

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

PLANEJAMENTO DE CAMINHOS TRIDIMENSIONAIS PARA
VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS

ELDA NUNES DE CARVALHO

Manaus – AM

2014

ELDA NUNES DE CARVALHO

**PLANEJAMENTO DE CAMINHOS TRIDIMENSIONAIS PARA
VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Informática, área de concentração em Visão Computacional e Robótica.

Orientador: Prof. Dr. José Luiz de Souza Pio

Manaus – AM
2014

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

N972p Nunes de Carvalho, Elda
PLANEJAMENTO DE CAMINHOS TRIDIMENSIONAIS PARA
VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS / Elda Nunes de
Carvalho. 2014
68 f.: il. color; 29 cm.

Orientador: José Pinheiro de Queiroz Neto
Dissertação (Mestrado em Informática) - Universidade Federal do
Amazonas.

1. Planejamento. 2. VANT. 3. Algoritmo E3D*. 4. Algoritmo de
Busca. 5. Espaço Tridimensional. I. Queiroz Neto, José Pinheiro de
II. Universidade Federal do Amazonas III. Título



205ª ATA DE DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO DO MESTRADO

Aos 28 dias do mês de março do ano de 2014, às 14:00h, na Sala de Seminários do Instituto de Computação da Universidade Federal do Amazonas, situado na Av. Rodrigo Otávio, 6.200, Campus Universitário, Setor Norte, Coroado, nesta Capital, ocorreu a sessão pública de defesa de dissertação de mestrado intitulada "**Planejamento de Caminhos Tridimensionais para Veículos Aéreos Não Tripulados**" apresentada pela aluna **Elda Nunes de Carvalho** que concluiu todos os pré-requisitos exigidos para a obtenção do título de mestre em informática, conforme estabelece o artigo 52 do regimento interno do curso. Os trabalhos foram instalados pelo Prof. José Pinheiro de Queiroz Neto – PPGI/UFAM, orientador e presidente da Banca Examinadora, que foi constituída, ainda, pelo Prof. Prof. José Reginaldo Hughes Carvalho – PPGI/UFAM – Membro e Prof. José Luiz de Souza Pio – IComp/UFAM – Membro. A Banca Examinadora tendo decidido aceitar a dissertação, passou à arguição pública do candidato. Encerrados os trabalhos, os examinadores expressaram o parecer abaixo.

A comissão considerou a dissertação:

- () Aprovada
- () Aprovada condicionalmente, sujeita a alterações, conforme folha de modificações, anexa,
- () Reprovada, conforme folha de modificações, anexa

Proclamados os resultados, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu, Elienai Nogueira, Secretária do Programa de Pós-Graduação em Informática, lavrei a presente ata, que assino juntamente com os Membros da Banca Examinadora.

Prof. José Pinheiro de Queiroz Neto

Assinatura:.....

Prof. José Reginaldo Hughes Carvalho

Assinatura:.....

Prof. José Luiz de Souza Pio

Assinatura:.....

Secretária

Manaus, 28 de março de 2014

Aos meus pais Diogo Picanço de Carvalho,
Elci Nunes de Carvalho e meu filho
Evaldo Pereira Gama Júnior

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por sua infinita misericórdia, pelas portas abertas e pelas pessoas que Ele pôs no meu caminho ao longo desta jornada.

Aos meus pais, Diogo Picanço de Carvalho e Elci Nunes de Carvalho, obrigada pelo amor incondicional, pela dedicação dispensada a mim nessa etapa da minha vida, foi fundamental para alcançar meus objetivos. Amo vocês.

Ao meu filho Evaldo Pereira Gama Júnior, obrigada pela paciência, desculpa as ausências e as promessas não cumpridas. Nossos sonhos continuam de pé e conto com você ao meu lado para realiza-los. Aqui na terra você é o meu maior tesouro e mesmo que indiretamente você é meu maior incentivo. Juntos sempre.

Aos meus irmãos, Esér Carvalho, Elma Carvalho e Éden Carvalho, vocês são um presente de Deus na minha vida. Obrigada por fazerem parte desse momento importante.

Ao meu companheiro de sempre, Odair Silva, mesmo que reclamando sempre atende meus pedidos, obrigada pelo ombro amigo, pela companhia até altas horas, desculpa a ausência, os atrasos, compromissos não cumpridos. Você é a melhor parte de mim, divido com você esta conquista. Te amo (é melhor deixar subentendido).

Ao meu orientador, Professor Dr. José Luiz Pio de Souza, pela oportunidade, por acreditar em mim mesmo quando eu mesma deixei de acreditar. Desculpa pelas falhas, pelos emails não respondidos, pelas vezes que fui funcionária pública. És um homem admirável, minhas sinceras desculpas. Não tenho palavras para agradecer tamanha paciência. Obrigada pelas valiosas contribuições.

Ao professor Dr. José Reginaldo, que por intermédio recebi apoio financeiro da Finep (Projeto VANT). A CAPES e ao grupo da UFMG.

Aos professores, Dr. José Reginaldo e o Dr. José Pinheiro por terem aceitado participar da banca.

Ao professor Dr. Raimundo Barreto, pelas cobranças no corredor, sempre encarei como um inventivo. Obrigada pela atenção.

Ao Felipe Azevedo Pinagé, meu amigo de todas as horas. Obrigada pela sua amizade, pelos momentos que passamos juntos, tem história e como tem. Na minha vida acadêmica sempre foi assim, um ao lado do outro, vou sentir saudades. Já disse tantas vezes não custa repetir, te amo, você é minha inspiração, quando crescer quero ser assim.

Aos meus amigos Tal Qual, David Lima, Laura Michaela Ribeiro e Janainny Sena, a amizade de vocês é especial, além da experiência acadêmica levo a amizade de todos vocês, que a cada dia fica mais sólida. Obrigada pelos momentos de descontração, pelo apoio, pelas palavras de conforto, pela companhia e pelas aulas de português. Conviver com vocês é um prazer.

Aos colegas do mestrado e aos colegas do Laboratório de Visão Computacional e Robótica, pela companhia durante estes dois últimos anos.

Ao colega Diogo Soares, obrigada por toda a ajuda, pela paciência. Desculpa qualquer coisa.

Por fim, um agradecimento especial ao Programa de Pós-Graduação em Informática da UFAM pela oportunidade proporcionada e a CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

Os veículos aéreos não tripulados (VANT) têm sido alvo de pesquisas em diversas aplicações. Um grande esforço tem sido feito para aumentar a autonomia dos VANT's ao realizar essas missões. Na área militar essas pesquisas têm mostrados bons resultados, por outro lado, na área civil as pesquisas ainda são um desafio, pela carência de investimentos para o desenvolvimento e falta de regulamentação específica. No entanto, em algumas situações, a falta de piloto a bordo torna a execução da missão uma tarefa não trivial. Um exemplo disso são missões realizadas sobre ambientes florestais com mata densa, característica específica da Região Amazônica. Este cenário apresenta um papel crítico tanto no modo de navegação autônoma quanto no modo remotamente operado, devido à dificuldade de navegação em tais ambientes. O uso de planejadores tem viabilizado a obtenção de caminhos ou trajetórias que satisfaçam critérios de desempenho de navegação atendendo aos requisitos da missão. Em geral, um conjunto de pontos passagem é definido no espaço de navegação do veículo e o planejador encontra um caminho que passa por sobre todos esses pontos, levando em consideração as restrições de movimento, tempo, condições ambientais e/ou o consumo de energia do veículo. Este trabalho aborda a construção de um planejador de caminho para navegação do VANT de asa fixa no espaço tridimensional sobre regiões esparsas de florestas com restrição de voo devido às condições de dirigibilidade, climáticas, ambientais. 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 também atendam aos requisitos da missão, construindo o caminho a partir da interpolação desses pontos com os pontos de passagem oriundos da missão. Testes experimentais por meio de simulação em diferentes cenários mostram a aplicabilidade do planejador de caminho em VANT reais no atendimento a segurança e na melhoria do desempenho da missão.

Palavras-Chaves

Planejamento, VANT, Algoritmo E3D*, Algoritmo de Busca, Espaço Tridimensional.

ABSTRACT

Unmanned aerial vehicles (UAV's) have been the target of research in many applications where there are hazardous conditions to the integrity of the crew. A great effort has been made to increase the autonomy of UAV's to perform these missions. In the military domain these studies have shown good results. On the other hand, in civil area, researches are still a challenge, due to the lack of investments for the development and absence of specific rules. However, in some situations, the lack of pilots onboard becomes mission execution a nontrivial task. An example is missions on dense forest environments with, specific feature of the Amazon region. This scenario presents a critical role both in autonomous navigation mode and the remotely operated mode, due to the difficulty of navigation in such environments. The use of planners has enabled obtaining paths or trajectories that satisfy criteria navigation performance meeting the requirements of the mission. In general, a set of points is defined in the vehicle navigation space and the planner finds a path that passes through all of these points, taking into account the constraints of motion, time and / or energy consumption of the vehicle. This work addresses the construction of a path planner for fixed wing UAV navigation in three dimensional spaces about sparse forest regions with restriction of flight due to weather and environmental conditions. Unlike the traditional way, the methodology developed here gets specific points in three-dimensional space regions that favor the criteria for flight safety and maneuverability of the aircraft and also meet the requirements of the mission, paving the way from the interpolation of these points with points crossing the coming mission. Experimental tests by simulation in different scenarios show the applicability of UAV path planner in actual service security and improving mission performance.

Keywords

Planning, UAV, E3D* Algorithm, Search Algorithm, Three-dimensional Space

SUMÁRIO

Lista de Figuras	11
Lista de Tabelas	14
Lista de Termos, Abreviaturas e Siglas	15
Capítulo 1	16
Introdução	16
1.1 Motivação	19
1.2 Justificativa	21
1.3 Objetivos	22
1.3.1 <i>Objetivo Geral</i>	22
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	22
1.4 Organização do Trabalho	23
Capítulo 2	24
Trabalhos Relacionados	24
2.1 Planejamento Heurístico	24
2.2 Traçado dos Caminhos Tridimensionais	30
Capítulo 3	37
Planejamento de Caminho Tridimensional para Veículos Aéreos Não Tripulados	37
3.1 Navegação e Planejamento de Trajetória para Veículos Aéreos Não Tripulados	37
3.2 O Planejador de Trajetórias e a Obtenção do Caminho	40
3.2.1 <i>Missão</i>	41
3.2.2 <i>Modelo do Mundo</i>	43
3.2.3 <i>Plano de Voo</i>	45
3.2.4 <i>Ponderação dos Pontos no Espaço</i>	47
3.2.5 <i>Função Objetivo</i>	48
3.3 Planejador de Trajetória	50
3.3.1 <i>O Algoritmo E3D*</i>	51
3.3.2 <i>Custo Computacional</i>	53
Capítulo 4	55
Aplicações Experimentais	55
4.1 Protocolo de Experimentação	55
4.2 Considerações sobre os experimentos	60

Capítulo 5	61
Conclusão e Trabalhos Futuros	61
5.1 Limitações.....	63
5.2 Extensões	63
5.3 Trabalhos Futuros	64
5.4 Considerações Finais	65
Referências	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Modelo de um VANT de asa fixa com os seus eixos de rotação. Os graus de liberdade são três rotações (α, β, γ e uma translação. [Fonte: PORTALVANT]	18
Figura 2.1 – Gráfico tridimensional do caminho planejado utilizando a Heurística do Algoritmo A*. As regiões mais claras apresentam os locais de maior ameaça ao VANT. [Fonte: LiXia et al. (2009)]	25
Figura 2.2 – Planejamento de caminho utilizando o algoritmo A*. O traçado mais escuro representa o caminho obtido a partir do Diagrama de Voronoi [Fonte: Yao-hong Qu et al. (2005)]	26
Figura 2.3 – Caminho de voo para VANT otimizado pelo algoritmo colonização de formigas. O caminho mais escuro mostra a rota traçada ligando os nós gerando um caminho. [Fonte: Zhang et al. (2010)].	27
Figura 2.4 – Rota de planejamento de trajetória 3D para VANT. O traço em destaque representa uma rota suavizada gerada pelo algoritmo de recozimento. [Fonte: Hao Meng e Guizhou Xin (2010)].	28
Figura 2.5 – Caminho final com restrição de tempo da missão. A parte mais escura mostrar a trajetória encontrada. [Fonte: Chan-WookLim et al. (2010)].	29
Figura 2.6 – Trajetórias 3D geradas a partir de waypoints. A linha em destaque é a rota planejada, as bolas são os waypoints e as linhas tracejadas é rota gerada. [Fonte: Alves Neto (2008)]	30
Figura 2.7 – Trajetória gerada desviando os obstáculos. A cada obstáculo no trajeto o percurso é atualizado a fim de evitar a colisão. A trajetória gerada desvia dos obstáculos. [Fonte: Nabi-Abdolyousefi e Banazadeh (2013)].	31
Figura 2.8 – Elevação digital do terreno em destaque na cor marrom e a trajetória traçada pelo algoritmo mostrada na cor azul. Com a complexidade do terreno tem-se um caminho saindo de um ponto até outro indicando uma trajetória dentro do terreno. [Fonte: Xiao et al. (2013)].	32
Figura 2.9 – Trajetórias realizadas pelos VANT's no espaço 3D linha preta e azul em destaque na Figura. Neste cenário há dois VANT's, 11 regiões a serem visitadas, representado por pontos pretos e 10 regiões proibidas pontos brancos. O número mínimo de regiões de	

navegação para cada VANT são 3. [Fonte: Ergezer e Leblebicioglu (2013)]	33
Figura 2.10 – O caminho otimizado gerado a partir do melhoramento na função do campo potencial observa-se que o caminho gerado desvia dos obstáculos. [Fonte: Chen e Zhang (2013)].	33
Figura 2.11 – Caminho gerado pelo algoritmo de busca, chamado pelos autores de algoritmo de expansão, a altura de voo é de 300m. [Fonte: Xiao-dong et al. (2013)].	34
Figura 2.12 – Resultado do caminho suavizado utilizando Bézier Cúbica. A rota em destaque mostra uma curva suavizada em um ambiente com obstáculos. [Fonte: Yang e Sukkarieh (2008)]	35
Figura 2.13 – Construções circulares utilizados para suavizar a trajetória final e remover descontinuidade na velocidade (diagrama da esquerda mostra um arco circular simples e o diagrama da direita mostra uma conexão usando dois arcos circulares e um círculo em um plano horizontal). [Fonte: Roberge et al. (2013)]	35
Figura 2.14 – Campo vetorial gerado para guiar o veículo para uma circunferência. [Fonte: Gonçalves et al. 2010)].	36
Figura 3.1 – Diagrama esquemático da arquitetura de sistema de navegação para VANT's.	39
Figura 3.2 – Diagrama esquemático da arquitetura de um planejador de trajetória	41
Figura 3.3 – Fases da missão de um veículo aéreo não tripulado. Os pontos sobre a reta base representam o início e fim de cada fase e os pontos de passagem (waypoints) que definem o objetivo da missão.	43
Figura 3.4 – Grade ocupacional que representação do modelo do mundo em 3D.	44
Figura 3.5 – Elementos de volume que formam uma grade tridimensional multivolume	44
Figura 3.6 – Escala de pesos com valores que representam as condições metrológicas, os obstáculos e os espaços livres, permitindo ou impedindo a navegação do veiculo	47
Figura 3.7 – O cálculo da função objetivo leva em conta a menor distância entre os seis vizinhos p_i , $i=1, 2, \dots, n$ do ponto corrente p_0 ao ponto objetivo p_t , ponderada por um peso w_i	50
Figura 4.1 – A linha em destaque é o caminho gerado a partir de um conjunto de coordenadas obtido no algoritmo E3D*. O caminho é obtido em áreas livres de obstáculos	56
Figura 4.2 – Efetivação do caminho traçado, quanto mais obstáculos no caminho, mais desvio ocorrerá no decorrer do percurso gerando assim um caminho com bastante mudança de	

sentido para encontrar o caminho final	57
Figura 4.3 – Testes com em ambiente com poucas áreas livres, onde os pontos foram previamente inseridos, a fim de gerar uma rota com muitas mudanças de curso	58
Figura 4.4 – Mostra uma rota em um ambiente com muitos obstáculos distribuídos aleatoriamente, dificultando a geração da rota	58
Figura 4.5 – Mostra o resultado de uma trajetória em um ambiente de navegação com mais espaços livres. O caminho gerado diminuiu o número de desvio do percurso	59
Figura 4.6 – Resultado da simulação de um voo em um ambiente com poucos obstáculos. O caminho gerado quase não apresenta variações no percurso	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Tabela demonstrativa dos movimentos realizados pela aeronave.....	49
Tabela 3.2 – Pseudocódigo do algoritmo E3D*	52

LISTA DE TERMOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional.
A*	A estrela.
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
CemPRA	Centro de Pesquisas Renato Archer.
CTA	Centro Técnico Espacial.
DRIL	Detecção, reconhecimento, identificação e localização.
E3D*	Euclidiano 3D-estrela.
IFR	Regras de Voo por Instrumentos.
ITA	Instituto Tecnológico da Aeronáutica.
GNSS	Sistemas Globais de Navegação por Satélite.
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais.
UAV	Unmanned Aerial Vehicle.
UNB	Universidade de Brasília.
UFAM	Universidade Federal do Amazonas.
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
USP/SC	Universidade de São Paulo em São Carlos.
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado.
VFR	Regras de Voo Visual.
VSTOL	Decolagem e aterrissagem vertical.

