A função objetivo deve considerar a soma das distâncias que minimizam o custo associado ao movimento do VANT no espaço tridimensional, que é dada por

$$f_{obj} = \min \left\{ \sum_{i=1}^n w_i d(P_i, P_{voo_k}) \right\}. \quad (3)$$

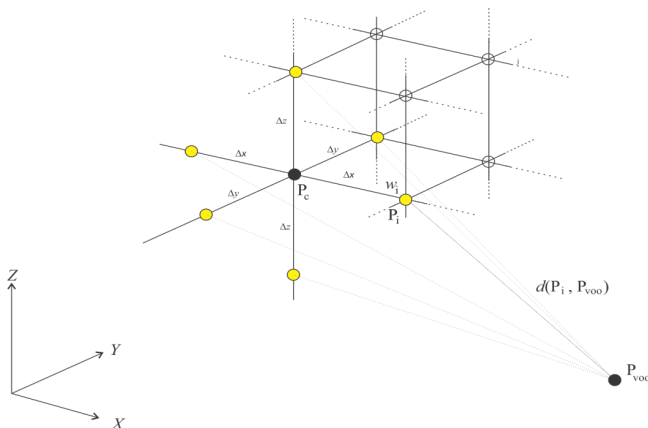


Fig. 3 - O ponto de corrente P_c define o centro de uma vizinhança espacial. A distância é calculada entre o ponto P_i da vizinhança e P_{voo_k} , o waypoint definido no plano de voo da missão.

A função objetivo pode ser adaptada para a inclusão de outros fatores ou restrições que afetam as condições de voo, como o consumo de combustível, limitação de tempo para o

cumprimento da missão, o nível de energia das baterias, a capacidade de carga, o alcance do sistema de comunicação e o raio de cobertura dos sensores da aeronave. Esses fatores devem ser associados ao custo (Equação 1 por meio de funções que possam alterar, beneficiar ou penalizar o valor total do custo.

D. O Algoritmo E3D*

O Algoritmo E3D* (Euclidiano 3D-estrela), mostrado em seguida, é um algoritmo guloso que busca o melhor caminho em uma grade regular tridimensional $Mundo$ a partir de um ponto de corrente P_c em ponto da vizinhança P_v da grade. Essa abordagem leva em consideração a minimização do custo relacionado entre a distância de P_v e o ponto definido no plano de P_{voo} ponderada pelo "peso" w_v associado ao ponto da vizinhança considerada.

Algoritmo 1: E3D*

Entrada:

P_{voo} % uma lista de pontos de referência

$Mundo$ % o modelo do mundo

Saída:

$Caminho$ % uma lista com as coordenadas do caminho

1 início

```

2    $j \leftarrow 0$  % índice para o ponto corrente
3    $np \leftarrow \#(P_{voo})$ ; % número de pontos de referência
4    $P_c(j) \leftarrow P_{voo}(j)$ ; % inicia a posição corrente
5    $Mundo \leftarrow P_c(j)$ ; % aponta a posição corrente no mundo
6    $Caminho \leftarrow Mundo$ ; % o primeiro ponto do caminho
7   para cada  $P_{voo}(i) \in P_{voo}, i = 1, 2, \dots, np$  faça
8     repita
9       para cada  $P_v(k), k = 1, 2, \dots, nv$  em uma
          vizinhança  $Mundo(3 \times 3 \times 3)$  de  $nv$  pontos,
          centrada em  $P_c(j)$  faça
10         $P_c(j) \leftarrow P_v(k)$  para o qual
             $\min \{w_v \times d(P_v, P_{voo})\}$ ;
11        fim
12         $Caminho \leftarrow P_c(j)$ ;
13         $j \leftarrow j + 1$ ;
14      até  $P_c(j) = P_{voo}(i)$ ;
15    fim
16 fim
17 retorna  $Caminho$ ;

```

O algoritmo faz estimativas locais para definir que direção tomar de acordo com as possibilidades dentro da grade, buscando a melhor solução (não necessariamente a solução ótima) a fim de cumprir a missão no menor percurso possível e com segurança.

