

ANÁLISE DE CENÁRIOS PARA REPLANEJAMENTO DE ROTAS PARA VANTs

Maria José Pinto

Instituto de Estudos Avançados (IEAv)
Trevo Cel Av José A. A. do Amarante, no 1, Putim, CEP 12228-001, São José dos Campos, SP
maju@ieav.cta.br

Ricardo Augusto Sampaio de Oliveira

Parque Material Aeronáutico do Galeão
R: Alfredo Rocha, 495, Ilha do Governador, CEP 21941-580, Rio de Janeiro, RJ
ricardosampaioj@gmail.com

Felipe Leonardo Lôbo de Medeiros

Instituto de Estudos Avançados (IEAv)
Trevo Cel Av José A. A. do Amarante, no 1, Putim, CEP 12228-001, São José dos Campos, SP
felipe@ieav.cta.br

RESUMO

Este trabalho considera o problema de geração de rotas para Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) onde o veículo precisa sair de um ponto inicial e chegar em um ponto destino, considerando os obstáculos do ambiente de navegação. Especificamente neste trabalho, pretende-se comparar diferentes metodologias para a geração da rota de forma a avaliar seu comportamento e sua eficiência em diferentes cenários quando um replanejamento da rota é necessário. Os cenários de replanejamento foram definidos considerando, por exemplo, alterações no ambiente de navegação ou na definição do ponto destino onde procurou-se avaliar o impacto entre gerar uma nova rota ou buscar meios de retomar a rota planejada buscando alterar o mínimo possível o planejamento original.

PALAVRAS CHAVE. VANT, Replanejamento de rota, Análise de cenários.

Logística e Transporte

ABSTRACT

This paper considers the route generation problem for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) where the vehicle needs to leave from an initial position and gets to a final position, considering the obstacles on the navigation environment. Specifically in this work, we intend to compare different methodologies to generate routes in order to evaluate their behavior and their effectiveness in different scenarios when a route replanning is required. The replanning scenarios were defined considering, for example, changes on the navigation environment or in the definition of the final position where the impact of generating a new route or returning to the planned route was evaluated trying to change as little as possible the original planning.

KEYWORDS. UAV. Path replanning. Scenario analysis.

Logistic and Transport

1. Introdução

Este trabalho propõe tratar o planejamento de rotas de navegação de forma a contribuir para o aumento da autonomia dos VANTs transferindo parte do processo de tomada de decisão do operador para o próprio veículo.

O planejamento de rotas consiste de um problema clássico da Pesquisa Operacional, o Problema de Roteamento de Veículos (PRV) que, de maneira geral, busca gerar rotas eficientes para uma ou mais entidades de forma a atender um determinado objetivo como, por exemplo, minimizar o custo total da rota. Dentre as diversas aplicações deste problema podemos citar: serviços emergenciais, rotas de aeronaves, etc (Goldbarg e Luna, 2000).

Em particular, nosso interesse consiste de um problema de roteamento específico para geração de rotas para VANTs onde o veículo precisa sair de um ponto inicial e chegar em um ponto destino, considerando os obstáculos do ambiente de navegação, definidos por um modelo digital de elevação de terreno. Em trabalhos anteriores (Silva *et al.*, 2015; Cordeiro *et al.*, 2015), o problema descrito foi tratado utilizando diferentes metodologias como o método Transformada de Distância proposto em Zelinsk *et al.* (1993) e o método que utiliza árvores aleatórias de rápida exploração (RRT, do inglês *Rapidly-exploring Random Trees*) descrito em LaValle (1998).

Especificamente neste trabalho, o objetivo consistirá em comparar diferentes metodologias para a geração da rota de forma a avaliar seu comportamento e sua eficiência em diferentes cenários quando um replanejamento da rota é necessário buscando verificar qual método se adapta melhor a cada tipo de situação. Os cenários serão definidos considerando, por exemplo, alterações no ambiente de navegação e na definição do ponto destino. A mudança no ambiente pode ser causada, por exemplo, por uma mudança na altitude de voo considerada ou se um novo obstáculo for identificado impedindo a continuidade da rota anteriormente planejada. Neste caso, pretendemos avaliar o impacto entre gerar uma nova rota ou buscar meios de retomar a rota planejada de forma a alterar o mínimo possível o planejamento originalmente gerado.

Além dos métodos já citados anteriormente, será utilizado o método *Probabilistic Roadmap* (PRM), desenvolvido por Kavraki (1994). Cada um dos métodos utilizados será descrito na Seção 2. Na Seção 3, os cenários de replanejamento são apresentados e, na Seção 4, os resultados dos testes computacionais realizados considerando cada cenário. Na seção 4, são feitas algumas considerações finais, juntamente com propostas de trabalhos futuros.

2. Metodologias para o Planejamento de Rotas para VANTs

A seguir serão descritos os três métodos estudados para tratar o problema: RRT, Transformada de Distância (TD) e PRM.

2.1 RRT

Árvores aleatórias de rápida exploração (RRTs, do inglês *Rapidly-exploring Random Trees*) são métodos de amostragem de ambientes de navegação, que foram utilizados no planejamento automático de rotas para VANTs em Silva *et al.* (2015). Uma RRT é uma combinação de um grafo, na forma de uma árvore, com um método simplificado de busca onde o nó raiz da árvore é a posição inicial da rota a ser planejada. O funcionamento da RRT clássica consiste em expandir a árvore de modo aleatório a partir do nó raiz até que um determinado número de iterações seja alcançado ou tenha sido encontrado o ponto de destino. A expansão é feita da seguinte forma: gera-se uma posição aleatória k no ambiente de navegação e um segmento de reta é traçado entre a posição k e o nó i (nó da árvore mais próximo da posição k). Define-se uma distância Δq e o novo nó da árvore será um nó pertencente ao segmento de reta cuja distância em relação ao nó i é igual a Δq .