Capítulo 1

Introdução

Na aviação civil, o caminho das aeronaves é definido por meio do plano de voo. Este documento contém informações relacionadas com um voo planejado de uma aeronave ou com parte do mesmo que são fornecidas aos órgãos que prestam serviços ao tráfego aéreo. Envolve basicamente dois pontos principais de segurança: o cálculo do consumo de combustível a concordância do plano com o controle de tráfego aéreo, para minimizar as possibilidades de colisão em pleno voo (FURTADO, 2008).

Nos sistemas autônomos, planejar uma trajetória¹ consiste em encontrar caminhos livres de colisão em um ambiente estático ou dinâmico (Chan-Wook Lim et al., 2010; Hao Meng e Guizhou, 2010; Karimoddini et al., 2010). Planejar o caminho de um Veículo Aéreo Não Tripulado, ou VANT, no espaço tridimensional é o problema abordado neste trabalho, o qual pode ser sintetizado por meio da seguinte pergunta: *Como obter um caminho seguro para um veículo aéreo não tripulado que satisfaça os requisitos da missão?*

Os VANT's são sistemas robóticos cuja locomoção ocorre no espaço aéreo por meio de empuxo aerodinâmico, como os aviões ou helicópteros, ou por meio da flutuação, como os balões e dirigíveis. Na sua forma mais simples, os VANT's podem ser operados remotamente, ou seja, controlados à distância por um operador humano para desempenhar determinada tarefa. Atualmente, a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico para essa classe de veículos robóticos enfocam o aspecto da execução autônoma de atividades que são atribuídas a esses sistemas.

Para o funcionamento autônomo, o sistema robótico deve perceber a sua própria situação e aquela do ambiente onde ele evolui, toma decisões de maneira independente e movimenta-se

¹Trajetória e caminho são sinônimos. Mas, para fins dessa dissertação entende-se como trajetória uma função temporal que descreve o movimento do corpo através desse caminho.

para cumprir a missão que lhe foi atribuída, sem precisar da dependência constante de um operador humano, ou então agindo em cooperação com esse operador (BUENO, 2005).

Para um VANT, o planejamento de voo deve garantir não só uma rota segura, mas também estabelecer que essas rotas observem as exigências impostas por meio das condições internas e externas da aeronave, além, claro, do cumprimento efetivo da missão (LENTILHAC, 2010; NALDI e MARCONI, 2010).

Compreendem-se como condições internas, os fatores que dependem da aeronave, tais como (LIXIA et al., 2009; NALDI e MARCONI, 2010):

- As velocidades nas quais pode ser operadas;
- O consumo específico do combustível, e;
- A capacidade máxima de combustível a bordo.

As condições externas compreendem:

- Fatores meteorológicos;
- O relevo da área sobrevoada, e;
- A existência de zonas de exclusão.

Neste trabalho, considera-se que o VANT é uma aeronave de asa fixa, movida a empuxo aerodinâmico, com 3 graus de liberdade, de porte pequeno a médio (envergadura entre 1,00 e 2,00m). Os VANT's desse tipo voam em ambiente ao ar livre (outdoor), e são, em geral, lançados manualmente com pouso controlado. A Figura 1.1 ilustra um modelo de VANT de asa fixa.

O uso de aeronaves não tripuladas está aumentando devido ao grande número de aplicações e serviços potenciais oferecidos por este tipo de veículo, principalmente quando aplicados a tarefas que colocam em risco a vida humana ou que apresentem custo elevado, quando realizada por meios convencionais. Seu campo de aplicação estende-se de domínios

militares aos civis, na execução de diferentes tipos de missões.

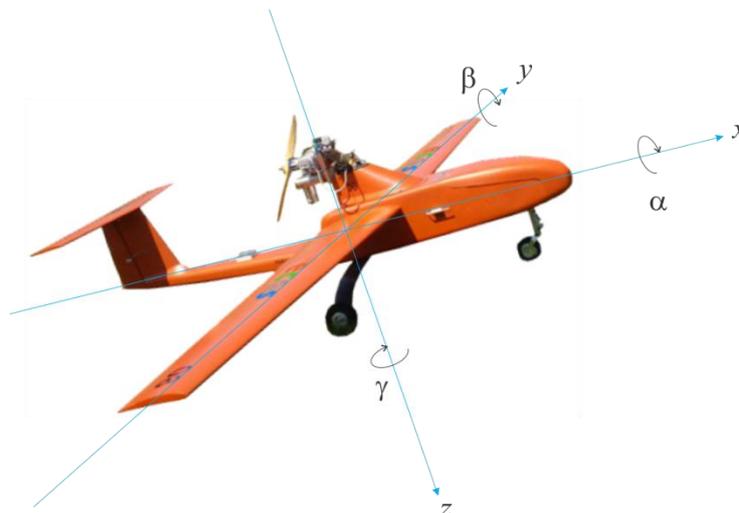


Figura 1.1. Modelo de um VANT de asa fixa com os seus eixos de rotação. Os graus de liberdade são três rotações (α, β, γ) e uma translação. [Fonte: PORTAL VANT].

Quando se considera o VANT em aplicações civis, há um grande escopo de cenários possíveis para sua utilização, por exemplo:

- Pesquisa ambiental remota;
- Monitoração e certificação de poluição;
- Gerenciamento de queimadas;
- Segurança;
- Monitoração de fronteira;
- Oceanografia.
- Agricultura e aplicações de pesca.

Em geral, todas estas aplicações podem ser divididas em quatro grandes grupos: aplicações ambientais, aplicações de segurança, aplicações de comunicação e aplicações de monitoramento e vigilância (PASTOR et al., 2007).

Quando os VANT's são empregados para missões de monitoramento ou cobertura de

grandes regiões, por exemplo, sua operacionalização consiste basicamente em decolar, voar seguindo rota e altitude pré-determinadas, chegar a um ou mais pontos de controle e sobrevoá-los a altitudes e tempo pré-programados, transmitir as informações de sinais e imagens captadas, deslocar-se até o ponto de recolhimento e pousar em segurança (LIXIA et al., 2009; WU et al., 2011).

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um planejador de caminho seguro para veículo aéreo não tripulado em missões de monitoramento, cobertura ou vigilância de regiões amplas e esparsas, típicas da região amazônica. Para o planejamento do caminho em missões dessa natureza, deve-se levar em conta além dos fatores internos e externos da aeronave, a autonomia e segurança do voo. O planejador leva em consideração possíveis interferências no percurso do VANT, objetivando prevenir tragédias e reduzir os custos da missão do veículo. O caminho é descrito por uma curva tridimensional que descreve todo o percurso, levando em consideração para o seu traçado os requisitos da missão e o plano de voo.

A principal contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para a geração de caminhos tridimensionais seguros, ótimos ou próximos do caminho ótimo, levando em consideração as restrições das aeronaves e da missão. Essa metodologia provê ao sistema autônomo não só um plano de voo exequível como também alternativa aos eventuais problemas que possam comprometer o objetivo da missão, levando em conta menor caminho possível no espaço tridimensional. A abordagem objetiva dotar a aeronave de um planejamento seguro sem comprometer a segurança do voo visando à eficiência da missão em um ambiente grande, dinâmico, e incerto ao ar livre.

1.1 Motivação

No Brasil, os primeiros esforços na área de VANT's deram-se na década de 80, quando o Centro Técnico Aeroespacial (CTA) desenvolveu o projeto Acauã. Nos últimos anos, em competições internacionais da SAE Aero Design, foram premiados VANT's rádio-controlados construídos pela

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Universidade de São Paulo em São Carlos (USP/SC), Universidade Estadual Paulista (UNESP), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) e Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (Cefet-MG)².

Atualmente, em um patamar tecnológico mais elevado, projetos visando o desenvolvimento de VANT's autônomos são conduzidos pelos institutos de pesquisa CTA e Centro de Pesquisas Renato Archer (CenPRA), pelas universidades USP/SC, Universidade de Brasília (UNB), UFMG, UFRN e pelas empresas Aeromot, Fitec e Prince Air Models. Recentemente a Universidade Federal do Amazonas (UFAM) por meio do Instituto de Computação e de seu grupo de pesquisa em Visão Computacional e Robótica, se integrou junto a Universidade Federal de Minas Gerais na construção e desenvolvimento do sistema de controle de um VANT. A participação nesse projeto motivou o desenvolvimento de diversos componentes de software, viabilizando o desenvolvimento de um planejador de caminhos.

De acordo com Pastor et al. (2007), o controle da missão, o planejamento de caminho de voo e da carga útil são os principais gargalos que podem impedir o desenvolvimento real de VANT's no setor civil. Os VANT's militares usam projetos de controle específicos, especialmente sob medida para a missão de monitoramento e vigilância que eles devem executar. No entanto, um VANT civil deveria ser capaz de implementar uma grande variedade de missões com um pequeno tempo de reconfiguração, caso a aplicação tenha a necessidade de economicamente viável.

Planejar caminho é um problema desafiador para o desenvolvimento de veículos aéreos não tripulados realmente autônomos (Yao-hong Qu et al., 2005). A segurança no percurso deve ser garantida para a sobrevivência dos VANT's, não importando o tipo de sua missão. Esse fato motivou o desenvolvimento de um planejador de caminho seguro para o voo levando em conta as

²Bueno, S. S. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens/2005/10/samuel.htm>> Acesso em: 25 out. 2013

restrições impostas pela missão, gerando rotas que possa facilitar a navegação do veículo em ambiente pré-definido.

O planejamento de caminho incerto não confiável dificulta o planejador da missão em tratar ocorrências que comprometam não só o voo, como também a execução das tarefas que compõem a missão. Os danos causados por falhas no voo podem levar, no pior dos casos, a perda total do veículo, gerando um alto custo. Sistemas com o planejamento de caminhos viabilizam o melhor controle da missão e conseqüentemente o cumprimento da missão de forma segura.

1.2 Justificativa

O planejamento de voo na aviação comercial é comumente feito por meio de cartas eletrônicas para navegadores GNSS (Sistemas Globais de Navegação por Satélite) portáteis, como os populares Garmin 496, 695 e 696. Essa abordagem é feita como meio suplementar de navegação para voos VFR (em condições visuais), sendo utilizadas preponderantemente nos voos IFR (por instrumentos). Embora essas cartas não sejam geradas por meio de um sistema planejador, seu uso já habilita as aeronaves modernas ao voo praticamente autônomo. Por outro lado, muito do desenvolvimento na área de VANT's está focado no próprio desenho da aeronave, sua manobrabilidade e sua dinâmica de operação, deixando uma ampla lacuna tecnológica no que diz respeito ao emprego de técnicas que permitam aos VANT's planejarem e agirem de forma verdadeiramente autônoma.

Unir as restrições impostas pela missão com os fatores dependentes da aeronave para a geração de planos de voo é um desafio importante e que habilitará os VANT's a desenvolverem com mais eficiência a execução da missão. Trabalhos recentes tratam esse aspecto de forma desassociada, enfatizando, na maioria dos casos, a captura de informações e o planejamento de voo (Chan-Wook Lim et al., 2010) ou ainda as restrições impostas pela aeronave, sensores ou fatores externos e internos envolvidos no voo (LENTILHAC, 2010; NALDI e MARCONI, 2010; WU et al., 2011).

Ao associarmos esses conjuntos de restrições em um planejador capaz de definir rotas ótimas sob as condições impostas pela missão com os fatores determinantes do voo é a principal justificativa deste projeto de pesquisa. Esse planejador será integrado à arquitetura do sistema de controle do VANT, garantindo assim um largo passo no desenvolvimento do sistema verdadeiramente autônomo.

A utilização de planejadores para a navegação de VANT's é muito importante não só para o planejamento de voos seguros, mas também para a viabilização de projetos de aeronaves autônomas, garantindo a execução do voo em ambiente simulado, reduzindo os custos de projetos e flexibilizando a experimentação de diferentes tipos de missões em diferentes cenários de forma segura e plenamente controlável.

1.3 Objetivos

Para melhor compreensão dos objetivos desta dissertação, os mesmos estão divididos em geral e específicos.

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um planejador de caminho no espaço tridimensional para veículo aéreo não tripulado que atenda as restrições imposta pela missão com os fatores de voo.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

1. Prover um VANT de um sistema de planejamento de caminho capaz de gerar rotas que viabilizem o cumprimento da missão;
2. Integrar o planejamento do voo com as restrições da missão e do voo;
3. Dotar o sistema da capacidade de se planejar frente às condições externas do VANT;

4. Avaliar o planejador sob diferentes condições de controle simulado.

1.4 Organização do Trabalho

O trabalho é constituído por cinco capítulos. No Capítulo 1 é apresentada a introdução do trabalho com o contexto no qual o mesmo se insere. São apresentadas também a motivação, a justificativa e os objetivos do trabalho. O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre os conceitos e técnicas necessárias para o desenvolvimento de sistemas planejadores de caminhos para VANT's. No Capítulo 3 é apresentada a metodologia para desenvolvimento do trabalho. O Capítulo 4 é descrito os resultados referentes aos testes realizados para validar os métodos apresentados. Os trabalhos futuros, as limitações e considerações finais sobre a Pesquisa são mostradas no Capítulo 5.

Capítulo 2

Trabalhos Relacionados

Neste capítulo são apresentados os trabalhos relacionados com a abordagem aqui desenvolvida. Esses trabalhos são todos voltados ao desenvolvimento de planejamento de caminho para veículos aéreos não-tripulados.

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 ainda é um tema de pesquisa ativo e desafiante. Os VANT's 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).

A principal intenção dos métodos de planejamento de caminhos é trabalhar a trajetória de voo seguro, ideal ou abaixo do ideal, otimizando alguma relação de custo, ao longo do qual VANT é capaz de realizar a tarefa pré-determinada e evitar as ameaças hostis, empregando a aeronave em cenários clássicos de missões tipo DRIL (detecção, reconhecimento, identificação e localização). Para melhor estruturação dos trabalhos relacionados desenvolvida nesta dissertação o texto seguinte dividiu-se em duas seções principais a que trata do planejamento heurístico dos caminhos e a que trata do traçado tridimensional das curvas respectivamente.

2.1 Planejamento Heurístico

No trabalho de LiXia et al. (2009) foi proposto e simulado um planejador de caminho para VANT que navega em baixa altitude, considerando um mapa de navegação seguro em ambiente de perigo constante, a tarefa principal é gerenciar as informações do ambiente no que diz respeito ao

tipo de ameaças, para isto utilizou-se uma heurística melhorada do algoritmo A* (lê-se A-estrela). Os resultados obtidos por meio de simulações mostraram a eficiência do algoritmo A*, que é relativamente rápido na escolha do melhor caminho e apresenta facilidade de adaptação à necessidade do problema. Isso motivou sua aplicação para a escolha dos pontos da trajetória neste trabalho. A Figura 2.1 mostra gráficos 3D e projeção vertical do caminho encontrado com a melhoria heurística algoritmo A*.

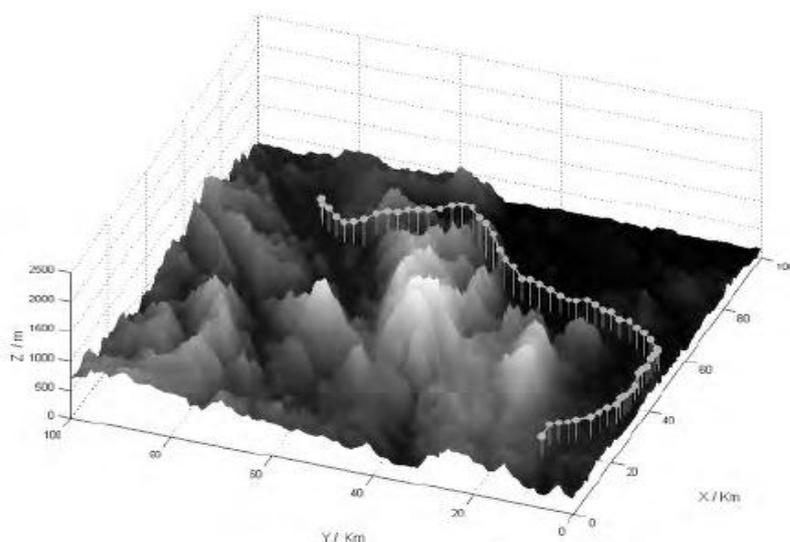


Figura 2.1. Gráfico tridimensional do caminho planejado utilizando a Heurística do Algoritmo A*. As regiões mais claras apresentam os locais de maior ameaça ao VANT. [Fonte: LiXia et al. (2009)].

O trabalho desenvolvido por Yao-hong Qu et al. (2005) utilizou duas abordagens principais: a primeira emprega um algoritmo genético e campos potenciais ideais para planejamento de trajetória *off-line*; a segunda abordagem usa o diagrama de Voronoi para encontrar o caminho mínimo entre dois pontos e a heurística A* para a busca do melhor caminho. O objetivo é planejar um caminho para um ponto alvo de modo que a exposição a ameaças seja minimizada, mantendo o consumo de combustível em níveis aceitáveis. Isso implica encontrar um caminho do ponto A para o ponto B, de tal forma que minimize ou evite o risco, de acordo com as restrições, por exemplo, combustível limitado, tempo mínimo, entre outros. A ideia de planejar a caminho com restrições favoreceu a adaptação, neste trabalho, de uma função de custo que avalie a formação do caminho a partir do menor consumo de energia ou combustível do

VANT.

