

TRANSFORMADA DE DISTÂNCIA APLICADA EM CENÁRIOS DE VIGILÂNCIA AÉREA

Maria José Pinto

Felipe Leonardo Lobo de Medeiros

Mônica Maria De Marchi

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, felipe@ieav.cta.br, monica@ieav.cta.br

RESUMO

Este trabalho utiliza o método Transformada de Distância para gerar rotas para veículos em cenários relacionados à vigilância aérea. Considerando que este método tem como característica o aumento do esforço computacional ao utilizar diferentes pontos destino, serão tratados cenários onde os valores da grade são gerados uma única vez, sem afetar a eficiência do método. Nestes cenários, dado um grupo de veículos posicionados em diferentes pontos da região a ser protegida, a transformada de distância pode ser aplicada considerando, separadamente, cada ponto como sendo um ponto inicial e, desta forma, o veículo posicionado no ponto que gerou o menor caminho será o acionado para realizar a missão. Num cenário de vigilância, a missão poderia estar relacionada à interceptação de um incursor (invasor) no espaço aéreo ou na proteção de uma área sensível.

PALAVRAS CHAVE. Problema de roteamento, Vigilância do espaço aéreo, Transformada de distância.

Logística e Transporte

ABSTRACT

This work uses the Distance Transform method to generate routes for vehicles in aerial surveillance scenarios. Taking into account the characteristic of the method to increase the computational effort to consider different target points, we will treat scenarios where the values of the cells will be done once without affecting its efficiency. In those scenarios, given a positioned vehicle group at different points of the protected area, the Distance Transform can be applied considering separately each of those points as a starting point thus the vehicle positioned at the point that resulted in the shortest path will be chosen to execute the mission. In a surveillance situation, the mission could be related to the interception of an intruder in the airspace or to the defense of a critical area.

KEYWORDS. Routing Problem. Airspace surveillance. Distance Transform method.

Logistic and Transport

1. Introdução

A defesa de um país é essencial para que sejam garantidos os interesses vitais e a segurança da nação, bem como a integridade dos patrimônios nacionais. Desta forma, quando alguma ameaça é detectada ou alguma vulnerabilidade identificada, o uso de metodologias que busquem a minimização dos efeitos destas ameaças ou vulnerabilidades devem ser utilizadas. Buscando esta minimização, este trabalho trata da geração de rotas eficientes para os veículos envolvidos em cenários relacionados à vigilância do espaço aéreo.

A geração de rotas pode ser feita através da aplicação de métodos de busca em grafos como, por exemplo, o algoritmo Dijkstra (Dijkstra, 1959; Goldberg e Luna, 2000) e o algoritmo A* (Hart *et al.*, 1968). Neste trabalho será verificada a possibilidade de utilizar o método Transformada de Distância (Zelinsk, 1992). Este método tem sido bastante estudado na literatura, principalmente em trabalhos relacionados à robótica móvel. Entretanto, como o cálculo da transformada de distância depende da definição *a priori* do ponto destino, o esforço computacional pode aumentar consideravelmente ao serem considerados diferentes pontos destino, pois os valores das células deverão ser recalculados a cada vez que um novo ponto for definido. Esta característica normalmente é citada nos trabalhos da literatura como um fator negativo para utilização deste método para geração de rotas. Entretanto, serão descritos cenários onde o esforço para gerar os valores da grade será feito uma única vez, sem afetar a eficiência do método.

Na próxima seção, apresentamos uma descrição mais detalhada sobre o método Transformada de Distância. Na seção 3, apresentamos alguns dos cenários de aplicação citados juntamente com os resultados dos testes computacionais realizados para verificar a viabilidade de utilizar o método descrito. Na seção 4, algumas considerações finais são apresentadas, juntamente com propostas para trabalhos futuros.

2. Metodologia

O método Transformada de Distância é um método bastante utilizado na literatura na área de robótica, sendo que Jarvis e Byrne (1986) (cf. Zelinsk, 1992) foram os primeiros a utilizar o método para gerar rotas para robôs móveis.

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 ou, de maneira geral, é uma área que não deve ser utilizada para geração da rota. Desta forma, as células livres correspondem as células navegáveis que farão parte da rota. A Figura 1 mostra uma possível malha para uma determinada área a ser explorada, onde as células preenchidas representam as regiões que estão ocupadas pelos obstáculos.