A expansão da árvore corresponde a uma amostragem das regiões navegáveis do ambiente de navegação. A Fig. 1 apresenta exemplos de árvores geradas pelo método RRT.

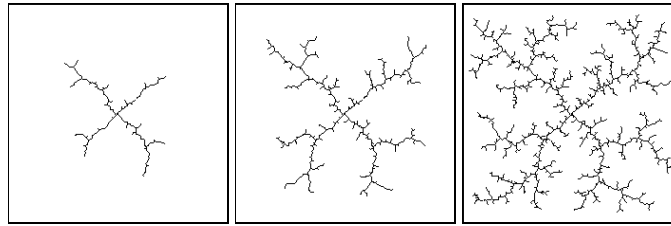


Figura 1. Exemplos de árvores geradas pelo método RRT, variando o número de iterações.
 Fonte: LaValle (1998).

Vale ressaltar que o RRT é um algoritmo randômico com viés a explorar espaços livres. Com isso, ele não objetiva determinar o caminho ótimo entre dois pontos, mas sim determinar um caminho possível de forma rápida. A influência de parâmetros predefinidos tem suma importância no desempenho da busca. O aumento de Δq , por exemplo, tende a aumentar a velocidade com que a árvore é expandida. No entanto, a qualidade do resultado tende a diminuir, aumentando o tamanho do percurso. Outro problema causado pelo aumento de Δq é a expansão da árvore passar por passagens estreitas de obstáculos. Já o número de ramos limite deve ser grande o suficiente para que permita a árvore se expandir mas, por outro lado, deve ser o mínimo necessário para que a ausência de caminho seja rapidamente detectada, impedindo um elevado tempo de execução do método. Como cada nó possui informação de seu nó antecessor, a rota é traçada da posição final até a posição de origem e depois invertida.

2.2 Transformada de Distância (TD)

Este método é bastante utilizado na literatura para processamento de imagens, sendo que Jarvis e Byrne (1986) (cf. Zelinsk, 1992) foram os primeiros a utilizá-lo para gerar rotas para robôs móveis. Em Cordeiro *et al.* (2015), o método foi utilizado no planejamento automático de rotas para VANTs. De maneira geral, o método consiste em utilizar uma malha (*grid*) da área a ser explorada, sendo que cada célula é identificada como sendo uma região livre ou ocupada. Uma região é considerada ocupada quando contém algum obstáculo e, desta forma, as células livres correspondem às células navegáveis. A Fig. 2 mostra uma possível grade para uma determinada área, onde células preenchidas representam regiões ocupadas pelos obstáculos.

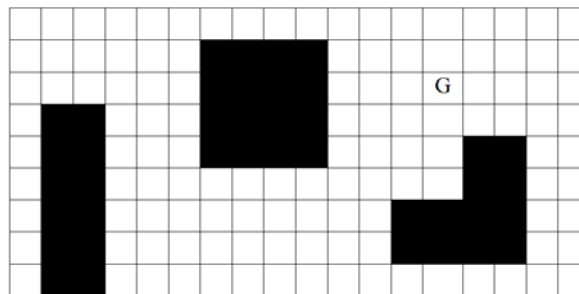


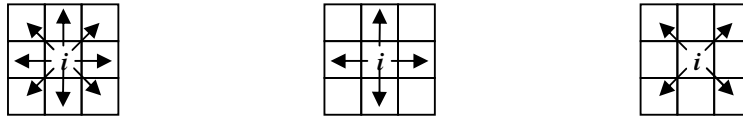
Figura 2. Exemplo ilustrativo.

Definida a grade, o método busca expandir a distância em torno da célula destino (G) como uma onda se propagando em torno dos obstáculos, associando-se valores (v) a cada célula livre a partir da célula G. O primeiro passo do método é associar à célula destino um valor nulo ($v=0$) e às demais células livres valores altos. Em seguida, o valor de cada célula livre i é atualizado de acordo com os valores de seus vizinhos, da seguinte forma:

$$v(i) = \min \{v(i), v(1) + \text{custo de mover da célula } i \text{ para o vizinho } 1, \\
 , v(2) + \text{custo de mover da célula } i \text{ para o vizinho } 2, \\
 \vdots \\
 , v(T) + \text{custo de mover da célula } i \text{ para o vizinho } T\} \quad (1)$$

onde T representa o total de vizinhos da célula i .

Para cada célula livre i da grade, o valor de T é definido de acordo com o tipo de vizinhança escolhido que definirá quais as células vizinhas podem ser exploradas caso o veículo esteja na célula i , como ilustrado a seguir.



O custo de mover de uma célula i para uma célula j pode ser definido como um custo fixo ou estar relacionado à distância entre estas células (distância euclidiana, por exemplo). A Fig. 3 ilustra o custo final após a aplicação do método na grade da Fig. 2, considerando a primeira vizinhança ilustrada anteriormente e um custo para mover de uma célula para outra fixo e unitário, ou seja, cada célula possui dimensão 1×1 .

13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	2	2	2	2	3	4
13	12	11	10	9	8					3	2	1	1	1	2	3	4
13	12	11	10	9	9					3	2	1	G	1	2	3	4
13			10	9	9					3	2	1	1	1	2	3	4
14			10	9	8					3	2	2	2			3	4
15			10	9	8	7	6	5	4	3	3	3	3			4	4
16			10	9	8	7	6	5	4	4	4					5	5
17			10	9	8	7	6	5	5	5	5					6	6
18			10	9	8	7	6	6	6	6	6	6	7	8	7	7	7

Figura 3. Custo das células após aplicar a TD na área da Fig. 2.