A Figura 2.2 ilustra o traçado do caminho mais curto entre dois pontos, o ponto 2 (inicial) e o ponto 1 (final). O caminho encontrado utiliza o algoritmo A*, que emprega as arestas do Diagrama de Voronoi formado pelo conjunto de pontos no plano, como um grafo.

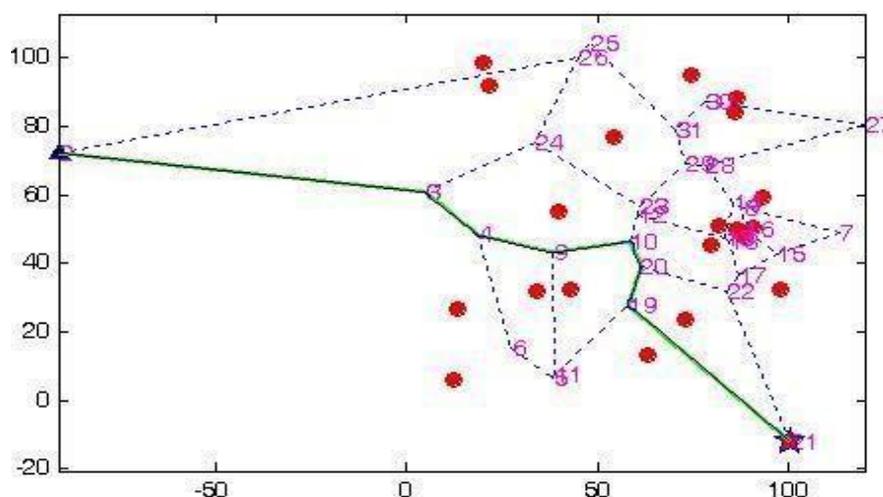


Figura 2.2: Planejamento de caminho utilizando o algoritmo A*. O traçado mais escuro representa o caminho obtido a partir do Diagrama de Voronoi [Fonte: Yao-hong Qu et al. (2005)].

Um novo método de planejamento de caminho para VANT baseado em otimização de colônia de formigas foi apresentado por Zhang et al. (2010). Este método estuda o comportamento natural das formigas em busca de alimentos, onde o ponto alvo é representado pelos alimentos que as formigas precisam encontrar. As formigas se deslocam para o nó de destino através de vários nós dentro do espaço de navegação. No algoritmo são consideradas as constantes ameaças inimigas sobre os caminhos e a distância para o nó de destino.

Portanto, o caminho de voo ideal para o VANT é expresso por um grupo de nós, o qual é obtido por meio das formigas que encontram o percurso ótimo para a fonte de alimento. O algoritmo de otimização de colonização de formigas para VANT é um método de planejamento de caminho baseado e caracterizado como codificação simples e boa orientação de otimização, e a simulação resultados também mostra sua eficácia conforme ilustrado no gráfico da Figura 2.3. Uma característica relevante desse trabalho são os nós encontrados pelas formigas que no

decorrer do caminho formam um trajeto seguro em busca dos alvos (os alimentos). Os nós são interligados gerando um caminho dentro de um espaço de navegação.

Lentilhac (2010) desenvolveu um planejador de navegação segura considerando um esquema cooperativo de VANT's. 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 o espaço de navegação conta com o auxílio de vários veículos que trabalham de maneira cooperativa para colher o máximo de informações possíveis do ambiente navegado. A navegação das aeronaves é planejada por meio de um Algoritmo Genético. A construção do plano de voo foi dividida em duas etapas: A primeira etapa trata do algoritmo que calcula um 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 trajeto no espaço de navegação. O Algoritmo Genético calcula o plano de voo para que o VANT possa navegar, tanto quanto possível em altitude de cruzeiro e com velocidade máxima de confiabilidade. Uma característica encontrada nesse trabalho é a limitação dos sensores, uma vez que o sistema cooperativo trabalha com um número de VANT's desconhecidos, as informações percebidas pelas aeronaves limitam-se a cobertura dos sensores, necessitando de vários veículos para que as informações captadas sejam satisfatórias para o mapeamento completo da aérea.

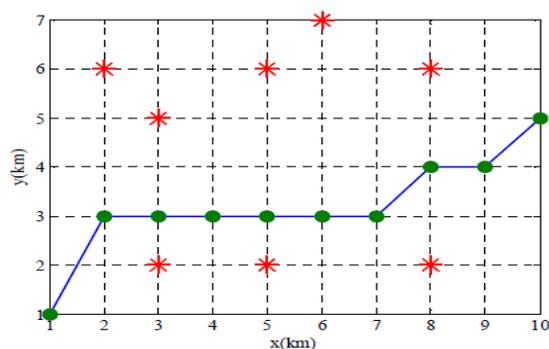


Figura 2.3. Caminho de voo para VANT otimizado pelo algoritmo colonização de formigas. O caminho mais escuro mostra a rota traçada ligando os nós gerando um caminho [Fonte: Zhang et al. (2010)].

O planejamento de caminho para VANT abordado em Hao Meng e Guizhou Xin (2010) é baseado no Algoritmo Genético de Recozimento Simulado. Este algoritmo é usado para planejar pista de voo de VANT em superfície. No algoritmo, o mapa de elevação digital é planejado considerando superfície com pequena ameaça para obter uma superfície mais suave para o voo, o planejamento do mapa é feito em quatro direções em seguida utiliza o algoritmo genético recozimento simulado para planejar as rotas tridimensionais na superfície de ameaça mínima.

Com o avanço do desenvolvimento da inteligência artificial e da tecnologia de computador, o planejamento de rota para Veículo Aéreo Não Tripulado tornou-se o principal conteúdo da investigação do sistema de planejamento de tarefas. Na real aplicação, o ambiente de voo é complexo e muitas restrições podem aparecer. Portanto, o problema fundamental do planejamento de rotas é estabelecer um bom ambiente de planejamento e algoritmos de planejamento eficazes. A Figura 2.4 mostra uma rota suavizada no espaço tridimensional gerada pelo algoritmo de recozimento.

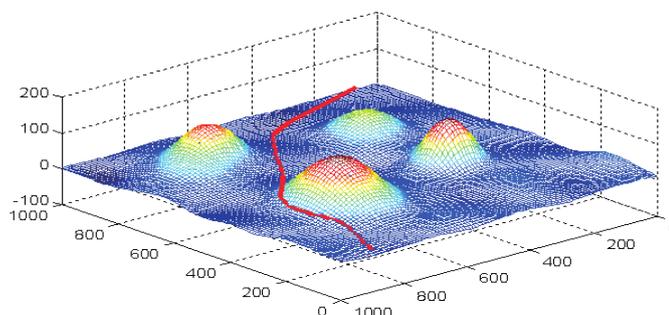


Figura 2.4: Rota de planejamento de trajetória 3D para VANT. O traço em destaque representa uma rota suavizada gerada pelo algoritmo de recozimento. [Fonte:Hao Meng e Guizhou Xin (2010)].

Chan-Wook Lim et al. (2010) propuseram um algoritmo de planejamento de caminho para vigilância de VANT's com missão de restrição de tempo. O caminho gerado é sub-otimo em relação ao tempo de voo, pois neste trabalho o VANT deve observar os pontos de observação que definirão a trajetória do voo, os alvos dentro do intervalo de tempo. Algumas restrições da missão devem ser adotadas, como a altura e a velocidade que o veículo pode operar para que não ocorra colisão com o terreno. Para o planejamento de trajetória foram utilizado algoritmos de

planejamento de trajetória com lógica de segmentos para observação do terreno que foram gerados pela sequência de observação que satisfaz as restrições de tempo, conforme ilustrado na Figura 2.5.

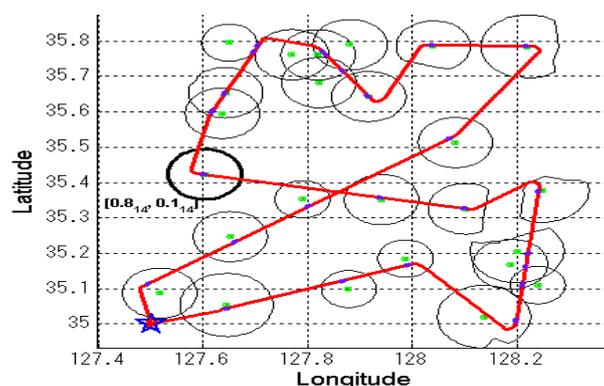


Figura 2.5. Caminho final com restrição de tempo da missão. A parte mais escura mostrar a trajetória encontrada. [Fonte: Chan-Wook Lim et al. (2010)].

Observa-se na figura 2.5 que cada segmento foi conectado por curva *Dubins*, que mostra o caminho final gerado. Nota-se no trabalho de Chan-Wook Lim et al. (2010), que a rota foi gerada, porém não houve uma preocupação com a suavização dessas rotas, uma vez que planejamento de caminho para veículos aéreos é um sistema mais complexo e envolve muito mais requisitos, quando voltado para o mundo real, geração de rota por se só não resolve problema de navegação de VANT. A proposta desenvolvida neste trabalho de pesquisa é gerar um caminho seguro, levando em consideração a suavização da rota encontrada, um conhecimento prévio do terreno e dos obstáculos de acordo com a missão estabelecida.

No trabalho de Alves Neto (2008), a geração de caminho é caracterizado por um conjunto de pontos definidos no espaço de navegação, o planejamento do movimento significa determinar uma maneira de atingir cada um desses pontos, levando em consideração características como as restrições de movimento do robô, o tempo gasto e a energia necessária.

De maneira diferenciada na abordagem aqui desenvolvida os pontos não são definidos previamente, os pontos são utilizados para gerar o caminho ótimo de acordo com a necessidade

da missão. A Figura 2.6 mostra uma trajetória tridimensional, gerada a partir do conjunto de *waypoints*.

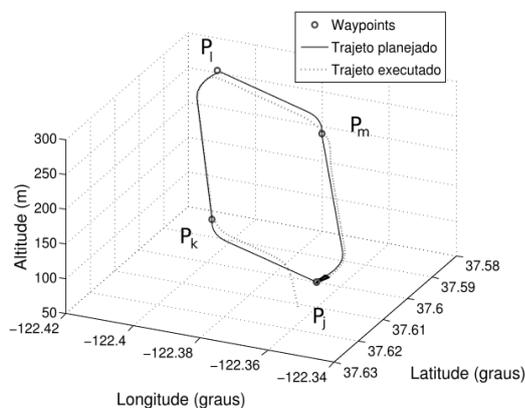


Figura 2.6. Trajetórias 3D geradas a partir de *waypoints*. A linha em destaque é a rota planejada, as bolas são os *waypoints* e as linhas tracejadas é rota gerada. [Fonte: Alves Neto (2008)].

Naldi e Marconi (2010) abordou o problema de planejamento para aeronaves de pouso e decolagem vertical (*Vertical/Short Take-off and Landing – V/STOL*). O problema consiste em é minimizar a variável tempo entre dois pontos. Para definir uma trajetória para esta classe de veículo devem ser consideradas duas condições possíveis de voo: o voo pairado e o voo nivelado. O voo pairado é caracterizado por valores pequenos de velocidade, de maneira que as forças mais relevantes que atuam sobre o veículo são dadas pelo impulso da hélice e a força da gravidade, enquanto que voo nivelado à velocidade deve ser suficientemente grande, de maneira que a aeronave seja controlada através das forças aerodinâmicas. Os autores consideraram a variável tempo, o que define o planejamento de trajetória, no qual o problema principal é controlar o tempo entre pontos de saída e chegada que deve ser o menor possível. A proposta desenvolvida nesta dissertação não considera a variável tempo, pois o principal objetivo é encontrar um caminho segura para veículos aéreos dentro do de um espaço tridimensional.

2.2 Traçado dos Caminhos Tridimensionais

O caminho para os veículos aéreos se desenvolveu em meio de uma curva no espaço tridimensional. Para isso é necessário o emprego de técnicas que permitam que os *waypoints* da

rota (pontos de referência para a navegação ou pontos-alvo de saída e chegada) estejam em diferentes níveis de altitude do solo, e que ainda assim, possam gerar caminho de mínima distância e de curvatura contínua, respeitando as características cinemáticas e dinâmicas da aeronave.

Nabi-Abdolyousefi e Banazadeh (2013) propuseram um método de planejamento de caminho 3D *off-line* para um veículo aéreo de vigilância. Neste método, o veículo aéreo passa por pontos específicos no decorrer do caminho, evitando colisão entre veículos e obstáculos fixos. Para realizar a missão, o caminho é gerado utilizando B-splines. Em seguida, o veículo rastrear o caminho por meio de suas restrições dinâmicas, como limitações sobre desvios superfícies de controle. A análise dos resultados foi realizada por uma simulação.

O objetivo do trabalho foi construir e desenvolver uma trajetória de voo ótima para VANT em um ambiente conhecido. A missão do VANT é mover a partir de um ponto de referência para um ponto fixo, conforme Figura 2.7, enquanto o VANT visita pontos pré-estabelecidos, para localizar objetos perdidos.

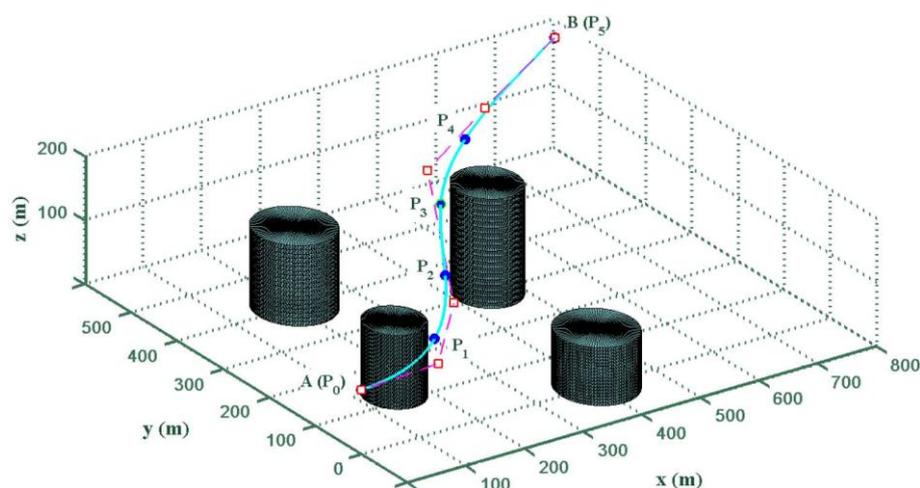


Figura 2.7. Trajetória gerada desviando os obstáculos. A cada obstáculo no trajeto o percurso é atualizado a fim de evitar a colisão. A trajetória gerada desvia dos obstáculos. [Fonte: Nabi-Abdolyousefi e Banazadeh (2013)]

Xiao et al. (2013) propuseram um novo algoritmo de planejamento de trajetória 3D para veículo terrestre não-tripulado. O algoritmo é baseado na colonização de formigas. O problema

deste trabalho é planejar uma rota em uma superfície elevada, ou elevação digital. A elevação digital caracteriza o terreno com informações 3D, ambiente não estruturado, esses terrenos apresentam robustez e eficiência na elevação do terreno. O algoritmo colônia de formiga procurar o melhor caminho em um ambiente não estruturado, o algoritmo encontro o menor caminho desviando dos obstáculos, mostrado na Figura 2.8. Os resultados para validação foram obtidos por estatísticas de simulação.

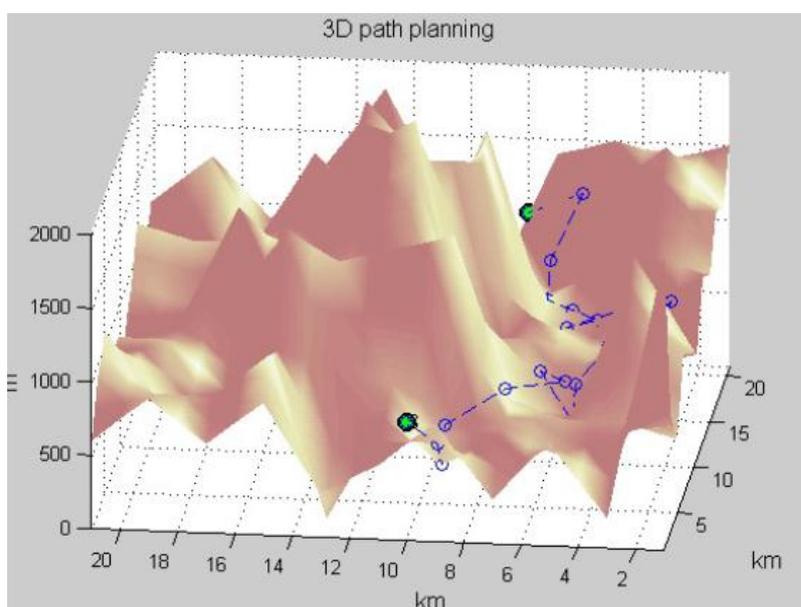


Figura 2.8. Elevação digital do terreno em destaque na cor marrom e a trajetória traçada pelo algoritmo mostrada na cor azul. Com a complexidade do terreno tem-se um caminho saindo de um ponto até outro indicando uma trajetória dentro do terreno. [Fonte: Xiao et al. (2013)].