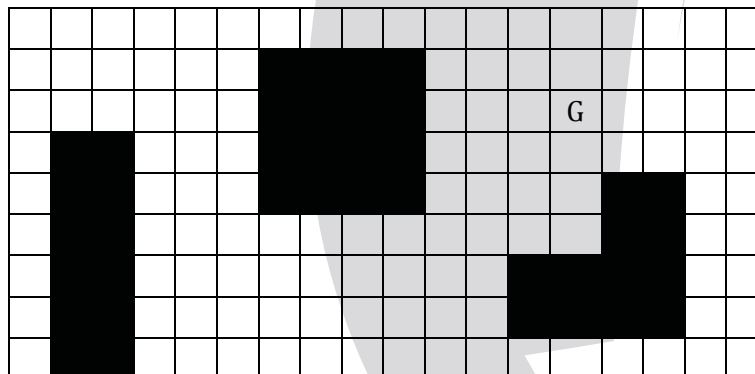


Figura 1. Exemplo ilustrativo.

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:

$$v(i) = \min \{ v(i), v(T) + \text{custo de mover da célula } i \text{ para o vizinho } 1, \\ , v(2) + \text{custo de mover da célula } i \text{ para o vizinho } 2, \\ , v(3) + \text{custo de mover da célula } i \text{ para o vizinho } 3, \\ [\\ , v(T) + \text{custo de mover da célula } i \text{ para o vizinho } T \}$$

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 das células vizinhas podem ser exploradas caso o veículo esteja na célula i . A Figura 2 ilustra diferentes tipos de vizinhança que podem ser considerados.

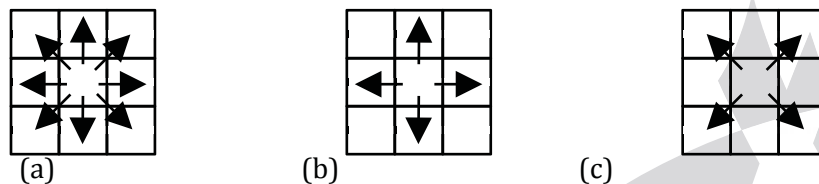


Figura 2. Tipos de vizinhança para uma determinada célula i .

O tipo de vizinhança a ser utilizado pode ser definido de acordo com a aplicação. Se, por exemplo, o objetivo é obter uma rota segura, como no trabalho de Zelinsk *et al.* (1993), de forma a evitar que o veículo encoste nos obstáculos, talvez seja aconselhável utilizar a vizinhança da Figura 2b, onde as diagonais não são consideradas pois, se estivermos na situação ilustrada na Figura 3, permitir que o veículo vá para a posição j pode ser perigoso. Neste tipo de aplicação, a vizinhança da Figura 2a poderia ser utilizada se fosse considerada uma envoltória de segurança em volta dos obstáculos para gerar uma rota segura.

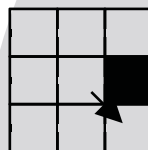


Figura 3. Exemplo onde a vizinhança da Figura 2a pode não gerar rotas seguras.

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, ao tempo gasto ou ao custo gasto pelo veículo com combustível. No caso, a distância é definida de acordo com o tamanho da grade e podem ser utilizadas diferentes métricas como distância euclidiana ou de Manhattan.

Para ilustrar o custo final após a aplicação do método, considere que no exemplo da Figura 1, o custo para mover de uma célula para outra é fixo e unitário, ou seja, que cada célula possui dimensão 1×1 . A Figura 4 mostra o resultado considerando a vizinhança ilustrada na Figura 2a.

1	1	1	1	9	8	7	6	5	4	3	2	2	2	2	2	3	4
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

3. Cenários de aplicação

Da forma como o método foi descrito na seção anterior, o cálculo da transformada de distância depende da definição *a priori* do ponto destino (veja Figura 3). Com isto, o esforço computacional pode aumentar consideravelmente ao considerarmos diferentes pontos destino, pois os valores das células deverão ser recalculados cada vez que um novo ponto G for definido. Entretanto existem aplicações onde o esforço para gerar os valores da grade pode ser feito somente uma vez, sem afetar a eficiência do método.

Como o esforço computacional praticamente não aumenta, ao considerar diferentes pontos iniciais e um mesmo ponto destino, tendo em vista que os valores das células não serão alterados, podemos aplicar a transformada de distância considerando como ponto destino o local onde o veículo que fará a rota se encontra e, como ponto inicial, o ponto onde o veículo precisa chegar para realizar a missão. Em seguida, aplicamos o método da forma como foi descrito anteriormente para gerar a rota. Desta forma, o ponto onde o veículo precisa chegar (que agora é o ponto inicial) pode ser alterado de forma que o esforço computacional para gerar novas rotas não será significativo. Uma alteração no método somente deverá ser feita se o acesso entre as células não for não-direcionado, ou seja, o caminho de ir de um ponto inicial até um ponto destino não for equivalente a fazer o caminho contrário. Nestes casos, uma solução seria buscar pela célula vizinha livre de maior valor v , no momento de gerar a rota.