Dada uma posição inicial (S), o caminho até G é calculado como uma seqüência de células buscando-se sempre pela célula vizinha livre de menor valor v , ou seja, a busca é iniciada a partir de S e é finalizada somente quando G é alcançado. A Fig. 4 mostra um caminho possível para o exemplo da Fig. 2, considerando S na posição ilustrada na figura.

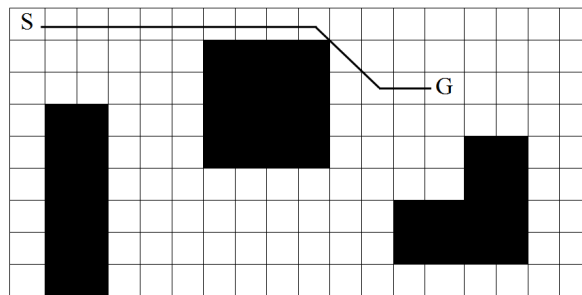


Figura 4. Caminho gerado pela TD para o exemplo da Fig. 2.

2.3 PRM

O *Probabilistic Roadmap* (PRM) foi proposto por Kavraki (1994) e, como a RRT, foi idealizado para o planejamento de rotas, evitando colisões e num tempo computacional aceitável. Em termos gerais, o método busca criar “estradas” em determinados pontos do ambiente livre de navegação e, no final, busca ligar o início e o destino por uma mesma “estrada”. O PRM se divide em 3 fases: de aprendizagem, de expansão e de questionamento.

A fase de aprendizagem consiste em montar o mapa (*Roadmap*) adicionando, aleatoriamente, N pontos no ambiente livre de navegação e ligando-os entre si por uma linha reta, quando possível. Estipula-se um número máximo de pontos a serem escolhidos para que se tente efetuar as conexões, de acordo com Kavraki (1994). Um exemplo da fase de aprendizagem é apresentado na Fig. 5.

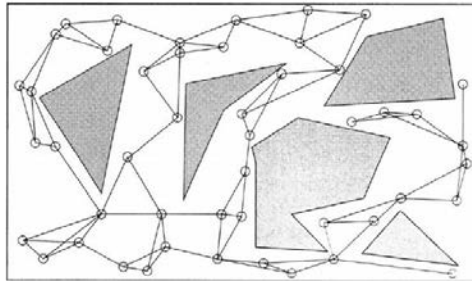


Figura 5. Fase de aprendizagem.

A fase de expansão tem por objetivo melhorar a qualidade do *Roadmap* gerado. Para isto, pontos de difícil acesso são identificados heurísticamente e adicionados novos pontos nessas regiões. Os novos pontos são adicionados através dos chamados *Round Bouce Walk* (RBW). O RBW consiste em, a partir dos pontos selecionados heurísticamente, deslocar-se em uma direção randômica até encontrar um obstáculo. Ao encontrar um obstáculo, move-se em outra direção, que esteja no espaço livre de navegação. O processo ocorre até que o espaço total percorrido, a partir do ponto selecionado, atinja um valor limite previamente estipulado. Um exemplo desta fase é demonstrado na Fig. 6.

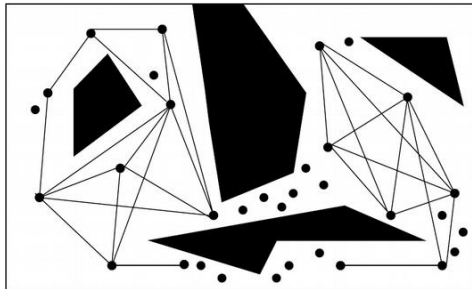


Figura 6. Fase de expansão.

Neste trabalho, para selecionar os pontos para a expansão utilizamos o procedimento proposto em Kavraki (1994), ou seja, define-se d_x como sendo o número de conexões do nó x ao final do processo de aprendizado. Com isso, dado um número N de pontos adicionados no ambiente de navegação, o peso $w(x)$ é definido da seguinte forma:

$$w(x) = \frac{1}{d_x + 1} \sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i + 1} \quad (2)$$

O valor (2) representa o peso do nó x e corresponde à dificuldade deste ponto ser atingido, ou seja, quanto maior seu valor, menos conexões aquele nó obteve, sugerindo que seja um lugar de difícil acesso. Com o peso de todos os pontos definidos, escolhe-se o ponto probabilisticamente de acordo com estes pesos, ou seja: $Pr(x \text{ ser selecionado}) = w(x)$.

Por fim, a fase de questionamento procura determinar, utilizando o *Roadmap* gerado, um caminho entre o ponto de início e destino através de qualquer algoritmo de planejamento de rota. Neste trabalho, utilizamos o algoritmo A* (Hart *et al.*, 1968).

3. Cenários de Replanejamento

Para avaliar o comportamento de cada metodologia, foram gerados diferentes cenários visando o replanejamento de rota para o VANT. Primeiramente, consideramos a ocorrência de alterações do ambiente de navegação (Cenário 1) causadas, por exemplo, pela descoberta de novos obstáculos ou pela alteração da altitude de voo. Com isso, o algoritmo recebe como *input* os novos obstáculos do ambiente e replaneja a rota até o mesmo ponto de destino previamente estabelecido. Um replanejamento também seria necessário caso ocorra uma mudança da missão

previamente planejada para o VANT, ou seja, o ponto de destino é alterado (Cenário 2). Outra possibilidade seria a adição de novos pontos de destino à missão (Cenário 3).