No trabalho de Ergezer e Leblebicioglu (2013) abordaram o planejamento de caminho para vários VANT's. Os caminhos planejados maximiza a quantidade de coleta de informação em regiões pré-estabelecida, evita regiões desconhecidas e/ou sem acesso permitido, alcançando o cumprimento da missão. A abordagem se estende estudo prévio para cooperativa de VANT's, considerando as restrições do ambiente de navegação 3D. O planejamento de caminho é tratado pelos autores como um problema de otimização. O problema foi resolvido por algoritmo genético e caixeiro viajante determinar a sequência de visita na região e que região será visitada e qual VANT fará a visita, conforme Figura 2.9. Os resultados obtidos no trabalho foram por meio de simulação.

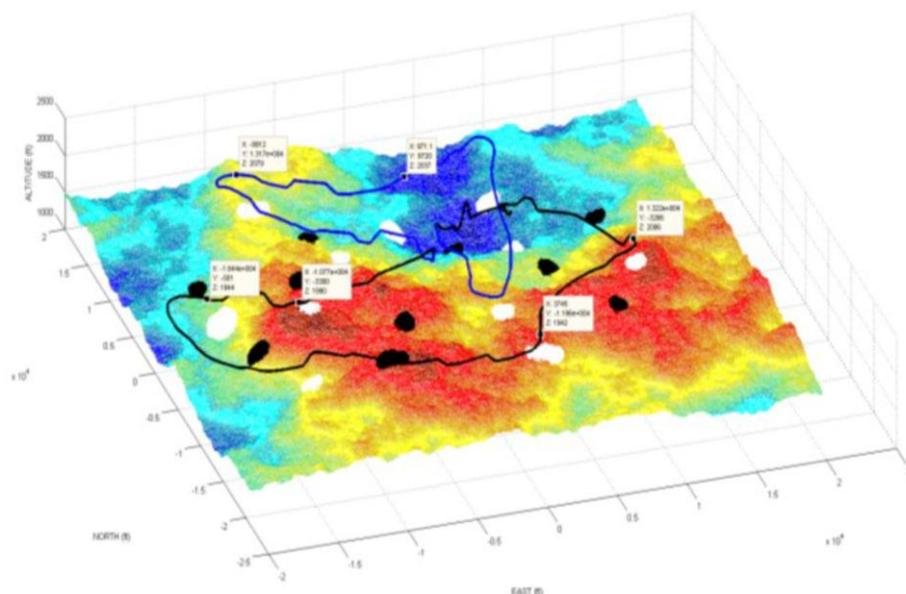


Figura 2.9. Trajetórias realizadas pelos VANT's no espaço 3D linha preta e azul em destaque na Figura. Neste cenário há dois VANT's, 11 regiões a serem visitadas, representado por pontos pretos e 10 regiões proibidas pontos brancos. O número mínimo de regiões de navegação para cada VANT são 3. [Fonte: Ergezer e Leblebicioglu (2013)].

A fim de resolver o problema de planejamento de trajetória para VANT em ambiente dinâmico, um algoritmo de planejamento de trajetória 3D baseado na melhoria de campo potencial artificial foi proposto por Chen e Zhang (2013). O problema da região proibida é resolvido por meio da melhoria na função do campo potencial. O algoritmo de busca cria pontos de guia no campo potencial para orientar o veículo dentro do ambiente com obstáculos dinâmicos Figura 2.10.

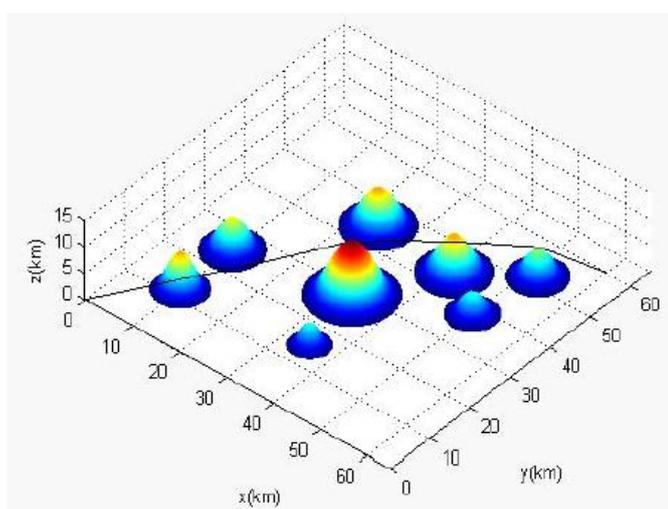


Figura 2.10. O caminho otimizado gerado a partir do melhoramento na função do campo potencial observa-se que o caminho gerado desvia dos obstáculos. [Fonte: Chen e Zhang (2013)].

Xiao-dong et al. (2013) propuseram um novo método de planejamento de caminho para Veículo Aéreo Não-Tripulados online. O trabalho desenvolveu um algoritmo que gera caminho seguro desde a posição inicial até o destino final sem qualquer tipo de colisão ou ameaça que possa interferir no cumprimento da missão. A entrada da tarefa é um mapa de elevação digital e as informações de ameaças. Neste trabalho uniu-se algoritmos de computação gráfica, que caracteriza o terreno com informação em 3D, o plano de voo, que especifica as regiões acessíveis. Gerando assim um caminho livre de colisão. O algoritmo de busca cria uma lista de caminhos possíveis e a cada ameaça no decorrer da trajetória criar novo nós que são inseridos nesta lista de caminhos, até gerar uma rota segura e o cumprimento da missão Figura 2.11.

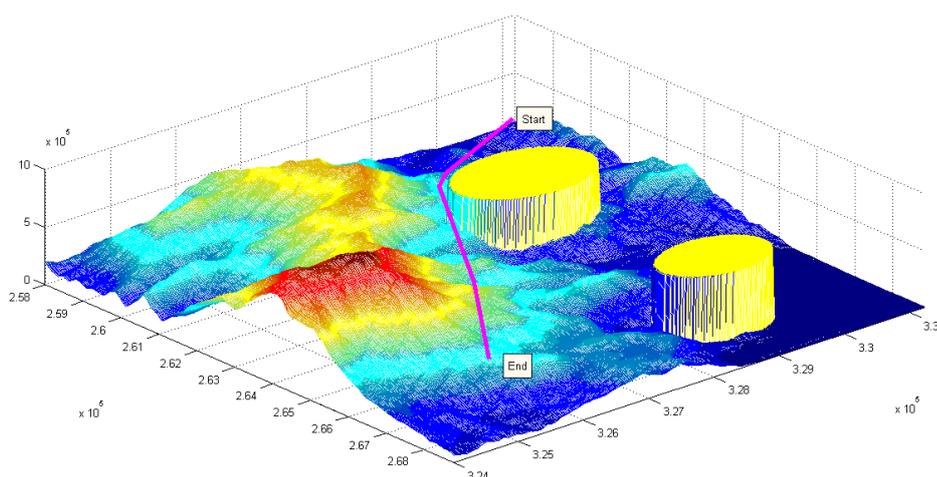


Figura 2.11. Caminho gerado pelo algoritmo de busca, chamado pelos autores de algoritmo de expansão, a altura de voo é de 300m. [Fonte: Xiao-dong et al. (2013)].

Yang e Sukkarieh (2008) desenvolveram uma abordagem para suavização de caminhos tridimensionais para VANT's que operem em ambientes naturais irregulares. A proposta utiliza os requisitos de curvatura contínua, garantida por meio de uma curva de *Bézier Cúbica*, como mostrado na Figura 2.12. O uso das curvas de *Bézier* reduz o grau do polinômio interpolador e facilita o controle do traçado na curva. São várias as abordagens que utilizam técnicas de aproximação polinomial (Macharet et al., 2010, Choi e Elkaim, Alves Neto 2008). Facilidade de emprego dessas técnicas e a flexibilidade para geração de caminho foi o principal motivo para o uso de *B-Splines* nessa dissertação.

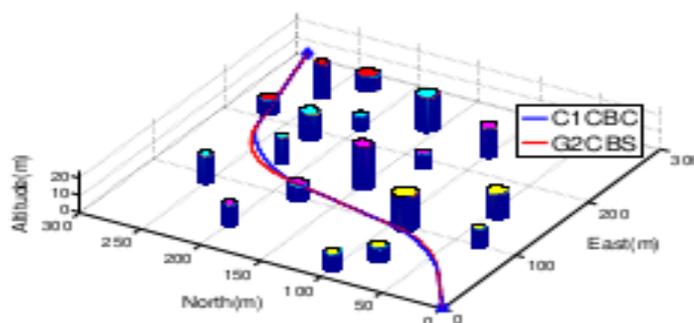


Figura 2.12. Resultado do caminho suavizado utilizando Bézier Cúbica. A rota em destaque mostra uma curva suavizada em um ambiente com obstáculos. [Fonte: Yange Sukkarieh (2008)].

Roberge et al. (2013) determina o traçado do caminho tridimensional por meio da remoção de todas as discontinuidades da velocidade, conectando a linha de segmentos com arcos circulares simples (quando a energia disponível é suficiente) ou círculos num patamar horizontal (quando o poder disponível não é suficiente para voar um arco circular simples), como mostrado na Figura 2.13.

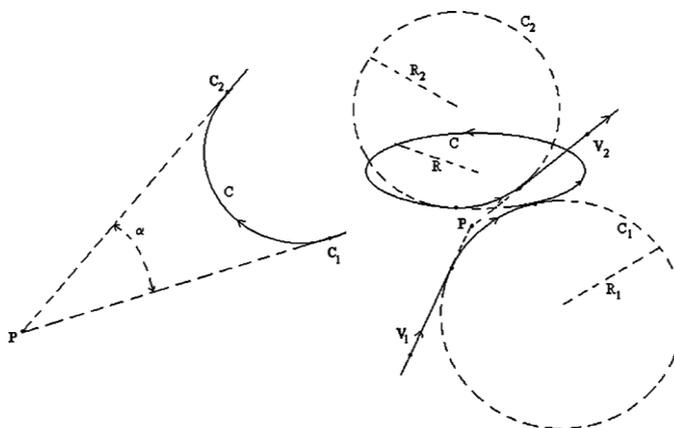


Figura 2.13. Construções circulares utilizados para suavizar a trajetória final e remover discontinuidade na velocidade (diagrama da esquerda mostra um arco circular simples e o diagrama da direita mostra uma conexão usando dois arcos circulares e um círculo em um plano horizontal). [Fonte: Roberge et al. (2013)].

Macharet et al. (2010) utiliza uma curva de Bézier Cúbica a fim de gerar um caminho viável para uma aeronave de asa fixa pequena, com severas limitações. O problema apresentado assume um ambiente livre de obstáculos, onde as únicas restrições para a navegação do robô são impostas apenas por suas próprias restrições cinemáticas. Por meio de modelagem matemática, a suavização de caminho considera três restrições de movimento que são: curvatura máxima, torção

máxima e o ângulo máximo (ou mergulho), ângulo realizável pelo robô no espaço 3D, que são fundamentais para o planejamento de caminho para veículos reais, tais restrições garante a continuidade da curvatura.

No trabalho de Gonçalves et al. (2010) foram empregados os campos vetoriais para a suavização de caminho. Nessa técnica um campo vetorial contínuo de força é capaz de controlar um robô para que sua configuração aproxime e circule uma dada curva. A Figura 2.14 mostra exemplo de campo vetorial gerado para guiar robôs para uma curva fechada em um espaço de duas dimensões.

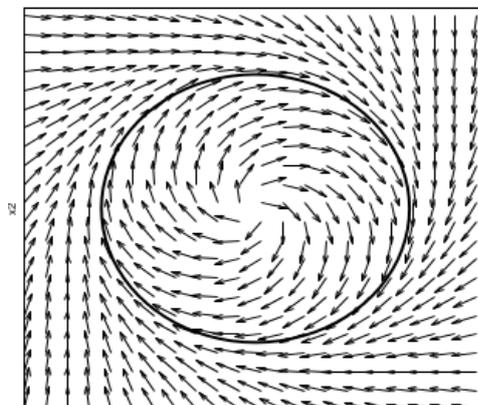


Figura 2.14. Campo vetorial gerado para guiar o veículo para uma circunferência. [Fonte: Gonçalves et al. 2010)].

Li et al. (2012) propuseram um novo método de planejamento de rota em ambiente de tensão monitorados por radares. O problema tratado no método foi penetração em ambiente monitorado por redes de radar. Técnicas convencionais usam os radares como se fosse parte do terreno.

Capítulo 3

Planejamento de Caminho Tridimensional para Veículos Aéreos Não Tripulados.

Este capítulo descreve a metodologia desenvolvida para o planejador de caminhos tridimensionais para VANT's. Primeiramente são descritas as características gerais que compreendem a navegação e o problema de planejamento de trajetórias de VANT's. Em seguida são apresentados os componentes do modelo de planejamento utilizados para a definição da metodologia. Por fim, são descritos os procedimentos que compõem o planejador, o algoritmo E3D* define o caminho tridimensional.

3.1 O Planejamento de Trajetórias e o Sistema de Navegação de um VANT.

Para um veículo aéreo autônomo, entende-se por sistema de navegação conjunto de algoritmos capaz de fornecer a posição, a atitude (orientação do veículo tomando-se um referencial definido) e as velocidades lineares e angulares da aeronave com respeito a um sistema de coordenadas de referência. A navegação se realiza por meio da interação entre esses módulos, os quais tomam por base as informações providas por um caminho previamente planejado. O navegador usa as informações do caminho planejado e verifica com a trajetória real descrita pelo veículo. Essas informações são repassadas para os controladores de mais baixo nível, o piloto e a guiagem, responsáveis pelas atuações sobre as superfícies aerodinâmicas e sobre os motores da aeronave.

Em geral um sistema de navegação possui 3 módulos principais: o navegador, o módulo de guiagem e o piloto. A navegação se realiza entre esses módulos.

A Figura 3.1 ilustra um esquema funcional de alto nível de um típico sistema de navegação. O desenvolvimento desta metodologia toma como base o sistema representado na figura. Observa-se que o módulo planejador de trajetórias é responsável por prover o navegador com as informações da trajetória, ainda que o planejador receba como entrada um modelo do mundo e os dados da missão a ser cumprida pelo VANT.

Os outros módulos componentes do sistema de navegação são: o módulo supervisor; e o módulo de controle da missão.

O módulo supervisor é o responsável pela verificação e atualização dos parâmetros internos da aeronave. Sua função é verificar se os dados obtidos pelos sensores e os eventos externos da aeronave se ajustam aos requisitos do controle de voo e a atualização e correção desses parâmetros junto ao módulo navegador.

O controle de voo é o responsável pela verificação dos parâmetros internos e externos da aeronave junto ao plano de voo e a atualização desses parâmetros com o módulo de guiagem.

O caminho planejado é obtido no módulo planejador de trajetórias. Esse é um módulo especial do sistema de navegação pode operar *off-line*, repassando somente as informações planejadas para os módulos de navegação do VANT. O planejamento de trajetórias não se restringe somente a definição de um caminho. O problema de encontrar um caminho seguro no espaço tridimensional é muito abrangente e pode envolver diversos aspectos como o planejamento de movimentos da aeronave entre obstáculos móveis, coordenação do movimento de vários VANT's, raciocínio sobre incerteza para construção de estratégias confiáveis de movimentos baseados em sensores, e consideração de modelos físicos.

Atualmente, as pesquisas e desenvolvimentos em veículos aéreos não tripulados enfocam os aspectos de execução autônoma de atividades atribuídas a esses veículos. Para o funcionamento autônomo, o sistema de planejamento de caminho deve perceber a sua própria situação e aquela do ambiente onde ele navega além de tomar decisões de maneira independente

e movimentar-se para cumprir a tarefa que lhe foi atribuída, sem precisar da dependência constante de um operador humano, ou então agindo em cooperação com esse operador.

O planejamento de trajetórias engloba também considerações a respeito das restrições geométricas do ambiente, além de restrições físicas e temporais. Assim, para o desenvolvimento desta metodologia, compreende-se que a navegação de robôs pode ser vista como a execução do planejamento de trajetórias e ações previamente definidas.