Com os valores da grade definidos, a transformada de distância, como descrita anteriormente, poderia ser utilizada quando existe mais de 1 veículo para realizar uma determinada rota e deseja-se definir qual veículo deverá chegar ao ponto destino. Considerando que os veículos estão posicionados em N diferentes pontos dentro da região, a transformada de distância pode ser aplicada considerando, separadamente, cada um dos N pontos como sendo um ponto inicial. Determinado o caminho gerado para cada um dos N pontos, calcula-se a distância percorrida e, o veículo posicionado no ponto que gerou o menor caminho (menor distância), será o acionado para realizar a missão. Caso mais de um veículo esteja a uma mesma distância do ponto destino, podem ser definidos critérios de desempate levando em consideração, por exemplo, as características de cada veículo.

Existem cenários relacionados à vigilância aérea onde estas ideias podem ser aplicadas. Considere a situação onde é identificada uma incursão inimiga dentro do espaço aéreo. Neste trabalho, vamos apresentar cenários considerando tanto a visão da defesa do espaço aéreo quanto do incursor. A defesa deve ser capaz de avaliar a ameaça que a incursão representa e definir o planejamento referente a alocação dos meios de defesa visando minimizar o impacto das ações hostis. Neste caso, uma primeira ação seria definir missões de interceptação da aeronave incursora e, caso existam áreas sensíveis ameaçadas, buscar formas para garantir a integridade destas áreas. Do ponto de visto do incursor, o objetivo será cumprir alguma missão específica a qual ele foi designado como, por exemplo, destruir uma área sensível dentro da região.

Alguns resultados serão apresentados para ilustrar cada um dos cenários, considerando a região apresentada na Figura 6, onde a cobertura radar da região é apresentada. A altitude foi considerada de forma a gerar áreas de vulnerabilidade (sem cobertura radar), buscando ilustrar a visão do incursor, cujo objetivo é minimizar a probabilidade de ser detectado pelos radares ao realizar uma invasão no espaço aéreo de um país.

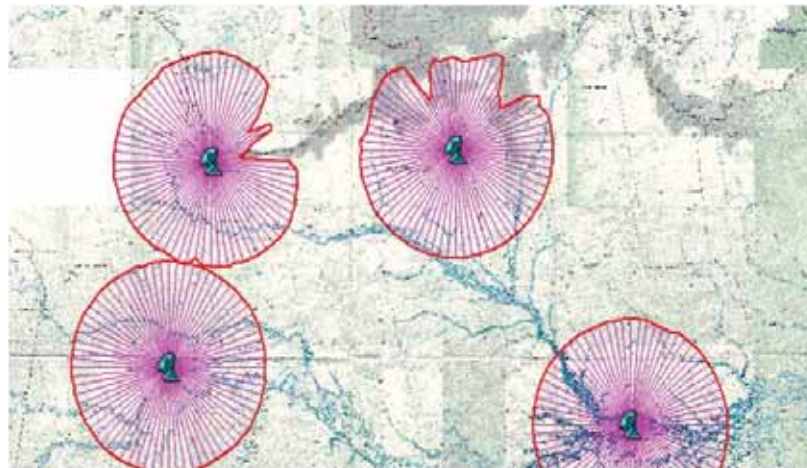


Figura 6. Região a ser considerada para ilustrar os cenários.

As áreas de visibilidade (envoltórias) dos radares foram geradas através do *plug-in* PDA (Planejamento de Defesa Aeroespacial) da Plataforma AEROGRAF (Petersen *et al.*, 2008). Entre outras funcionalidades, o PDA gera a área de visibilidade, dada uma determinada altitude, considerando as características dos radares e as limitações impostas pelo relevo do terreno, através do MNE (Modelo Numérico de Elevação).

Para utilizar o método Transformada de Distância, geramos uma grade na região (Figura 7). Em seguida, consideramos como obstáculos algumas elevações do terreno da região (Figura 8). E, do ponto de vista do incursor, ainda consideramos como obstáculos as áreas protegidas pelos radares, tendo em vista que estas áreas não seriam consideradas áreas livres (Figura 9).

Nos resultados que serão apresentados a seguir, consideramos que células parcialmente ocupadas pelos obstáculos são áreas totalmente ocupadas. Com isto, consideramos a vizinhança ilustrada na Figura 2a, ou seja, caso não sejam células ocupadas, teremos 8 possibilidades de navegação.