Para o Cenário 1, consideramos diferentes estratégias de replanejamento buscando tratar, basicamente, da definição de quais pontos seriam utilizados como partida e destino para o novo planejamento e quanto do caminho previamente definido seria reutilizado. Estas estratégias buscam responder as seguintes questões:

Caso 1: Deve-se calcular a rota até o ponto de destino ou somente até o ponto imediatamente após o obstáculo, retornando à rota original?

Caso 2: Deve-se gerar a nova rota a partir da posição corrente ou seguir a rota original até o ponto imediatamente anterior ao obstáculo antes de gerar a nova rota?

Caso 3: Caso exista mais de um novo obstáculo, deve-se ultrapassar todos os obstáculos de uma vez ou ultrapassá-los um a um?

O desempenho de cada algoritmo foi analisado, levando-se em conta o tempo gasto no replanejamento e o novo custo da rota. Entretanto, vale ressaltar que o fator mais determinante neste trabalho foi o tempo de resposta pela possibilidade de um replanejamento em tempo real. Para todos os cenários estudados, foi utilizado como dados previamente calculados: a rota original (gerada anteriormente), o *Roadmap* calculado em ambiente estático (para o PRM) e a posição atual do VANT, além de *inputs* específicos de cada cenário.

Para a definição da rota original e para validação das metodologias implementadas, realizamos alguns testes computacionais considerando um ambiente estático e a existência de obstáculos. Como resultado, verificamos que a rota definida pela TD, apesar de um maior tempo computacional, gerou melhores resultados em relação ao custo. Com isto, a rota definida pela TD foi a utilizada como rota original nos testes computacionais considerando o replanejamento.

O *Roadmap* previamente construído foi utilizado no PRM também no replanejamento pois o desempenho do método melhora significativamente, principalmente em termos de tempo. Cabe observar que poderá ser necessário atualizar essa estrutura previamente construída em algumas situações como para o caso em que os novos obstáculos estiverem obstruindo uma aresta do grafo ou coincidirem com algum de seus vértices.

4. Testes Computacionais e Resultados

Para verificar o comportamento dos métodos nos cenários de replanejamento descritos foi utilizado um ambiente definido pelo modelo digital de elevação apresentado na Fig. 7, onde os obstáculos foram definidos considerando uma altitude de corte de 1.200m. Isto significa que toda célula do modelo digital de elevação com valor superior ou igual a 1.200m corresponde a um obstáculo do ambiente de navegação. Assim, a altitude de navegação do VANT pode ser especificada como a soma da altitude de corte e uma altura de segurança. Neste ambiente de navegação, esta altitude resultou em uma matriz quadrada binária de ordem 1201, onde cada célula corresponde a uma região real com 90 m de largura por 90 m de comprimento. O ambiente de navegação é delimitado pelas posições geográficas $(lat_{inf}, long_{inf}) = (-22.994583, -45.99875)$ e $(lat_{sup}, long_{sup}) = (-22.000417, -45.002917)$.

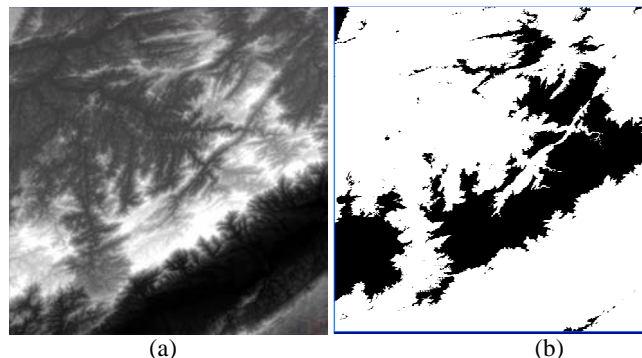


Figura 7. (a) modelo digital de elevação e (b) ambiente de navegação.

Neste trabalho, a implementação dos métodos foi feita em MATLAB. Além disso, foram feitos alguns testes utilizando o ambiente de navegação da Fig. 7 para definição de alguns parâmetros necessários nos métodos RRT e PRM. No caso da RRT, definimos $\Delta q = 120$ e o número de ramos da árvore igual a 5.000. No caso do PRM, o número de pontos usados na construção do *Roadmap* (N) foi fixado em 550. Sobre as falhas que podem ocorrer no processo de determinação da rota quando o *Roadmap* gerado pelo PRM não tem conexões com o ponto de destino ou de partida, existem algumas técnicas na literatura para contornar este problema como, por exemplo, usar o RBW a partir dos pontos de partida e/ou chegada até que se consiga fazer uma conexão com o grafo. Ainda, pode-se tentar adicionar novos nós ao grafo, usando heurísticas que favoreçam que esses novos pontos ajudem a fazer a ligação com os pontos desejados. Neste trabalho, por simplificação e por não ter sido necessário gerar muitas vezes, optamos em gerar um novo *Roadmap* caso ocorra uma falha.

Os testes computacionais foram realizados em um notebook HP Envy, com processador Intel Core i5-3230M CPU @ 2,60GHz e memória RAM de 8GB. Os resultados obtidos estão apresentados considerando cada um dos cenários apresentados anteriormente.

4.1 Cenário 1: Mudança do ambiente de navegação

Para analisar qual a melhor estratégia neste cenário, optamos verificar cada caso separadamente. Com isso, primeiramente, procurou-se responder se seria melhor gerar a nova rota diretamente para o destino ou para o ponto imediatamente posterior ao obstáculo (Caso 1). Em seguida, se seria melhor partir do ponto atual ou do ponto imediatamente anterior ao obstáculo (Caso 2). E, por fim, para casos com mais de uma parte do caminho obstruída, avaliou-se se seria melhor atravessar todos os obstáculos de uma vez ou atravessá-los um a um (Caso 3).