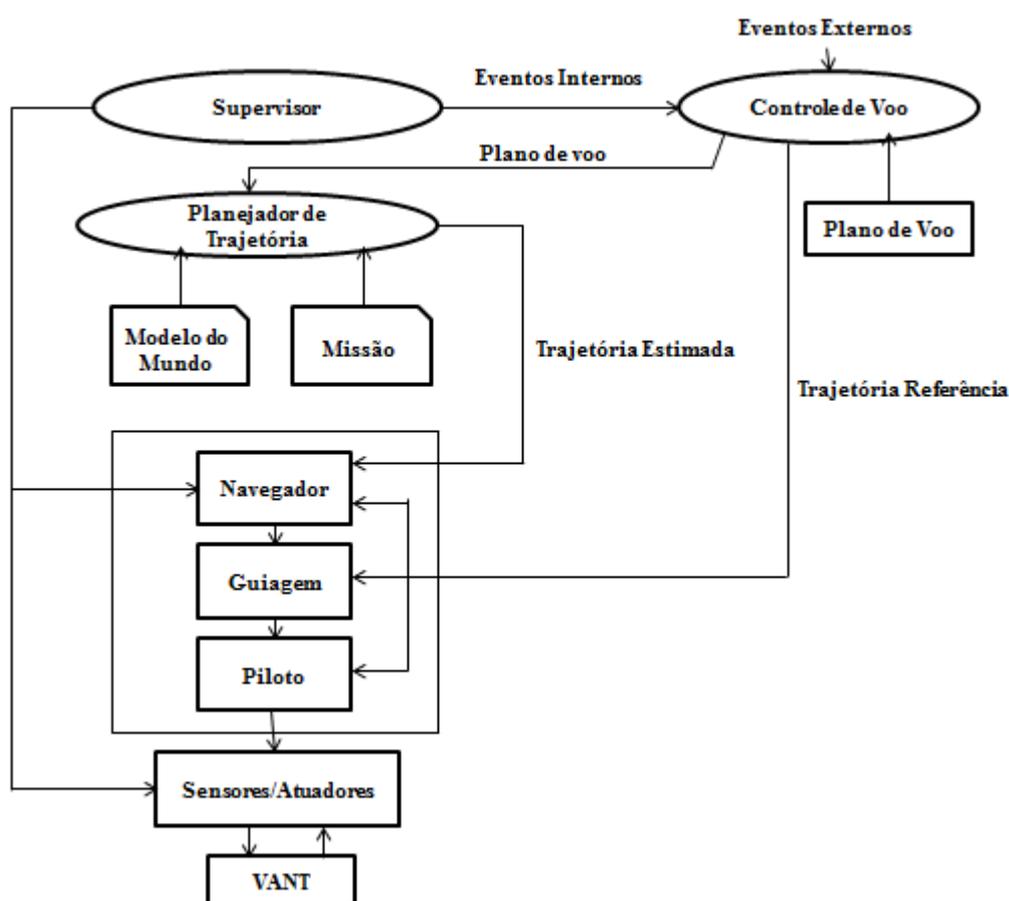


Figura 3.1. Esquema funcional da arquitetura do sistema de navegação de um VANT.

O esquema funcional onde se desenvolve a metodologia para a obtenção do caminho está descrita na sessão seguinte.

Tomando por base a arquitetura simplificada de um modelo de uma navegação para VANT, como mostrado na Figura 3.1, o planejador de trajetória recebe como entrada os dados da missão e um modelo do mundo na forma de um mapa, a partir dos quais o módulo planejador

obtem os pontos tridimensionais do caminho. A curva que descreve o caminho é armazenada e passada ao módulo navegador.

O navegador comunica-se com a guiagem, que orienta o navegador, o módulo guiagem recebe informação do controle de voo. Estas informações podem ser meteorológicas ou qualquer outro evento externo que ameace a navegação, a guiagem determina a direção que o VANT deve seguir.

O módulo piloto executa as ações do veículo por meio dos sensores e atuadores para que o veículo possa se locomover dentro do espaço de navegação.

3.2 O Planejador de Trajetórias e a Obtenção do Caminho

O planejamento de trajetórias para o VANT é tratado como um problema de otimização complexo. Problema dessa natureza pode ser resolvido com uma solução satisfatória ou viável em vez de uma solução ótima. Planejar a trajetória de um VANT consiste em encontrar pontos no espaço tridimensional que definem um caminho seguro e livre de obstáculos, no qual o VANT navega para o cumprimento da missão especificada.

O problema de planejamento de trajetórias pode abranger diversos aspectos como o planejamento de movimentos entre obstáculos móveis, coordenação do movimento de vários veículos, e consideração de modelos físicos. Portanto, planejamento trajetória pode englobar a consideração de restrições geométricas, além de restrições físicas e temporais.

O planejamento de trajetórias e a consequente obtenção do caminho somente podem ser feito com base em um horizonte limitado de informações sobre o ambiente, descritas em um modelo do mundo, sobre a missão e sobre o plano de voo. Os aspectos relevantes sobre essas informações e as considerações para a construção da metodologia estão descritos nas seções seguintes, conforme mostra a Figura 3.2, a qual destaca a contribuição desta pesquisa.

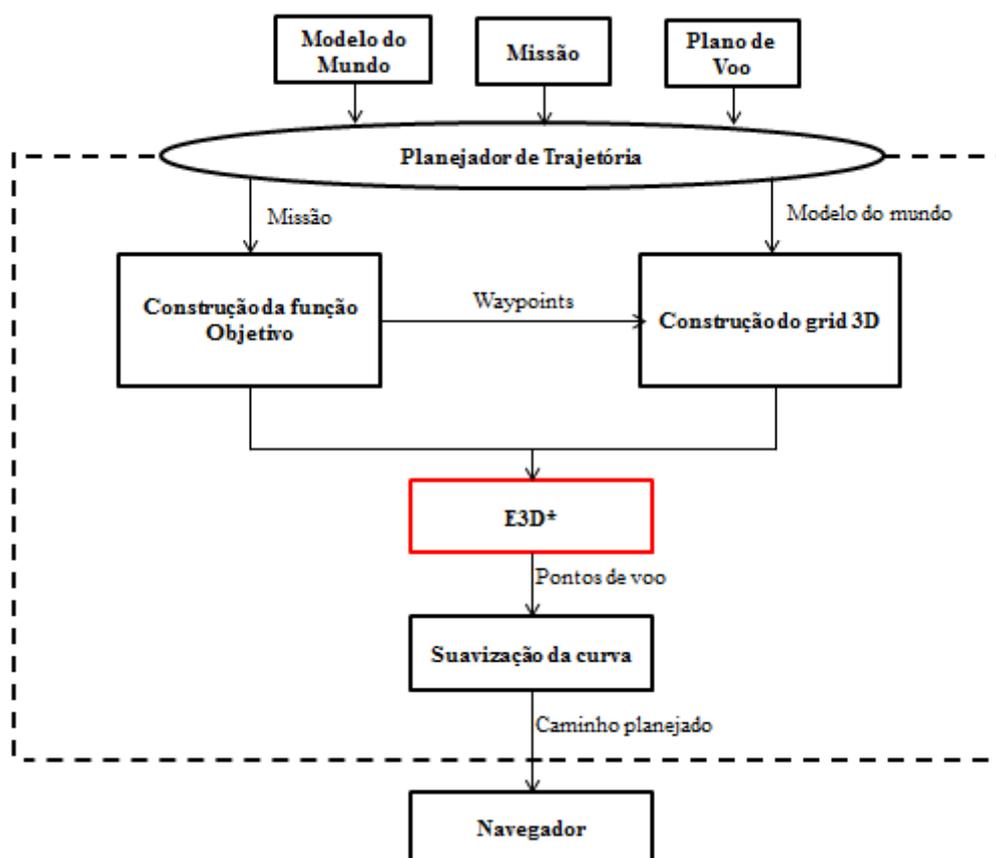


Figura 3.2. Diagrama esquemático da arquitetura de um planejador de trajetória.

3.2.1 Missão

O termo missão descreve a tarefa da aeronave em certa região durante um período restrito de tempo, visando cumprir algum objetivo. As tarefas que os VANT's (ou um grupo coordenado de VANT's) podem cumprir depende do tipo de operação, que pode ser de uso civil ou militar, em diferentes áreas de aplicação.

Duas características são associadas ao objetivo da missão: o custo associado ao cumprimento do objetivo, que engloba, pelo menos, o custo operacional do VANT e o custo de sua perda durante a execução; e o benefício resultante do cumprimento dos objetivos da missão, que é algo subjetivo e dependente de quem demanda a execução da missão.

Uma missão corresponde a todas as atividades necessárias à utilização da aeronave para cumprir o objetivo associado, que são normalmente agrupadas nas fases descritas a seguir e ilustrado na Figura 3.3:

- **Inicialização:** incluem todas as atividades executadas no solo antes do voo propriamente dito, incluindo desembalagem, montagem, inspeção inicial, energização, verificação funcional dos diferentes sistemas, partida e pré-aquecimento do motor.
- **Decolagem e Ascensão:** corresponde às manobras de decolagem e de ascensão à altitude de cruzeiro, necessária para a execução das fases seguintes.
- **Deslocamento:** corresponde à condução da aeronave das proximidades do ponto de lançamento até um ponto determinado pelos objetivos da missão.
- **Execução:** compreende o conjunto de atividades associadas ao cumprimento dos objetivos da missão. Nesta fase são realizadas as manobras para posicionar a carga útil transportada pela aeronave (*payload*) de acordo com os objetivos da missão, e a operação da carga útil propriamente dita.
- **Retorno:** condução da aeronave do ponto onde os objetivos da missão foram cumpridos, ou abandonados, até as proximidades do ponto de recolhimento, geralmente coincidente com o ponto de lançamento.
- **Descida e Pouso:** corresponde ao recolhimento da aeronave, incluindo as manobras de perda de altitude e de pouso.
- **Finalização:** compreende o desligamento do motor, de energização dos diferentes subsistemas inspeção visual da aeronave, desmontagem e acondicionamento para transporte.

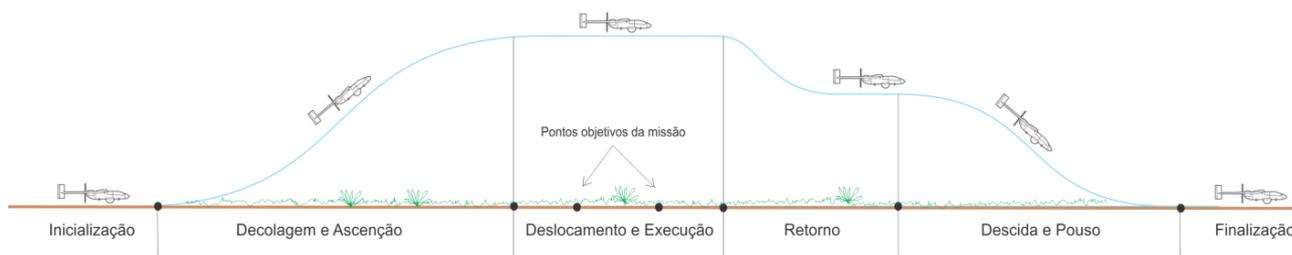


Figura 3.3. Fases da missão de um veículo aéreo não tripulado. Os pontos sobre a reta base representam o início e fim de cada fase e os pontos de passagem (*waypoints*) que definem o objetivo da missão.

O tipo de missão que o VANT irá cumprir implica diretamente no planejamento de sua trajetória e consequentemente no bom desempenho da missão. Estas etapas são importantes para definição do melhor caminho. Desenvolvimento da escolha do melhor caminho nessa metodologia esta baseada em cada etapa da missão.

3.2.2 Modelo do Mundo

O modelo do mundo é a representação interna do ambiente de navegação e atuação do robô. A boa definição de um modelo do mundo é um dos principais fatores que influencia o sucesso da missão. Essas representações devem ser capazes de armazenar informações suficientes para que o robô se localize, navegue e atue no ambiente, mas não pode comprometer a desempenho do sistema de controle.

A construção de um modelo de mundo para um VANT deve garantir que o veículo possa:

- 1) reconhecer o ambiente de navegação, o que envolve o conhecimento prévio de toda aérea a ser sobrevoada;
- 2) identificado os obstáculos, mapeando todo o ambiente como área ocupada e área livre (cada célula da matriz ou grid);
- 3) garantir o traçado de uma rota segura livre de obstáculos, favorecendo o cumprimento da missão.

O modelo do mundo utilizado neste trabalho é definido por uma grade ocupacional regular multivolume, Figura 3.4.

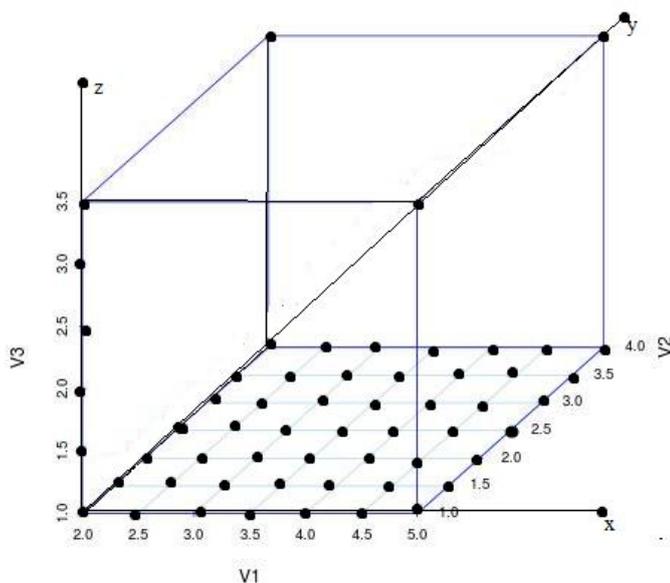


Figura 3.4. Grade ocupacional que representação do modelo do mundo em 3D.

Essa estrutura consiste em uma grade tridimensional formada por um conjunto de pontos ortogonalmente espaçados por distâncias $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$. A Figura 3.5 mostra elemento de volume da grade caracteristicamente definidos pelos seus vértices. A cada ponto da grade regular está associado um “peso”, um valor que caracteriza as condições do espaço de navegação e a presença de obstáculos. Esses pesos serão definidos nas seções à frente.

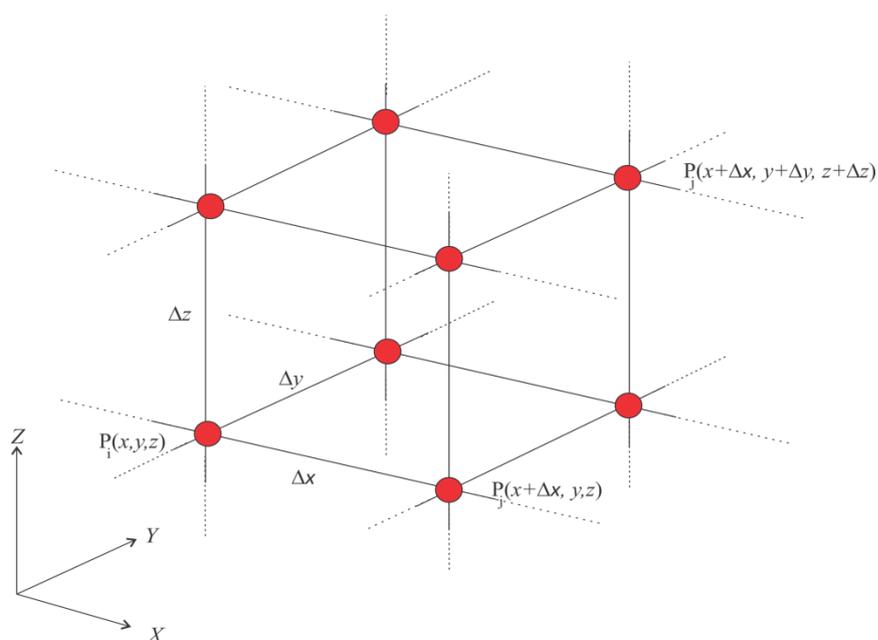


Figura 3.5. Elementos de volume que formam uma grade tridimensional multivolume.

Um bom modelo do mundo usa também as informações do plano de voo, para a boa definição das rotas com pontos de passagem (*waypoints*) conhecidos e delimitados. Utilizando o mapa, o VANT verifica os possíveis caminhos que levam até a posição desejada e os obstáculos que devem ser evitados.

Uma vez definida a missão a ser realizada pelo VANT e o modelo do mundo, é possível estabelecer um plano de ações, que pode ser composto da execução de sub-tarefas mais elementares, como por exemplo: explorar o ambiente, se deslocar em uma direção-alvo desviando de obstáculos, seguir um comboio, patrulhar uma área, entre outras essas tarefas são executadas seguindo um plano de trajetória na qual diz as rotas viáveis para que a mesma seja cumprida. É conveniente que estas tarefas estejam estabelecidas em um plano de voo.

3.2.3 Plano de Voo

O plano de voo define a sequência de manobras a serem executadas pela aeronave durante a missão. Um plano de voo é constituído por diversas etapas, especificadas normalmente de duas maneiras distintas:

- Pelas coordenadas de dois pontos de passagem (*waypoints*) e pela velocidade com a qual a aeronave deve se deslocar entre estes pontos. Etapas especificadas desta forma são consideradas completas tão logo o segundo ponto de passagem seja atingido.
- Por um ponto de passagem inicial, uma velocidade de deslocamento, um rumo e uma duração. Etapas especificadas desta maneira são consideradas completas quando o tempo especificado na duração da mesma se expira.

Cada aeronave possui um conjunto de características que precisam ser consideradas no planejamento da missão, tipicamente:

- As velocidades que pode ser operada;
- O consumo de combustível para cada velocidade;

- A capacidade de combustível armazenado a bordo; e
- O consumo e a capacidade das fontes de energia elétrica para os equipamentos embarcados.

A execução de uma missão implica a utilização de recursos limitados, normalmente o combustível e a energia elétrica e nas condições externas da aeronave que compreendem tipicamente: temporização da missão, condições meteorológicas, relevo e zonas de exclusão.