IV. EXPERIMENTAÇÃO E RESULTADOS

Os experimentos foram realizados no ambiente MatLab 2015, em um computador com CPU Intel Core i5, no sistema Operacional Windows 10. O modelo do mundo representado em um espaço $30 \times 30 \times 30$ pontos, simulando um ambiente

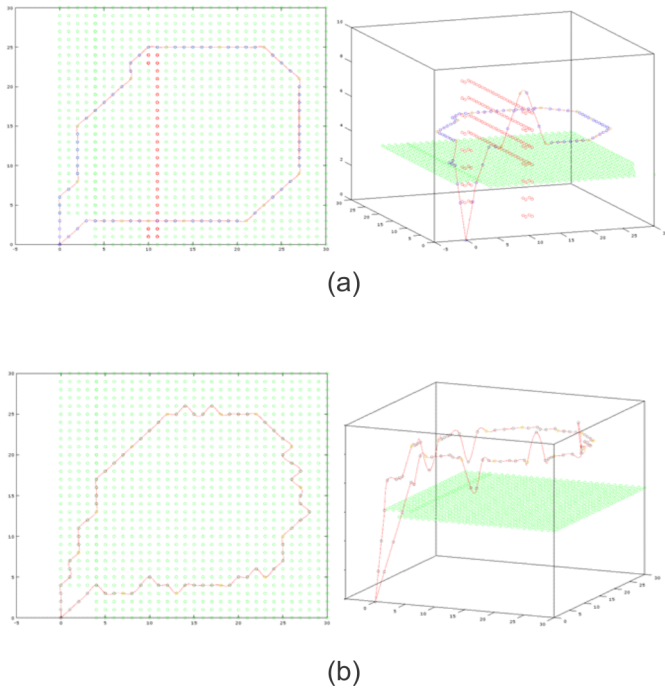


Fig. 4 - Visualização dos caminhos obtidos. A direita o traçado tridimensional e a esquerda a projeção do traçado no plano XY para a transposição de obstáculos (a) e para a obstrução de 80% do espaço de navegação com pontos intransitáveis (b).

voos sobre uma área hostil, na qual o VANT deve sobrevoar pontos específicos a uma altura definida, desviando de possíveis obstáculos e regiões perigosas, com presença de baterias antiaéreas para proteção de pontos sensíveis, dotadas de armas de curto alcance e radares móveis. A missão é típica de infiltração aérea no terreno inimigo com o objetivo de monitoramento, devendo assim o VANT sobrevoar a uma altura mínima previamente estabelecida. No plano de voo foram marcados seis waypoints de sobrevoos obrigatórios.

Foram gerados dois conjuntos de experimentos. O primeiro conjunto objetiva testar a robustez do Algoritmo $E3D^*$. Já o segundo conjunto de experimentos visa a análise de desempenho do método, verificando a capacidade de gerar caminhos frente ao aumento progressivo de pontos em regiões do espaço com alto nível de dificuldade para o cumprimento da missão, seja por condições climáticas ou por níveis elevados de defesa antiaérea. Os experimentos e seus resultados estão apresentados nas seções seguintes.

A. Avaliação da Robustez

O primeiro teste verificou a capacidade do método em transpor obstáculos. A Fig. 4 (a), ilustra o resultado obtido com condições favoráveis ao voo, porém com um obstáculo vertical. O caminho obtido faz a transposição do obstáculo com segurança e cumprindo toda a missão, respeitando as restrições de altura e transpondo convenientemente o obstáculo.

Para testar a robustez do Algoritmo $E3D^*$, preencheu-se progressivamente o espaço de navegação com pontos "intransitáveis" (pontos com o peso w_v muito alto) espalhados aleatoriamente. A partir de 20% do ambiente de voo povoado

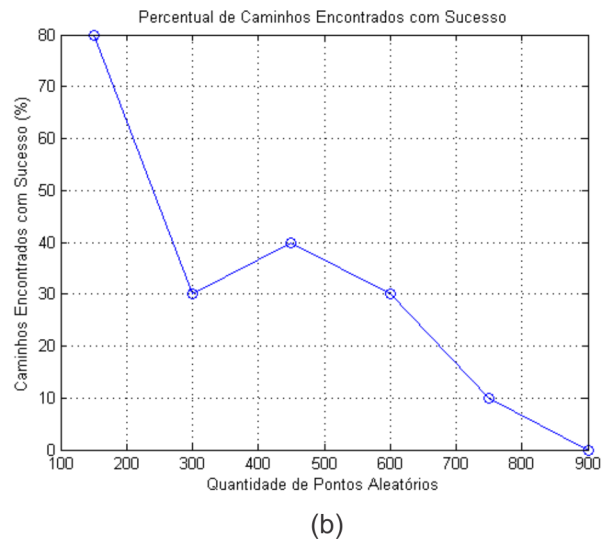
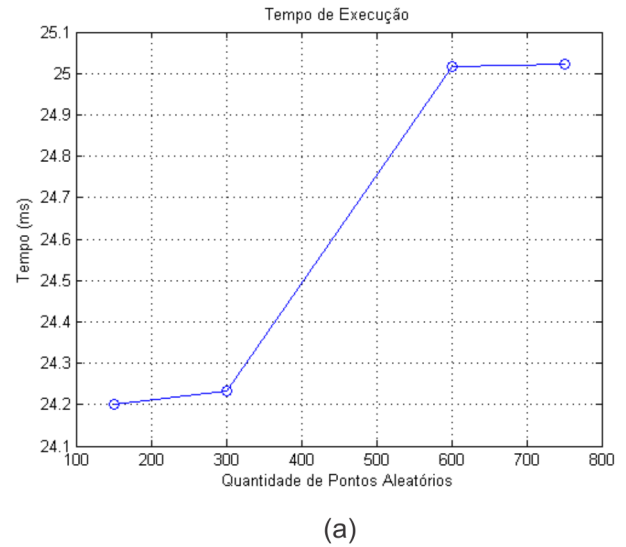