4.1.1 Caso 1: destino ou ponto posterior ao obstáculo

Neste cenário, utilizou-se uma posição atual perto suficiente do obstáculo e estudou-se o comportamento de duas estratégias: direto ao destino (Estratégia 1) ou ao ponto posterior ao obstáculo (Estratégia 2), variando-se o custo do trajeto restante. Os resultados estão apresentados na Tabela 1, onde a coluna 'Posição' representa a posição do VANT quando foi identificada a necessidade do replanejamento; a coluna 'Obstáculo', as posições do novo obstáculo; a coluna TR, o trajeto restante até o destino (em metros); a coluna E, a estratégia analisada; e, as demais colunas, os resultados obtidos por cada método, em relação ao custo (em metros) e ao tempo computacional (em segundos). A posição (x, y) nas tabelas de resultados corresponderá, respectivamente, à linha e coluna da matriz quadrada binária 1201×1201 , que representa o ambiente de navegação.

Tabela 1. Resultado considerando a escolha do ponto de término do replanejamento.

Posição	Obstáculo	TR	E	TD		RRT		PRM	
				Custo	Tempo	Custo	Tempo	Custo	Tempo
(1101, 1041)	(1103, 1048)	8460,0	1	9.095,47	12,98	9.091,78	0,4070	9.091,78	0,0058
			2	9.095,47	9,80	34.766,04	0,0643	31.602,84	0,0052
(1044, 729)	(1048, 745)	36171,0	1	37.547,37	31,00	37.547,37	0,0599	37.547,37	0,0073
			2	37.652,45	27,92	37.652,45	0,0556	37.652,45	0,0069
(981, 409)	(994, 450)	63162,0	1	69.065,47	39,08	87.934,41	0,0930	94.240,73	0,1677
			2	69.065,47	39,06	76.813,55	0,0786	98.073,52	0,0938
(840, 340)	(860, 341)	80226,9	1	81.774,35	44,57	109.866,19	0,2374	105.723,85	1,1170
			2	82.036,83	10,36	103.392,57	0,0627	109.578,00	0,3099
(510, 480)	(520, 470)	117074,7	1	117.779,81	57,70	154.524,16	1,7779	143.197,46	1,1588
			2	118.349,19	13,91	138.709,17	0,0614	182.547,60	0,1661
(361, 630)	(370, 620)	136166,4	1	136.813,12	71,11	183.448,34	1,6322	167.170,42	1,9688
			2	137.382,81	29,28	141.265,77	0,0626	192.917,47	0,1582
(180, 848)	(190, 838)	162377,1	1	163.078,80	190,57	187.460,86	3,0300	220.268,07	1,9450
			2	163.651,54	12,37	169.367,45	0,2490	167.996,83	1,3025

Como era esperado, quando um obstáculo aparece quando o VANT está numa posição muito distante do destino (valores maiores da coluna TR), o tempo computacional aumenta consideravelmente pois é como se estivéssemos praticamente na mesma situação de quando a rota original foi gerada. De maneira geral, o resultado da TD em relação ao tempo computacional foi claramente maior quando comparado aos outros 2 métodos mas mostra uma qualidade em relação ao custo também superior. Comparando a RRT e o PRM, é possível perceber que não há nenhum método que claramente se destaca em comparação ao outro. No entanto, a RRT com replanejamento até o ponto subsequente ao obstáculo (Estratégia 2) apresenta um resultado ligeiramente melhor, para alguns casos, principalmente à medida que o trajeto restante aumenta.

Com respeito às estratégias, nota-se que, com um curto trajeto restante, é mais vantajoso replanear a rota diretamente ao ponto de destino, enquanto que ocorre o contrário com o aumento do trajeto restante. Além disso, em relação ao tempo computacional, o PRM mostrou-se vantajoso para curtos trajetos restantes, enquanto que a RRT, com a Estratégia 2, mostrou-se mais rápida para longos trajetos restantes. Para este cenário e considerando que o tempo computacional será essencial para a escolha do método, sugere-se utilizar o PRM com a Estratégia 1 quando o trajeto restante é pequeno e a RRT com a Estratégia 2 para trajetos longos, pois esta passa a ser mais vantajosa.

4.1.2 Caso 2: posição atual ou ponto anterior ao obstáculo

Nestes testes, procuramos não variar muito o trajeto restante, mantendo o valor aproximadamente constante. Para isto, fixamos o obstáculo em uma posição, no caso, na posição (260, 730). Assim, foram obtidos diferentes custos e tempos através da variação da distância da posição ao objeto, medida ao longo do trajeto. Os dados obtidos estão apresentados na Tabela 2, onde a coluna D apresenta a distância entre a posição e o obstáculo (em metros).

Tabela 2. Comparação entre estratégias para escolha de ponto de início de replanejamento.