Há dois aspectos a serem considerados: as condições meteorológicas e as elevações do terreno. É preciso inicialmente garantir que a aeronave possa voar nas condições meteorológicas presentes no local e horário da missão. Em caso de que a missão possa ser executada, a influência de fatores climáticos como o vento e a chuva devem ser considerados no planejamento. No caso do vento, por exemplo, considera-se a sua intensidade, se é constante ou em rajadas etc.

As elevações do terreno sobrevoado também devem ser levadas em consideração durante planejamento. O relevo inclui na determinação da altura de voo, pois deve garantir uma distância mínima do solo para todas as elevações sobrevoadas ao mesmo tempo em que seja suficiente para o cumprimento dos objetivos da missão. O relevo também inclui no enlace de comunicação entre a estação de base e a aeronave. Deve ser garantido um limite mínimo do nível de sinal de comunicação entre o VANT e a estação de base.

Zonas de exclusão são regiões onde a operação da aeronave não é permitida, podendo o ser de forma permanente ou temporária [Seibel e Farine (2002)]. Exemplos de zonas de exclusão permanentes são os aeroportos, as aerovias e as zonas de alta periculosidade, como o espaço aéreo sobre os reatores nucleares e as refinarias de petróleo. Exemplos de zonas de exclusão temporárias são as áreas reservadas para exercícios militares ou as áreas sob controle de órgãos de controle de tráfego aéreo.

3.2.4 Ponderação dos Pontos no Espaço

Cada ponto p_i da grade ocupacional é atribuído com um peso w_i definido em uma escala de 1 até n que expressa as características daquela região do espaço do plano de voo. Assim regiões do espaço pertencentes ao espaço livre possuem pesos muito baixo, próximos de um, regiões pertencentes a obstáculos possuem valores altos, próximos de n .

Considere assim uma escala W com pesos w_i definidas por:

$$W[1,2, \dots, m, m+1, m+2, \dots, p, p+1, p+2 \dots, p_n],$$

Onde, para $1 \leq w_i < m$ são considerados valores baixos, usuais para representar o espaço livre de obstáculos e com boas condições de voo. Para $m \leq w_i < p$, considerem-se valores médios, representativos de graduações e condições meteorológicas (assim ventos e chuvas podem ser ponderados entre fracos e fortes). Os obstáculos assumem o último valor da escala $w_i = p_n$ e as zonas de exclusão podem ser representado por pesos $p \leq w_i < p_n$. A Figura 3.5 mostrada a seguir, ilustra uma escala de pesos que pode ser quantificada convenientemente para representar as condições de voo no ambiente de navegação.

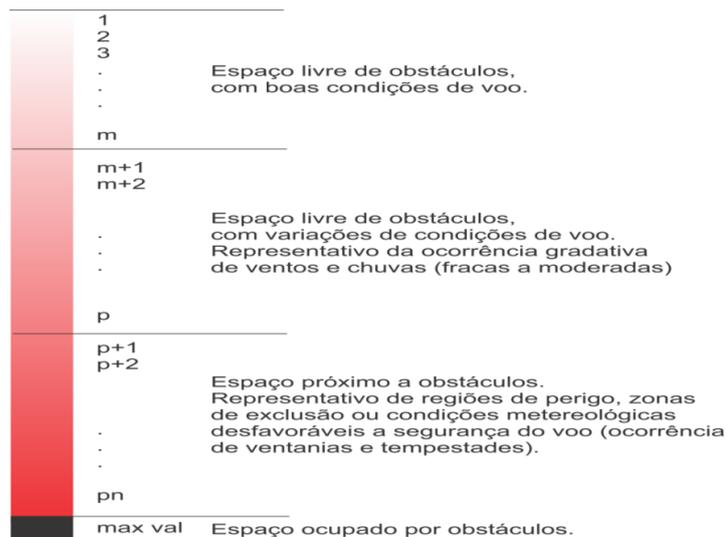


Figura 3.6. Escala de pesos com valores que representam as condições meteorológicas, os obstáculos e os espaços livres, permitindo ou impedindo a navegação do veículo.

Essa representação facilita a moldegem de fatores externos que atuam sobre a aeronave. Pesos baixos representam regiões favoráveis ao voo, sem restrição. Pontos da grade de ocupação associados a pesos médios podem representar as restrições meterológicas como vento e chuva fraca a moderada. Da mesma maneira, as elevações do terreno, chuvas e ventos fortes e zonas de exclusão podem assumir mais valores altos na escala W . Os obstáculos tridimensionais, que inviabilizam a navegação do VANT, são representados pelo MAXVAL.

3.2.5 Função Objetivo

O caminho de menor custo é obtido por meio de uma função objetivo que em consideração as características do ambiente e a distância percorrida pela aeronave em cada etapa da missão.

Cada ponto p_i da grade de ocupação está associado um valor w_i que representa as condições do mundo. Cada etapa da missão define um ponto objetivo no deslocamento do VANT. Assim, o custo associado ao ambiente é ponderado com a distância entre o ponto corrente e o ponto objetivo da etapa da missão.

$$c_{(i,j)} = w_{i,j} * d_{(p_i,p_j)} p_j \in p_{voo} \quad (3.1)$$

Onde,

$w_{i,j}$ = pesos da grade;

p_i = ponto da vizinhança;

p_j = ponto objetivo da missão;

p_c = ponto corrente.

Onde p_j são as coordenadas dos pontos do plano de voo p_{voo}

O custo do deslocamento está associado aos m vizinhos. Assumindo uma vizinhança de $m=18$ pontos $p_i (i = 1, 2, \dots, 18)$, a um ponto corrente p_c , a Tabela 3.1 descreve a vizinhança e o espaço de movimento do VANT.

Tabela 3.1. Tabela demonstrativa dos movimentos realizados pela aeronave.

Movimento	Descrição do movimento
$P_1(x_c + \Delta_x, y_c, z_c)$	Deslocamento orientado para direita segundo positiva do eixo x.
$P_2(x_c - \Delta_x, y_c, z_c)$	Deslocamento orientado para esquerda segundo negativa do eixo x.
$P_3(x_c, y_c + \Delta_y, z_c)$	Deslocamento orientado para cima segundo positiva do eixo y.
$P_4(x_c, y_c - \Delta_y, z_c)$	Deslocamento orientado para baixo segundo negativa do eixo y.
$P_5(x_c, y_c, z_c + \Delta_z)$	Deslocamento orientado para frente segundo positiva do eixo z.
$P_6(x_c, y_c, z_c - \Delta_z)$	Deslocamento orientado para trás segundo negativa eixo z.
$P_7(x_c + \Delta_x, y_c + \Delta_y, z_c)$	Deslocamento em diagonal orientado segundo positiva dos eixos x e y.
$P_8(x_c + \Delta_x, y_c - \Delta_y, z_c)$	Deslocamento em diagonal orientado segundo positiva do eixo x e negativa do eixo y.
$P_9(x_c - \Delta_x, y_c + \Delta_y, z_c)$	Deslocamento em diagonal orientado segundo negativa do eixo x e positiva do eixo y.
$P_{10}(x_c - \Delta_x, y_c - \Delta_y, z_c)$	Deslocamento em diagonal orientado segundo negativa dos eixos x e y.
$P_{11}(x_c + \Delta_x, y_c + \Delta_y, z_c + \Delta_z)$	Deslocamento em diagonal orientado segundo positiva dos eixos x,y e z.
$P_{12}(x_c + \Delta_x, y_c + \Delta_y, z_c - \Delta_z)$	Deslocamento em diagonal orientado segundo positiva nos eixos x e y e negativa no eixo z.
$P_{13}(x_c + \Delta_x, y_c - \Delta_y, z_c + \Delta_z)$	Deslocamento em diagonal orientado segundo positiva nos eixos x e z e negativa no eixo y.
$P_{14}(x_c + \Delta_x, y_c - \Delta_y, z_c - \Delta_z)$	Deslocamento em diagonal orientado segundo negativa nos eixos y e z, e positiva nos eixos x.
$P_{15}(x_c - \Delta_x, y_c + \Delta_y, z_c + \Delta_z)$	Deslocamento em diagonal orientado segundo negativa no eixo x, e positiva nos eixos y e z.
$P_{16}(x_c - \Delta_x, y_c + \Delta_y, z_c - \Delta_z)$	Deslocamento em diagonal orientado segundo negativa nos eixos x e z, e positiva nos eixos y.
$P_{17}(x_c - \Delta_x, y_c - \Delta_y, z_c + \Delta_z)$	Deslocamento em diagonal orientado segundo negativa nos eixos x e y, e positiva nos eixos z.
$P_{18}(x_c - \Delta_x, y_c - \Delta_y, z_c - \Delta_z)$	Deslocamento em diagonal orientado segundo negativa nos eixos x e z, e positiva nos eixos y.

Função objetivo e obtida pela minimização do custo de movimento do VANT.

$$f_{obj} = \min \left\{ \sum_{i=1}^n w_{i,j} * d(p_i, p_j) \right\}, j = 1, 2, \dots, m, \quad (3.2)$$

ou ainda,

$$f_{obj} = \min \left\{ \sum_{a=1}^n c_{i,j} \right\} j = 1, 2, \dots, m. \quad (3.3)$$

O ponto p_i escolhido será aquele que apresente o menor valor de c_i . O caminho será composto por todos os pontos de menor custo, isso garante que a função objetivo seja obtida por:

$$f_{obj} = \min \left\{ \sum_{i=1}^n c_j \right\}. \quad (3.4)$$

A Figura 3.6 ilustra a estimativa de custo para cada deslocamento do ponto p_c para um ponto p_i levando em conta o peso e a distância entre o ponto p_i e o ponto $p_j \in p_{voo}$. O custo é obtido por meio de $c_i = w_i * d(p_i, p_0) \quad i = 1, 2, \dots, n$.

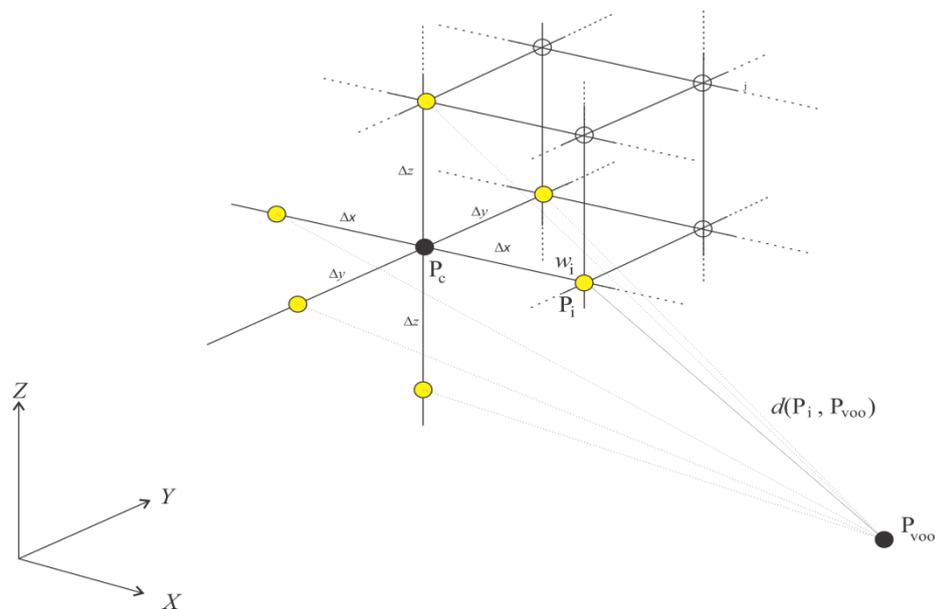


Figura 3.7. O cálculo da função objetivo leva em conta a menor distância entre os seis vizinhos $p_i, i=1, 2, \dots, n$ do ponto corrente p_0 ao ponto objetivo p_t , ponderada por um peso w_i .

3.3 Planejador de Trajetória

A definição de uma trajetória é quando o planejamento do movimento do robô envolve algum tipo de restrição temporal. No entanto, isso não acontece no caminho, o que permite que o veículo se movimente pelo ambiente, livre do parâmetro de tempo. O problema tratado aqui é o planejamento de caminhos para robôs aéreos.

3.3.1 O Algoritmo E3D*

O algoritmo E3D* (Euclidiano 3D-estrela) proposto para o desenvolvimento de caminhos para o VANT é baseado no algoritmo A*(lê-se A-estrela). O algoritmo busca o caminho em uma grade regular tridimensional de um ponto inicial a outro ponto objetivo. A grade regular representa o mapa de navegação que é o modelo do mundo. O veículo se locomove para cumprir a missão determinada, dentro da representação do mundo, respeitando os pontos objetivos definidos pelo plano de voo.

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.

Os obstáculos também são delimitados no espaço tridimensional, o veículo precisa chegar ao destino objetivo com segurança, logo é preciso identificar e desviar dos obstáculos encontrados nas grades dentro do modelo do mundo, o VANT navega sempre em grades livres, buscando a melhor rota para continuar navegando.

Os movimentos a serem executados dependem das condições de voo imposta no modelo do mundo. O algoritmo mostrado a seguir atua do seguinte modo:

1. São guardadas as coordenadas da grade no qual é definido valor do ponto inicial P_0 ;
2. As grades adjacentes (vizinhança) até o ponto inicial formam uma lista aberta, verificando-se os pesos da vizinhança desta lista. O peso com menor valor são as grades livres, permitindo a passagem do veículo. Logo a grade definida possui o menor de F . Todas as novas grades torna-se um novo P_0 (ponto de partida);
3. A grade atual sai da lista aberta e passa para uma lista fechada, para que não ser verificada novamente.

4. O algoritmo recebe como entrada: plano-de-voo, modelo do mundo e as coordenadas do ponto inicial e o ponto objetivo;
5. A saída do algoritmo são as coordenadas de pontos que formam um caminho dentro da grade ocupacional regular;
6. Modelo do mundo (j) recebe um plano-de-voo (i);
7. As coordenadas do ponto-corrente (j) recebe o ponto inicial (p_0);
8. As coordenadas do ponto objetivo recebe o caminho;
9. Para cada ponto do plano-de-voo (i), o plano-de-voo irá movimenta-se na grade ocupacional respeitando as condições imposta no plano e esses movimentos serão realizados até completar os movimentos (n), i será incrementado;
10. Enquanto as coordenadas do ponto-corrente (j) forem diferentes das coordenadas do plano-de-voo (i), ele vai buscando na sua vizinha um caminho que minimize a relação de custo definida e assim vai ele se movendo para cada ponto de menor custo ao final irá obter uma lista de coordenadas que define o caminho.

Estes passos estão sumarizados no pseudocódigo mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Pseudocódigo do algoritmo E3D*.

Linha	Algoritmo: E3D*	Custo
1	Entrada: P_{voo} //Lista de pontos do plano de voo	
2	Mundo //modelo do mundo gride 3D	
3	P_0 //Ponto inicial	
4	Saída: Caminho //Lista de pontos (coordenadas)	
5	Início	
6	$j = 1;$	
7	$P_c(j) = P_0;$	
8	Caminho(j) = P_0 ;	
9	Para ($(P_{voo}(i), i = 1, 2, \dots, n)$) faça {	O(n)
10	Enquanto ($P_c(j) \neq P_{voo}(i)$) {	O (18)
11	//Encontre o custo na vizinhança de k	
12	//Pontos de $P_c(j)$	

```

13              $C(k) = w_k d(P_c(k), P_{voo}(i));$ 
14 //Encontre o  $(P_c(k)$  com menor custo
15             Ponto_menor_custo =  $(P_c(k) \min (P_c) C(k));$ 
16 //Move o ponto corrente para o ponto de menor custo
17 Caminho(j) =  $P_c(j);$ 
18  $P_c =$  Ponto_menor_custo;
19 j=j+1;
20 }
21 }
22 Retorne caminho

```

3.3.2 Custo Computacional

Os algoritmos de busca têm duas características importantes: são técnicas de Inteligência Artificial aplicada a problemas de alta complexidade teórica que não são resolvidos com técnicas de programação convencionais; a outra característica diz respeito à "complexidade" de um problema está diretamente relacionada ao tamanho do seu "Espaço de Busca" correspondente.

Observando o algoritmo apresentado acima, podemos deduzir sua complexidade através da execução de cada linha, sendo que as três primeiras linhas (1 a 3) são de inicialização do algoritmo, onde: P_{voo} , é uma lista de pontos do plano de voo; o modelo do mundo é uma grade ocupacional 3D, representação do mundo onde o veículo navega; P_0 é o ponto de inicial. As linhas de atribuição (linhas 6 a 8) são da ordem $O(1)$.

O primeiro laço da linha 9 passa por todos os pontos dentro do plano-de-voo e é da ordem $O(n)$. O laço seguinte procura o ponto de menor custo entre os vizinhos de P_{voo} , onde é verificado cada ponto da vizinhança dentro da grade com um número constante de operações. Dessa forma, tendo conhecimento do número de pontos vizinhos a serem verificados, o laço da linha 10 é executado em $O(18)$. Representado na fórmula a seguir:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{18} 1$$

$$\sum_{i=1}^n k$$

$$nk \therefore O(n)$$

Logo, a complexidade do algoritmo E3D* na Tabela acima é da ordem de $O(nk)$, onde k representa o número de vizinhos, ou seja, $O(n)$. O máximo de vizinhança que será verificado são 18, logo é um valor fixo que será percorrido sempre até achar o custo mínimo, uma vez não satisfeito à condição do laço irá executar até a condição ser verdadeira, logo encontra a solução que é o caminho.