Fig. 5 - Os gráficos mostram o tempo médio de execução do algoritmo (a) e o percentual de caminhos encontrados com sucesso (b) para instâncias de 150, 300, 450, 600, 750 e 900 pontos intransitáveis.

por pontos intransitáveis, verificou-se o comprometimento para a geração de caminhos que possam garantir suavidade no traçado da curva. As situações mais complexas foram obtidas com taxas a partir de 80% do espaço de voo comprometido. Mesmo com essa alta taxa do espaço povoado por pontos intransitáveis, o Algoritmo $E3D^*$ ainda consegue gerar caminhos, mas comprometendo muito o seu desempenho e a qualidade do caminho obtido. A Fig. 4 (b) mostra o caminho obtido com o espaço de navegação tomado com 80% por pontos intransitáveis.

B. Avaliação de Desempenho

Para a avaliação do desempenho do algoritmo, foram realizados 60 experimentos com instâncias de 150, 300, 450, 600, 750 e 900 pontos intransitáveis espalhados aleatoriamente pelo espaço de navegação do VANT. O Gráfico mostrado na Fig. 5 (a), apresenta o tempo médio gasto para executar cada

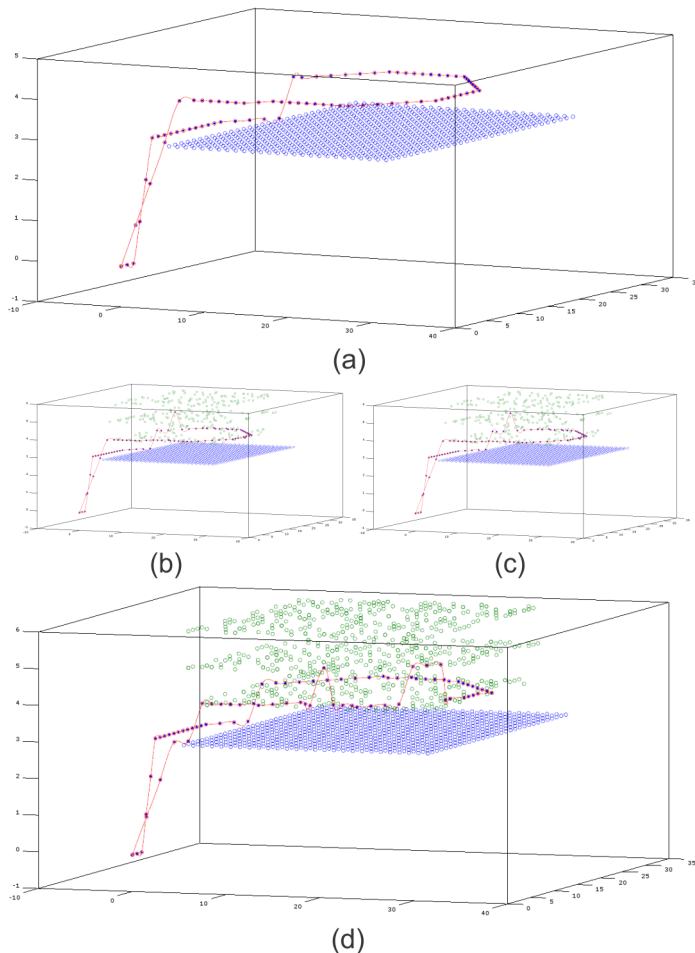


Fig. 6 - Caminhos obtidos para instâncias com nenhum ponto intransitável (a), 150 pontos (b), 300 pontos (c) e 750 pontos (d).

bateria de 10 testes para cada instância de pontos aleatórios. Nota-se que o tempo de execução não varia muito com o acréscimo de pontos, visto que o caminho resultante não se altera, mantendo-se na média global de 24.62ms. Como o algoritmo só enxerga os vizinhos imediatos do ponto corrente, ele só faz desvios locais, não acrescentando mais pontos do que necessário para o caminho final. Porém, para um limite próximo aos 900 pontos intransitáveis, o espaço de navegação se torna inviável, e o algoritmo não encontra mais um caminho possível.