Posição	TR	D	E	TD		RRT		PRM	
				Custo	Tempo	Custo	Tempo	Custo	Tempo
(255, 737)	150941	774	1	150460,01	90,705	215363,97	1,165	257959,68	3,715
			2	151009,29	49,040	174710,58	0,137	239245,37	2,364
			3	150460,44	92,293	227111,92	1,633	241786,53	4,067
			4	151009,72	49,287	160667,14	0,085	223072,22	3,004
(250, 745)	151802	1635	1	151333,14	99,975	213907,66	0,759	259275,58	4,994
			2	151882,42	58,275	165141,27	0,170	240561,27	3,940
			3	151321,32	109,323	193768,81	1,622	242647,42	4,662
			4	151870,60	54,765	167661,05	0,103	223933,11	2,858
(250, 755)	152697	2529	1	152227,45	106,691	180632,19	1,764	232306,22	5,653
			2	152776,73	57,614	165882,53	0,163	213591,91	4,632
			3	152215,63	104,928	225971,34	2,005	243541,73	5,796
			4	152764,91	51,443	175833,43	0,175	224827,42	2,330
(250, 770)	154047	3879	1	153577,45	108,710	183585,68	0,625	231130,72	5,958
			2	154126,73	56,912	177577,04	0,098	212416,41	4,811
			3	153565,63	102,712	221665,01	2,569	244891,73	3,762
			4	154114,91	47,584	178149,48	0,113	226177,42	2,859
(200, 827)	161041	10873	1	160571,41	95,450	225609,69	1,390	230816,37	1,499
			2	161120,69	56,995	163382,53	0,071	212102,06	0,173
			3	160559,59	87,913	231440,10	0,471	251885,69	3,998
			4	161108,87	46,213	183862,48	0,092	233171,38	2,651
(135, 895)	169507	19340	1	169037,75	104,722	199903,50	0,494	218350,99	2,626
			2	169587,03	69,963	170195,45	0,085	199636,67	1,321
			3	169025,93	87,288	232251,13	0,745	260352,03	4,310
			4	169575,21	48,276	178902,50	0,141	241637,71	2,380
(993, 430)	64971	1809	1	64866,43	40,413	65045,31	0,829	71405,72	0,080
			2	65051,63	39,843	73534,42	0,070	79069,63	0,012
			3	64866,43	39,728	65069,85	0,062	71406,03	0,012
			4	65051,63	46,245	68825,85	0,079	79069,94	0,018

Na Tabela 2, a Estratégia 1 representa o replanejamento partindo da posição atual até o ponto de destino; a Estratégia 2, partindo da posição atual até o ponto posterior ao obstáculo; a Estratégia 3, partindo do ponto anterior ao obstáculo até o ponto de destino; e, a Estratégia 4, refere-se ao roteamento entre a posição anterior ao obstáculo e a posição posterior ao mesmo. Sendo assim, a comparação deve ser feita entre as Estratégias 1 e 3 e as Estratégias 2 e 4 para que se possa analisar qual ponto é preferível para iniciar o replanejamento.

No último resultado da Tabela 2 consideramos uma posição diferente do obstáculo (940, 450) para enfatizar que o tamanho do trajeto restante é o principal fator para o desempenho e a escolha dentre os algoritmos, pois consideramos o obstáculo num ponto onde o trajeto restante era significativamente menor. Neste caso, é perceptível que o PRM torna-se mais rápido que a RRT. Além disso, o cálculo direto para o ponto de destino deixa o custo menor.

Pode-se perceber que não há grande vantagem entre os pares de estratégias comparados, no que se refere a tempo. Ou seja, as Estratégias 1 e 3 resultam num tempo computacional aproximado; assim como as Estratégias 2 e 4. Com relação à análise do custo da rota, os resultados mostram que, independente do algoritmo utilizado ou do ponto final escolhido para o replanejamento (ponto de destino ou ponto após o obstáculo), os custos sempre são menores quando o replanejamento começa do ponto anterior ao obstáculo. Ou seja, no algoritmo de replanejamento de rota sugere-se manter a rota original até o ponto anterior ao primeiro obstáculo e, somente a partir deste ponto, iniciar uma nova rota.

4.1.3 Caso 3: mais de um novo obstáculo

Neste cenário foi feita a análise para quando existe mais de um ponto da rota inicial obstruída. Para esse caso, procurou-se responder se seria melhor replanear cada aresta obstruída independentemente, uma a uma (Estratégia 1) ou fazer apenas 1 replanejamento que ultrapassasse todos os obstáculos (Estratégia 2). Neste caso, manteve-se constante a distância entre a posição atual (Posição = (180, 848)) e o primeiro obstáculo (Obstáculo = (190, 838)), além de manter-se constante o trajeto restante (TR = 163.650m). Os resultados estão apresentados na Tabela 3, onde a primeira coluna representa a distância entre os obstáculos (em metros).

Tabela 3. Comparação entre estratégias para mais de um novo obstáculo.

Distância obstáculos	E	TD		RRT		PRM	
		Custo	Tempo	Custo	Tempo	Custo	Tempo
26210,67	1	163651,94	56,47	170886,94	1,338	165055,27	8,615
	2	163648,62	58,65	165096,36	0,071	230870,47	0,485
45302,47	1	163651,62	52,64	170355,69	0,241	165055,27	8,177
	2	163648,30	55,35	168248,59	0,079	230870,47	0,485
60405,86	1	163681,43	21,99	183393,23	0,131	270329,82	8,188
	2	163654,81	65,08	164579,15	0,076	225919,73	0,539
82150,31	1	163659,68	23,86	172971,58	0,214	181704,53	8,508
	2	163341,28	84,00	196034,24	0,244	198129,43	0,672
99214,95	1	163731,95	55,54	170740,68	0,137	179151,28	7,913
	2	163274,03	98,11	210275,02	0,584	220272,09	1,774

Para o PRM, a segunda estratégia apresentou melhores resultados, em relação ao tempo, independente da distância entre os obstáculos. A partir de certa distância entre os obstáculos, para a RRT, a Estratégia 2 deixa de ser mais vantajosa que a 1. Era esperado que isso acontecesse, pois quando a distância entre os obstáculos é muito grande o replanejamento se dará para um espaço muito grande, de tal forma que vale a pena apenas replanear cada caminho obstruído separadamente.