Capítulo 4

Aplicações Experimentais

Este capítulo descreve o aparato experimental utilizado neste trabalho. Utilizando a metodologia para a geração de caminhos tridimensionais proposta anteriormente, foi executado o planejamento de navegação para Veículos Aéreos Não Tripulados em ambiente de simulação.

O algoritmo de busca foi implementada usando a linguagem C e plotado na ferramenta gráfica MatLab sobre uma plataforma *Windows 7*, em um *notebook* com processador *Intel Core i5370M@2,40 GHz*.

Para fins de utilização e ajuste no modelo do planejamento, foram analisados testes onde se verificou as possíveis dificuldades do algoritmo e a os caminhos gerados os testes ficaram assim divididos:

4.1 Protocolo de Experimentação

A experimentação foi realizada por meio de simulações. Objetivando verificar a robustez e eficiência do método. Para isso definiu-se os seguintes cenários:

Cenário 1: Modelo do mundo representado por uma grade regular de tamanho (10x5x10) para análise do caminho obtido no espaço tridimensional, neste cenário os obstáculos foram distribuídos de maneira ordenada, ou seja, os obstáculos são pré-definidos nos espaço.

Cenário 2: Modelo do mundo representado por uma grade regular de tamanho (30x20x30) para avaliação do traçado de restrições no ambiente. Neste cenário os obstáculos são representados de várias maneiras, os obstáculos foram colocados de maneira desordenada no espaço.

Cenário 3: Modelo do mundo representado por uma grade regular de tamanho (100x35x100) com os obstáculos distribuídos proporcionalmente na grade regular. Para estes cenários definimos os seguintes experimentos:

Experimento 1: Efetivação do caminho gerado. O algoritmo E3D* foi simulado avaliando se dado um modelo do mundo com os suas respectivas restrições de movimento, o algoritmo é capaz de encontrar uma rota viável dentro da grade tridimensional.

O algoritmo E3D* gerou um percurso conforme mostrado na Figura 4.1 a seguir, o percurso gerado apresenta uma quebra da continuidade do caminho, isto ocorre devido à mudança de movimento no trajeto quando o veículo se depara com alguma restrição que impede seu deslocamento, ou seja, precisa muda de rota devido a fatores externo ou climáticos que impedem de seguir sua rota.

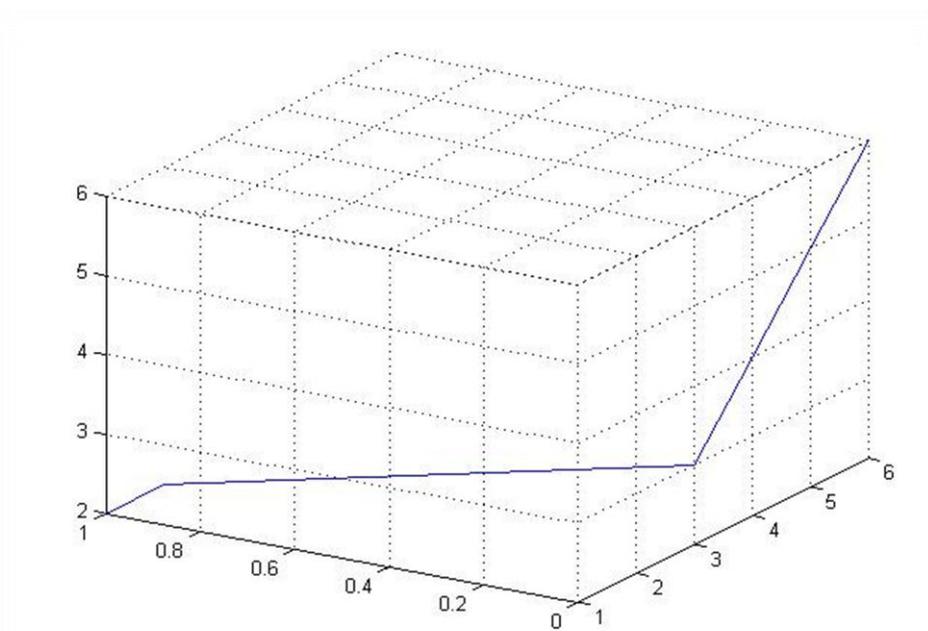


Figura 4.1. A linha em destaque é o caminho gerado a partir de um conjunto de coordenadas obtido no algoritmo E3D*. O caminho é obtido em áreas livres de obstáculos.

Cada etapa da rota é definida por um conjunto de coordenadas que formam um caminho, considerado o melhor caminho dentro do espaço de navegação, nota-se que os trechos não são retilíneos necessitando assim, procurando áreas livres para gerar o caminho.

Mais resultados gerados pelo algoritmo E3D* são mostrados na Figura 4.2 que mostra o caminho gerado no espaço tridimensional.

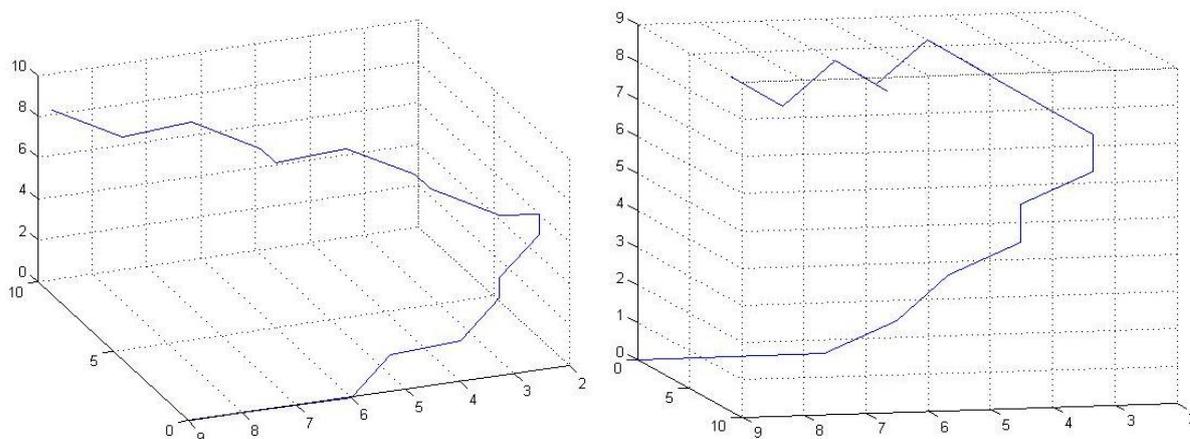


Figura 4.2. Efetivação do caminho traçado, quanto mais obstáculos no caminho, mas o desvio ocorrerá no decorrer do percurso gerando assim um caminho com bastante mudança de sentido para encontrar o caminho final.

Experimento 2: Simulação de voo em condições controladas. Para este experimento foi definido um ambiente de navegação com muitos obstáculos, ou seja, poucas áreas livres para navegação do veículo. O algoritmo E3D* precisa realizar muitas comparações até encontrar os espaços livres, encontrando os conjuntos de coordenadas dentro do ambiente que corresponde ao melhor caminho encontrado no mapa. Na Figura 4.3, é mostrado o resultado deste experimento.

Após esses testes podemos afirmar que, a partir de um ambiente com muitos obstáculos, o algoritmo obteve um caminho seguro, procurando áreas livres e traçando um percurso cheio de variações, ou melhor, mudança de rota, isto ocorre devido os obstáculos inseridos no decorrer no caminho, forçando o veículo a traçar novas rotas.

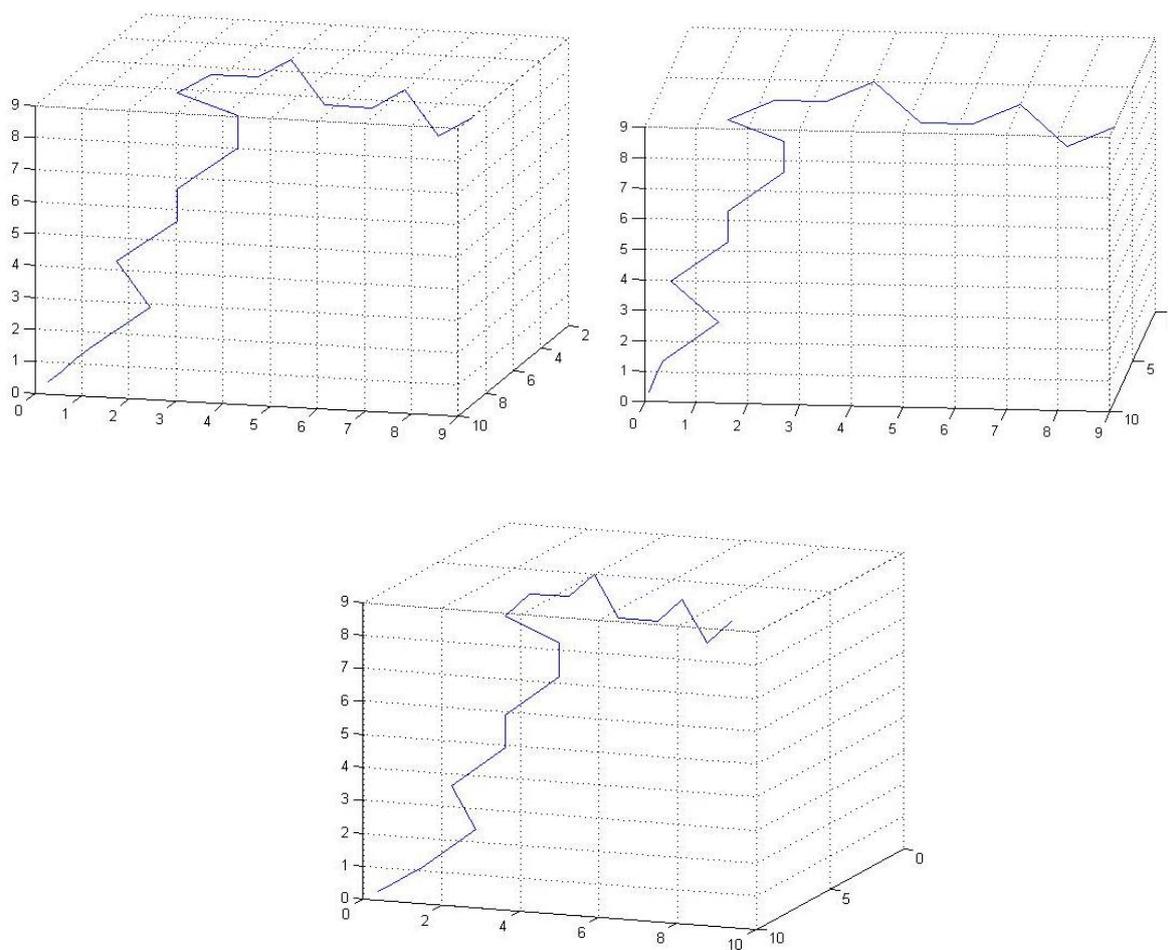


Figura 4.3. Testes com em ambiente com poucas áreas livres, onde os pontos foram previamente inseridos, a fim de gerar uma rota com muitas mudanças de curso.

Experimento 3: Simulação de voo com condições aleatórias.

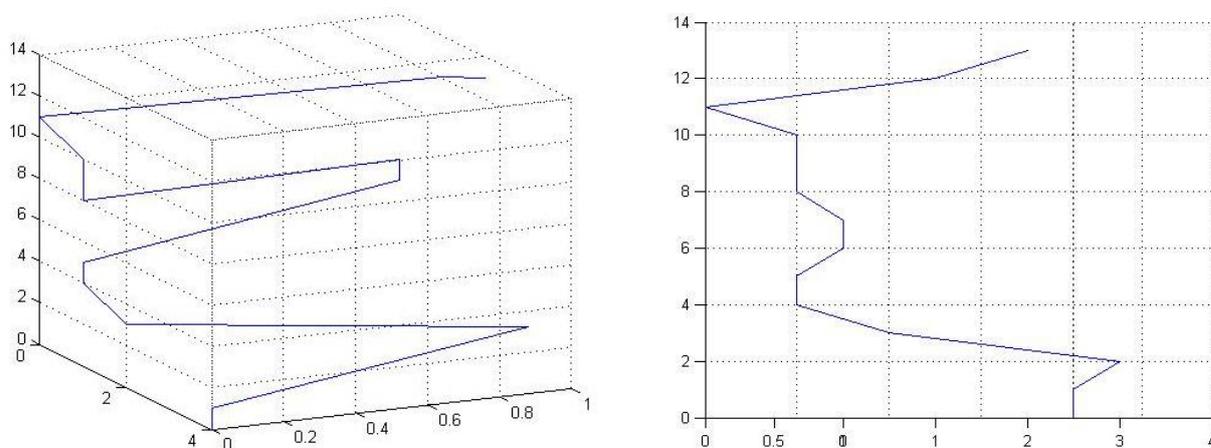


Figura 4.4. Mostra uma rota em um ambiente com muitos obstáculos distribuídos aleatoriamente, dificultando a geração da rota.

Experimento 4: Teste em ambientes com poucos obstáculos.

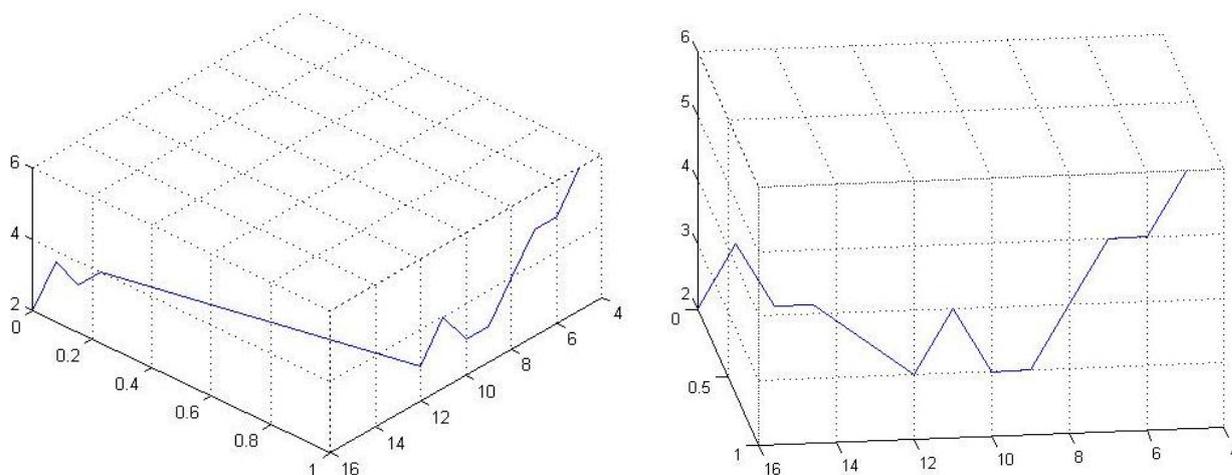


Figura 4.5. Mostra o resultado de uma trajetória em um ambiente de navegação com mais espaços livres. O caminho gerado diminuiu o número de desvio do percurso.

Experimento 5 – Testes em ambientes com poucos obstáculos.

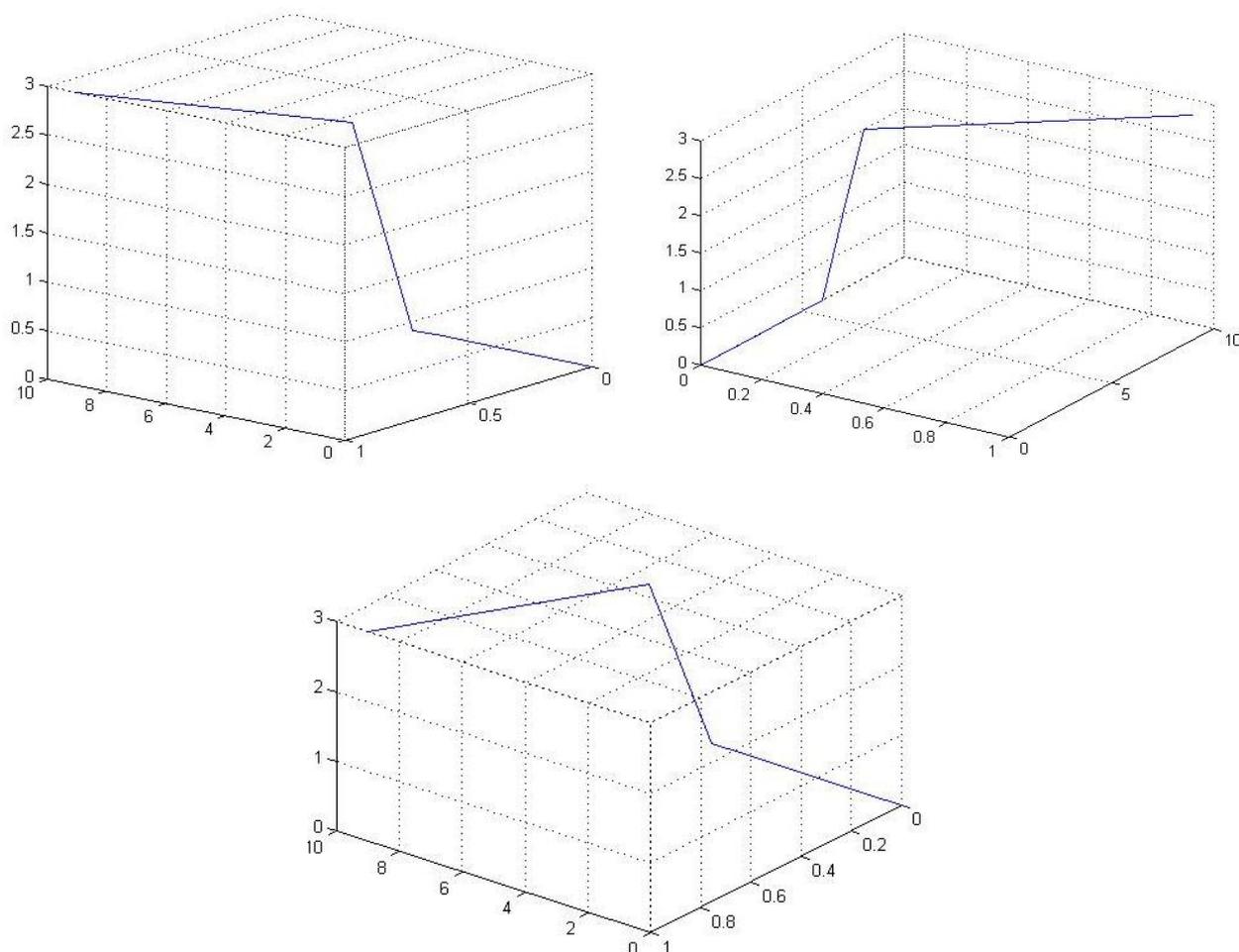


Figura 4.6. Resultado da simulação de um voo em um ambiente com poucos obstáculos. O caminho gerado quase não apresenta variações no percurso.