A Fig. 5 (b) mostra a porcentagem de testes realizados com sucesso para cada instância de pontos aleatórios. Quanto mais pontos aleatórios, maior é a probabilidade de um waypoint ficar rodeado de pontos intransitáveis, impossibilitando que o mesmo seja alcançado. Quando os pontos não podem ser mais acessados, o algoritmo interrompe sua execução por não encontrar um caminho válido no espaço de navegação, resultando na falha da simulação. Verificou-se ainda que a partir de 900 pontos intransitáveis o algoritmo torna-se inviável. Os caminhos gerados para as instâncias de 0, 150, 300, e 750 estão mostrados na Fig. 6 (a)–(d).

V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia para o planejamento de caminhos tridimensionais aplicado à navegação de VANTs de asa fixa. Verificou-se por meio de simulação a viabilidade da aplicação da metodologia na navegação autônoma de VANTs em missões de monitoramento, vigilância ou de combate, levando em consideração as condições do voo relativas ao clima e o emprego em missões sobre ambientes hostis, caracterizados pela presença de baterias antiaéreas, mísseis e redes de radares.

Tratou-se especificamente de um modelo de otimização discreta de movimentos definidos em um espaço tridimensional, onde integraram-se as informações do ambiente com as informações providas pelo plano de voo e pela missão. Com isso, mostrou-se ser possível estruturar um problema complexo em um modelo relativamente simples, mas garantindo-se a exequibilidade do caminho tridimensional.

A continuidade do trabalho tratará da adequação da função objetivo às características internas da aeronave (consumo de energia, velocidade, capacidade de carga, entre outros) e o desenvolvimento de técnicas de replanejamento do voo frente a um problemas inesperados e a ocorrência de obstáculos dinâmicos no espaço tridimensional.

REFERÊNCIAS

- [1] CARVALHO, E. N. *Planejamento de Caminhos Tridimensionais Para Veículos Aéreos Não Tripulados*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Amazonas, 2014.
- [2] YANG, K.; SUKKARIEH, S. 3d smooth path planning for a uav in cluttered natural environments. In: *IEEE. Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*. [S.l.], 2008. p. 794–800.
- [3] ALTMANN, A. et al. Improved 3d interpolation-based path planning for a fixed-wing unmanned aircraft. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Springer, v. 76, n. 1, p. 185–197, 2014.
- [4] VACHTSEVANOS, G. et al. From mission planning to flight control of unmanned aerial vehicles: Strategies and implementation tools. *Annual Reviews in Control*, Elsevier, v. 29, n. 1, p. 101–115, 2005.
- [5] FAN, Q. et al. Path planning for a reconnaissance uav in uncertain environment. In: *IEEE. Control and Automation (ICCA), 2016 12th IEEE International Conference on*. [S.l.], 2016. p. 248–252.
- [6] HUANG, H. et al. Multi-uav cooperative autonomous attack path planning method under uncertain environment. In: *2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 573–579.
- [7] ZHAO, Z. et al. A fast stealth trajectory planning algorithm for stealth uav to fly in multi-radar network. In: *2016 IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics (RCAR)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 549–554.
- [8] FILIPPIS, L. D.; GUGLIERI, G.; QUAGLIOTTI, F. Path planning strategies for uavs in 3d environments. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Springer, v. 65, n. 1, p. 247–264, 2012.
- [9] LIN, Y.; SARIPALLI, S. Path planning using 3d dubins curve for unmanned aerial vehicles. In: *IEEE. Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2014 International Conference on*. [S.l.], 2014. p. 296–304.
- [10] CHANG, S.-R.; HUH, U.-Y. Curvature-continuous 3d path-planning using qpmi method. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, v. 12, n. 6, p. 76, 2015.
- [11] LENTILHAC, S. Uav flight plan optimized for sensor requirements. In: *IEEE. Radar Conference-Surveillance for a Safer World, 2009. RADAR. International*. [S.l.], 2009. p. 1–4.
- [12] MENG, H.; XIN, G. Uav route planning based on the genetic simulated annealing algorithm. In: *IEEE. Mechatronics and Automation (ICMA), 2010 International Conference on*. [S.l.], 2010. p. 788–793.
- [13] SHADAB, N.; XU, H. A systematic approach to mission and scenario planning for uavs. In: *2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–7.