4.2 Cenário 2: Mudança de destino

O segundo cenário estudado consistiu em avaliar uma mudança da rota devido à alguma impossibilidade de atingir o objetivo anterior ou de uma mudança na missão e, neste caso, o ponto de destino é alterado e o replanejamento deve ser feito em tempo real para o novo ponto de chegada. Neste caso, deve-se considerar a disponibilidade de tempo necessário para o replanejamento em voo, ou seja, o tempo computacional é a maior restrição. Como se trata de um replanejamento sem mudança do ambiente de navegação e como comentado anteriormente, a TD claramente mostrou um tempo computacional acima dos outros algoritmos em um ambiente estático, este método não será utilizado para avaliação deste cenário. Na avaliação do desempenho dos métodos RRT e PRM, buscou-se verificar a influência da distância entre os pontos de partida e destino, segunda coluna da Tabela 4 (em metros).

Tabela 4. Comparação RRT e PRM para mudança de destino.

Ponto de partida	Distância euclidiana	RRT		PRM	
		Custo	Tempo	Custo	Tempo
(5, 1083)	98962,56	233714,48	1,07	257153,22	1,03
(251, 742)	84710,22	204992,14	0,75	188127,29	1,12
(775, 336)	78316,54	118207,94	0,31	112917,79	0,04
(933, 386)	69739,02	105175,41	0,21	101881,72	0,05

O PRM obteve melhores resultados, tanto em relação ao tempo quanto em relação ao custo, para distâncias menores. Para distâncias maiores, não foi possível chegar a uma conclusão. Após a análise ainda é preciso um modo rápido e eficaz de analisar se o ambiente em que o VANT se encontra é ou não muito obstruído para que seja possível determinar qual algoritmo utilizar. Entretanto, é particularmente difícil determinar essa complexidade para um novo destino sem fazer nenhum planejamento de rota para área que ele se encontra. Se o novo destino se encontrar suficientemente perto do destino anterior, pode-se estimar quão obstruído o ambiente está pela diferença ou razão entre o trajeto restante e a distância euclidiana entre os pontos. Se essa diferença ou razão for relevante, significa a necessidade de um grande desvio, devido o ambiente estar muito obstruído. Para novos destinos distantes do destino anterior, será considerado o pior caso, ou seja, que ele se encontra em um ambiente com muitos obstáculos.

Entretanto, se o novo destino for significativamente perto do destino anterior, convém que seja reutilizado o caminho anterior. Assim, o planejamento entre o destino anterior e o novo destino, além da reutilização do caminho anterior, resultará em um caminho final com custo quase igual ao anterior. E, como o custo anterior é o melhor obtido (calculado pela TD) e a distância entre os pontos de replanejamento (destino anterior e novo destino) é pequena, o custo final também se aproximará do melhor obtido. Além disso, o ganho com tempo é evidente pois, ao invés de replanear desde a posição corrente até o novo destino, o que pode ser uma distância considerável, o roteamento se dará para pontos próximos. Para pontos próximos, o PRM mostra-se mais rápido e eficiente e, por isso, seria o algoritmo utilizado nesse caso.

4.3 Cenário 3: novos destinos

O último cenário analisado foi o da adição de novos destinos em tempo real, além do definido previamente. Neste caso, seria necessário determinar uma ordem em que os novos destinos seriam visitados, de modo a minimizar o custo total. Entretanto, como não se sabe a distância real entre os pontos (devido à existência de obstáculos), apenas a euclidiana, dificultaria determinar o custo das arestas para utilizar um algoritmo de busca. Um modo de solucionar esse problema seria calculando todas as distâncias reais, no entanto, dependendo do número de pontos, o tempo de computação gasto seria inviável para um processamento em tempo real.

Uma outra possibilidade seria definir a ordem de visita heurísticamente onde o caminho anterior seria percorrido até chegar a um ponto que se encontrasse o mais perto possível de um destino adicional e a rota seria gerada entre eles. Em seguida, a partir do ponto adicional seria verificado se o trajeto mais curto seria retornar a rota original ou fazer o planejamento para outro destino adicional. Contudo, a diferença entre a distância euclidiana e a distância real também seria um problema além do fato que, por mais que voltar para a rota esteja mais perto que planejar o caminho para outro destino adicional, talvez o replanejamento total mais curto fosse indo direto ao novo ponto adicional. Por fim, vale lembrar que qualquer roteamento adicional e desnecessário contribui fortemente para o tempo computacional, o que não é desejado.

Com isto, buscou-se simplificar o cenário imaginado considerando apenas um destino adicionado. Dentro deste cenário simplificado, a ideia heurística poderia ser utilizada. Além disso, se assumirmos que o destino extra não esteja tão longe da rota original e nem dos pontos intermediários da rota, podemos avaliar as metodologias utilizando os resultados encontrados anteriormente para replanejamento com novos obstáculos. Desta forma, independentemente da posição e do algoritmo utilizado, o ponto inicial do replanejamento deve ser o imediatamente anterior ao destino adicional, ou seja, o ponto mais próximo do destino adicional. Ainda utilizando os resultados obtidos anteriormente, o ponto final dependerá do trajeto restante.