4.2 Considerações sobre os experimentos

Neste trabalho apresentou-se um estudo sobre o planejamento de caminhos tridimensionais para veículos aéreos. Foi apresentado um método de planejamento de caminho (algoritmo 3D), o algoritmo desenvolvido para gerar caminho em ambiente de navegação 3D é o E3D*.

A partir dos testes com o algoritmo E3D* percebeu-se que ele precisa ser orientado pelo plano de voo, sem esta devida orientação o algoritmo gera um caminho seguro. Todavia para que o mesmo obtenha uma rota adequada para um voo de VANT, foi necessário definir um plano de voo, no qual é estabelecidos pontos de controle que o veículo deve seguir, a fim de cumprir os requisitos da missão definido na metodologia.

Portanto, dado um conjunto de pontos, então é definida uma rota a partir desses pontos de controle (*waypoints*) gerando rota possível para que o veículo navegue com segurança. Uma desvantagem dessa metodologia é que não foi tratada aqui a função tempo, na qual define em quanto tempo o algoritmo encontra uma rota viável dentro de um mapa de navegação, o trabalho limitou-se a encontrar um caminho dentro de um espaço tridimensional com representação de obstáculos físico (árvores) e climáticos (chuva, vento).

O modelo do mundo definido neste trabalho para validação dos experimentos trata-se de uma grade ocupacional, com um conjunto de pesos previamente definidos. Para análise de teste foi definido vários pontos objetivos no decorrer da grade, o algoritmo E3D* mostrou como resposta uma única solução, ou seja, o caminho com menor distância.

O algoritmo E3D*, por sua vez, apresenta uma resposta rápida de acordo com o tamanho do espaço definido, uma vez que é baseado no cálculo dos vizinhos locais. Cabe ainda lembrar que a técnica proposta neste trabalho para o cálculo do caminho tridimensional é uma mera aproximação para o caminho 3D ótimo.

Capítulo 5

Conclusão e Trabalhos Futuros

Esta dissertação abordou o problema de planejamento de caminhos para veículos aéreos não tripulados. Problemas dessa natureza são complexos e requerem soluções eficientes para tratamento e processamento de informações que viabilizem a navegação segura de robôs aéreos em ambiente tridimensional.

A abordagem foi construída por meio de uma metodologia que enfoca o problema sob o ponto de vista da otimização discreta. Desenvolveu-se o Algoritmo E3D* (Euclidiano 3D estrela – uma alusão ao algoritmo A*, usado para planejamento em ambientes bidimensionais). O E3D* é um algoritmo guloso, que escolhe a cada momento os melhores pontos que formam um caminho em uma grade regular tridimensional. Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, foram elaboradas as contribuições listadas a seguir:

- 1) Um algoritmo de planejamento de caminhos em espaço tridimensional com restrições externas a aeronave. Diferente das soluções propostas na literatura, o algoritmo E3D* trata obstáculos fixos, condições climáticas (vento, chuva, entre outros) e zonas de exclusão (aeroportos, por exemplo) que podem interferir na navegação do veículo.
- 2) Modelagem do espaço de navegação por meio de uma grade tridimensional. Os obstáculos, as zonas de exclusão e as condições ambientais e climáticas que podem afetar o voo da aeronave são modelados nos pontos da grade tridimensional por meio de valores distribuídos em uma escala. Essas condições climáticas foram colocadas numa escala de valores, onde os valores maiores eram definidos como pontos que não podem ser ultrapassados e os valores menores são áreas livre acesso.

- 3) Inclusão das restrições impostas à missão e do plano de voo no modelo de planejamento do caminho.
- 4) Um modelo de otimização baseado em uma função objetivo simples e de fácil extensão. A função objetivo busca minimizar a associação entre um peso, inerente a restrição imposta ao nó da grade tridimensional, e a distância entre a posição corrente e a posição do próximo ponto objetivo. Penalizações, bônus e outros fatores podem ser facilmente modelados e introduzidos na composição do custo da função objetivo.

Assim, analisando as contribuições apresentadas, observa-se que foram alcançados os seguintes objetivos específicos:

- 1) O desenvolvimento de um sistema de planejamento capaz de gerar rotas que viabilizem o cumprimento da missão e facilmente integrável ao sistema de navegação de um VANT;
- 2) A integração por meio do modelo de mundo com uma função de custo do planejamento do voo com as restrições da missão;
- 3) Um sistema capaz de planejar um caminho frente às condições externas do VANT;
- 4) A avaliação do planejador sob diferentes condições de controle simulado.

Os resultados foram obtidos por meio de simulações em diferentes cenários que procuram representar realidade da missão de um VANT em ambientes grandes e esparsos, com restrições impostas ao espaço de navegação providas eventualmente pelo clima e por obstáculos. As simulações mostraram a robustez e a validade do modelo por meio da distribuição de valores aleatórios (ruídos) no modelo do mundo e pela comparação com resultados de caminhos supostamente ideais.

5.1 Limitações

A metodologia aqui desenvolvida não garante um caminho necessariamente ótimo. Mas, consultando a literatura científica atual, verifica-se que soluções ótimas não são determinadas trivialmente, requerendo para tal grande custo computacional e o controle criterioso das restrições impostas ao modelo.

A representação do mundo está limitada a uma grade tridimensional igualmente espaçada. Regiões povoadas por obstáculos podem ter maior densidade de pontos tridimensionais, garantindo assim uma melhor representação do espaço de atuação da aeronave e mais segurança ao voo. Sugere-se que o uso de estruturas de dados como *octrees* possam ser empregadas com essa finalidade.

As elevações do terreno não são representadas por nenhum modelo digital. A inclusão de um modelo de digital do terreno favoreceria a representação mais adequada em relação à altura do voo e a representação de obstáculos naturais, como montanhas, vales e calhas de rios.

Restrições internas a aeronave não estão modeladas na função custo. Consumo de combustível ou energia, tempo de voo, velocidades em diferentes fases da missão não estão incluídas no modelo.

5.2 Extensões

O planejador de caminhos pode fornecer a avaliação de outras variáveis importantes para o sistema de controle do VANT, por exemplo:

- Caracterização das restrições cinemáticas, como a máxima curvatura, máxima torção, máximo ângulo de subida, uma vez que a curvatura e torção são características que dependem das derivadas do vetor posição das aeronaves no espaço. A inclinação também pode ser avaliada, uma vez que esta depende da relação entre a variação máxima possível de altitude e do comprimento da curva.

- A inclusão de obstáculos dinâmicos, que podem ser facilmente representados no espaço de navegação.
- O replanejamento da trajetória frente a uma situação de ameaça da missão.
- Testar outra técnica de suavização de curva, que apresente um polinômio de maior grau que o utilizado no trabalho;
- Ampliar as possibilidades de movimentação do VANT no espaço tridimensional.
- Gerar trajetórias levando em consideração a função temporal como variável a ser tratada pelo algoritmo de planejamento.

5.3 Trabalhos Futuros

Esse trabalho abre um grande número de possibilidades para o desenvolvimento de projetos futuros. Mas, como trabalho imediato sugere-se a implantação do planejador em um sistema de navegação real e a avaliação do caminho planejado com a trajetória executada.

O planejamento de trajetórias em ambientes com indoor constitui-se um problema desafiador. Pequenos VANT's como helicópteros e quadrotores que executam suas missões em ambientes indoor, como o interior dos prédios ou cavernas. Esses robôs necessitam de planejadores eficientes que possam lhes garantir uma navegação segura em seu espaço de trabalho.

Incorporar a obstáculos dinâmicos no modelo do mundo é um problema interessante. Uma extensão desse problema é planejamento de trajetórias para grupos de VANT's, onde cada VANT passa a ser também um obstáculo para as outras aeronaves.

A ocorrência de eventos inesperados, como a mudança do tempo, nuvens ou até mesmo a identificação inesperada de zonas de exclusão ou perigo de voo, sugerem esquemas de

replanejamento indoor. Nesses casos, novos caminhos têm que serem gerados sem comprometer a missão e sem colocar em risco o VANT.

5.4 Considerações Finais

Esta dissertação teve como objetivo científico o estudo do planejamento de trajetórias para Veículos Aéreos não Tripulados por meio da integração de restrições impostas pelo ambiente e pela missão a ser executada pelo VANT. O planejamento de trajetórias é um módulo importante no sistema de navegação de qualquer VANT. Encontrar um caminho seguro no espaço tridimensional é parte do planejamento de trajetórias e envolve a representação do mundo, a coordenação e controle de movimento da aeronave e uma boa dose de inteligência para tratar a incerteza na construção de estratégias confiáveis para a definição dos movimentos.

Tratou-se especificamente de um modelo de otimização de movimentos definido 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 movimento, e suavidade e a continuidade da curva que forma o caminho tridimensional.

Porém, certo de que este trabalho é apenas um começo, uma etapa inicial a partir da qual novas pesquisas relacionadas ao tema planejamento de trajetórias/caminhos serão derivadas e desenvolvidas. Com a finalização dessa etapa, se buscará pela integração da abordagem a um sistema de navegação real onde se avaliará com maior exatidão a operacionalidade dos métodos aqui desenvolvidos, aprimorando consideravelmente os resultados e as aplicações dos VANT's em regiões esparsas, grandes e sujeitas a variações de clima e tempo. Isso abre perspectivas de novas pesquisas e influência decisivamente no desenvolvimento técnico-científico da Amazônia Brasileira.

REFERÊNCIAS

- ALVES, O. L. F; CUNHA, A. E. C. Modelagem e Controle de uma Aeronave de Asas Fixas para o Planejamento de Missões de VANTs. *Anais do CBA*, 2010.
- BUENO, S. S. Robótica Aérea: PORTAL COMCIENCIA. Nº 70. Outubro de 2005. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/reportagens/2005/10/10.shtml>> Acesso em ago de 2012.
- CHAN-WOOK, L; SANGHYUK, P; CHANG-KYUNG, R; KEEYOUNG, C; JUNG-HEE, C. *A path planning algorithm for Surveillance UAVs with timing mission constrains*, 2010 International Conference on Control Automation and Systems (ICCAS), pp. 2371– 2375, 2010.
- CHEN, X; ZHANG, J. *The Three-dimension Path Planning of UAV Based on Improved Artificial Potential Field in Dynamic Environment*. Fifth International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. IEEE 2013.
- CHOI, J; ELKAIM, G.H. *Bezier Curve for Trajectory Guidance*. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008.
- ERGEZER, H; LEBLEBICIOGLU, M, K. *3D Path Planning for UAVs for Maximum Information Collection*. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Grand Hyatt Atlanta, Atlanta, GA. IEEE 2013.
- FURTADO, V. H. et al. “Aspectos de Segurança na Integração de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) No Espaço Aéreo Brasileiro”. Simpósio de Transporte Aéreo, 2008, Rio de Janeiro. Anais do VII SITRAER. Rio de Janeiro: E-Papers, 2008. v. 1 e 2. p. 92-99.
- GONÇALVES, V. M; MAIA, C. A; PIMENTA, L. C. A; PEREIRA, G. A. S. Navegação de robôs utilizando curvas implícitas. *Revista Controle & Automação/Vol.21 Nº.1/Jan e Fev 2010*.
- HAO MENG; GUIZHOU XIN. *UAV route planning based on the genetic simulated annealing algorithm*, 2010 International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), pp. 788 – 793, 2010.
- KARIMODDINI, A.; GUOWEI CAI; CHEN, B.M.; HAI LIN; LEE, T.H. *Multi-layer flight control synthesis and analysis of a small-scale UAV helicopter*, 2010 IEEE Conference on Robotics Automation and Mechatronics (RAM), Digital , pp. 321 – 326, 2010.
- LENTILHAC, S. *UAV flight plan optimized for sensor requirements*, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Volume: 25, Issue: 2, pp. 11 - 14 2010.
- LI, YING; HONG, SHENG; HUANG, JUN; MO, SONG. *The New Environment Model Building Method of Penetration Mission Basead on the Artificial Potential Field Approach*. 2012 IEEE International Multi-Disciplinary Conference on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support, New Orleans, LA.

LIM, C.W.; RYOO, C.K.; CHOI, K.; CHO, J. *Path generation algorithm for Intelligence, Surveillance and Reconnaissance of an UAV*, Proceedings of SICE Annual Conference 2010, Pp. 1274 – 1277, 2010.

LIXIA, XIE JUN; CAI MANYI; XIE MING; WANG ZHIKE. *Path planning for UAV based on improved heuristic A* algorithm*, 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2009. ICEMI '09, pp..3-488 - 3-493, 2009.

MACHARET, D. G; ALVES NETO, A; CAMPOS, M. F. M. *Feasible UAV Path Planning Using Genetic Algorithms and Bézier Curves*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.

NABI-ABDOLYOUSEFI, R; BANAZADEH, A. *3D Offline Path Planning for a Surveillance Aerial Vehicle Using B-Splines*. Proceeding of the 2013 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, Luoyang, China, September 25-27, 2013. IEEE 2013.

NALDI, R.; MARCONI, L. *Minimum Time Trajectories For A Class Of V/STOL Aircrafts*, Chinese Control and Decision Conference (CCDC), , Pp. 2097 – 2102, 2010.

NETO ALVES, A. *Geração de Trajetórias para Veículos Aéreos Autônomos Não-Tripulados*. 2008.

PASTOR, E., LOPES, J. and ROYO, P. *UAV Payload and Mission Hardware/Software Architecture*. IEEE A&E Systems Magazine. June 2007.

PORTAL VANT. Disponível em: <<http://www.vant.org.br>>. Acessado em Julho de 2012.

QU, YAO-HONG; PAN, QUAN; YAN, JIAN-GUO. *Flight Path Planning of UAV Based on Heuristically Search and Genetic Algorithms*. IEEE 2005.

RAGLS; CHONG, E. K.P. *Dynamic UAV Path Planning for Multitarget Tracking*. 2012 American Control conference. Canadá.

ROBERGE, V; TARBOUCHI, M; LABONTÉ, G. *Comparison of Parallel Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization for Real-Time UAV Path Planning*. IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9, no. 1, february 2013.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. *Inteligência Artificial*. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

SEIBEL.C; FARINE, J-M. *A formal Approach For Mission Planning and Control of Unmanned Aircraft*. 15th Triennial World Congress 2002.

WU, P.P.-Y.; CAMPBELL, D. MERZ, T. *Multi-objective Four-Dimensional Vehicle Motion Planning in Large Dynamic Environments Systems*, IEEE Transactions on Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, Volume:PP., pp. 1 - 14, Issue: 99, 2011.

VACHTSEVANOS, G; TANG, L; DROZESKI, G; GUTIERREZ, L. *From mission planning to flight control of unmanned aerial vehicles: Strategies and implementation tools*. Annual Reviews in Control 29 (2005) 101–115.

THRUN, S.; BURGARD, W.; FOX, D. (2005). *Probabilistic Robotics*. Cambridge: The MIT Press. 667p.

YANG, K.; SUKKARIEH, S. *3D Smooth Path Planning for a UAV in Cluttered Natural Environments*. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2008.

XIAO-DONG, C; DE-YUN, Z; RUO-NAN, Z. *New Method for UAV Online Path Planning*. IEEE 2013.

XIAO, Q; WANG, Y; GAO, S; WANG, J. *3D Path Planning Based on Elevation Model and Ant Colony Algorithm*. Fifth International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics. IEEE 2013.

ZHANG, CHAO; ZHEN, ZIYANG; WANG, DAOBO; LI, MENG. *UAV Path Planning Method Based on Ant Colony Optimization*. IEEE 2010.