Para finalizar a análise deste cenário, ainda é necessário decidir pelo algoritmo para fazer o roteamento entre o ponto da rota atual e o novo destino. No caso, no cenário considerando novos obstáculos, não ficou definido especificamente qual algoritmo deveria ser utilizado quando o ponto inicial é definido como sendo o ponto imediatamente anterior ao obstáculo (todos os algoritmos levaram à mesma conclusão). E, no caso do primeiro cenário, o algoritmo foi escolhido pelo trajeto restante por se tratar de apenas um roteamento. No entanto, nesse cenário, como tratam-se de dois roteamentos (rota original-novo destino e novo destino-rota original), entendemos que não faria sentido repetir o algoritmo utilizado no roteamento para o ponto final. Desta forma, para resolver tal questionamento, utilizou-se os resultados encontrados no Cenário 2 e sugere-se utilizar o PRM, se estiver perto do destino adicional e, o RRT, caso contrário.

Após definida a estratégia, foram gerados os resultados apresentados na Tabela 5. Buscou-se principalmente verificar a influência de um destino adicional no sentido de aumentar o custo da rota gerada anteriormente. Para isso, a partir de uma posição fixa (361, 630), foi variada a mínima distância (em metros) do destino adicional.

Tabela 5. Influência no custo adicional ao incluir um novo destino.

Destino adicional	Distância	Custo	Tempo	Custo adicional	
				Absoluto	Percentual (%)
(717, 278)	4394,36	146141,37	0,295	8765,38	6,38
(650, 250)	6354,41	147405,01	0,318	10029,02	7,30
(600, 200)	12302,38	159663,56	0,251	22287,57	16,22
(550, 160)	17802,03	170925,88	0,226	33549,89	24,42
(500, 140)	22090,37	179881,51	0,227	42505,52	30,94
(440, 135)	26280,00	195671,17	0,168	58295,18	42,43
(380, 100)	32265,84	207830,99	0,173	70455,00	51,29
(260, 20)	45054,77	225582,79	0,208	88206,80	64,21
(180, 1)	51671,29	238633,62	0,218	101257,63	73,71

Percebe-se que a localização do destino a ser incluído influencia significativamente no novo custo. Assim, essa estratégia não se mostra muito aconselhável para pontos adicionados muito distantes do caminho inicial. O aumento no custo foi próximo ao linear e proporcional ao aumento da distância entre o ponto da rota original e o novo ponto. Isso era de se esperar, uma vez que o VANT deverá ir e voltar ao novo ponto. O tempo manteve-se aproximadamente

constante, como pode ser observado na Tabela 5 e, aparentemente, a distância entre a rota original e o destino adicionado não teve influência no resultado. Resumindo, a estratégia mostrou-se satisfatória quando o ponto destino está próximo do ponto inicial, ou seja, quando o desvio não é tão grande. Entretanto, melhorias seriam necessárias para desvios maiores, além da realização de um estudo mais detalhado para tratar a inclusão de mais de um ponto destino.

5. Considerações Finais

Neste trabalho foram considerados diferentes algoritmos para replanejamento em tempo real para VANT: TD, RRT e PRM. A partir do estudo e implementação de cada algoritmo, foi possível realizar alguns experimentos de forma a avaliar o comportamento de cada método ao aplicá-los em um ambiente de navegação.

Como apresentado nos resultados, o trabalho simplificou o cenário que tratava a inclusão de novos destinos considerando o replanejamento com a adição de um único ponto de destino. Desta forma, uma primeira proposta de trabalho futuro seria realizar estudos que permitam o replanejamento considerando um número maior de destinos. Além disso, com relação aos métodos implementados, algumas modificações poderiam ser implementadas buscando melhorias nos resultados apresentados. Com relação ao RRT, nos trabalhos anteriores que utilizam este método como em Silva *et al.* (2015), o algoritmo foi implementado buscando melhorar o seu desempenho, tanto em relação à qualidade da solução quanto ao tempo computacional. Estas implementações não foram consideradas no trabalho atual e poderão ser utilizadas para verificar alterações nos resultados obtidos até o momento. No caso do PRM, uma possibilidade para melhorar os custos obtidos pelo método seria utilizar *Roadmaps* maiores que, apesar de necessitarem de mais tempo para sua construção e memória para seu armazenamento, poderiam garantir uma maior cobertura da área.

Com estas melhorias implementadas, novos testes computacionais precisariam ser realizados para validar as conclusões apontadas durante o desenvolvimento deste trabalho ou garantir a generalização de algumas destas conclusões. Nestes testes, pode-se considerar também outros ambientes de navegação ou, ainda, outros métodos de resolução.

6. Referências

- Cordeiro, L. S., Pinto, M. J. e Medeiros, F. L. L. (2015). Transformada de Distância aplicada ao planejamento de rotas para VANTs. In: *IV SCTI*, São José dos Campos.
- Goldberg, M. C. e Luna, H. P. L. (2000). *Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos*. Editora Campus, R. J.
- Hart, P. E., Nilsson, N. J. e Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4 (2): 100-107.
- Kavraki, L. E. (1994). *Random networks in configuration space for fast path planning*. Dissertation of the Department of Computer Science, Stanford University.
- LaValle, S. M. (1998). *Rapidly-exploring random trees a new tool for path planning*. Computer Science Dept., Iowa State University.
- Silva, L. M., De Marchi, M. M. e Medeiros, F. L. L. (2015). Planejamento automático de rotas de navegação para VANTs através de árvores aleatórias de rápida exploração e modelos digitais de elevação. In: *XLVII SBPO*, 2015, Porto de Galinhas, PE.
- Zelinsky, A. (1992). A mobile robot navigation exploration algorithm. *IEEE Transactions of Robotics and Automation*, 8, 707-717.
- Zelinsky, A., Jarvis, R. A., Byrne, J.C. e Yuta, S. (1993). Planning paths of complete coverage of an unstructured environment by a mobile robot. In: *International Conference on Advanced Robotics*, 533-538.