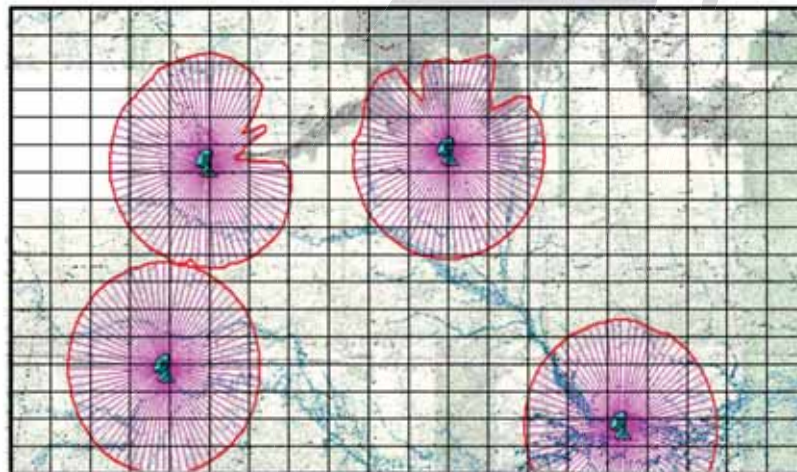


Figura 7. Grade da região.

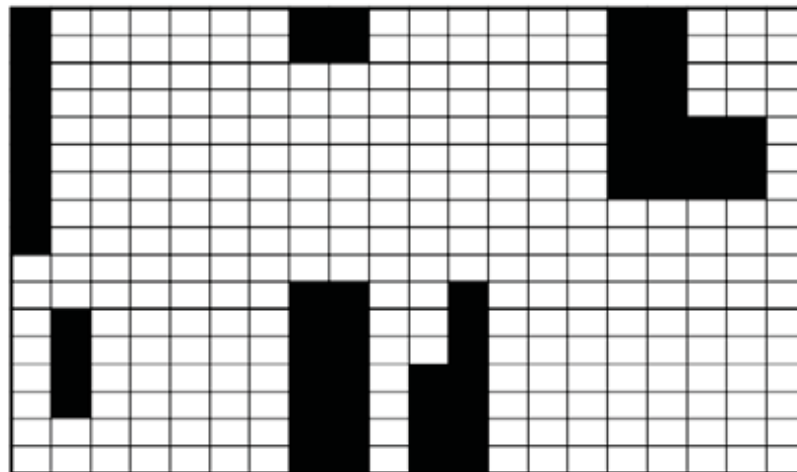


Figura 8. Grade da região com os obstáculos resultantes da elevação do terreno.

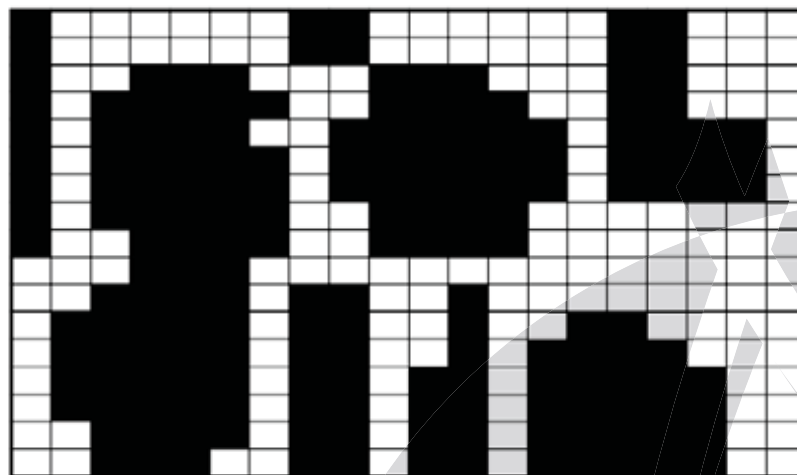


Figura 9. Grade da região considerando também os radares como obstáculos.

3.1 Intercepção de aeronaves

Para definir missões de intercepção da aeronave incursora, primeiramente deve-se definir quais meios de defesa, no caso, quais aeronaves de intercepção, serão alocadas para realizar a missão e, em seguida, a rota que estas aeronaves deverão seguir para interceptar o incursor.

Para alocar os meios de defesa, vamos aplicar a transformada de distância na grade da Figura 8 pois as aeronaves de intercepção não precisam evitar os radares de vigilância, ou seja, eles não precisam ser considerados como obstáculos. Primeiramente, o provável ponto onde a aeronave incursora se encontra é considerado o ponto destino. Definido o ponto destino, os valores da grade são gerados da mesma forma como descrito na Figura 3. Em seguida, considerando que existem 5 aeronaves de intercepção, definimos o local onde elas estão posicionadas como sendo os pontos iniciais (S1, S2, ..., S5) ilustrados na Figura 10.

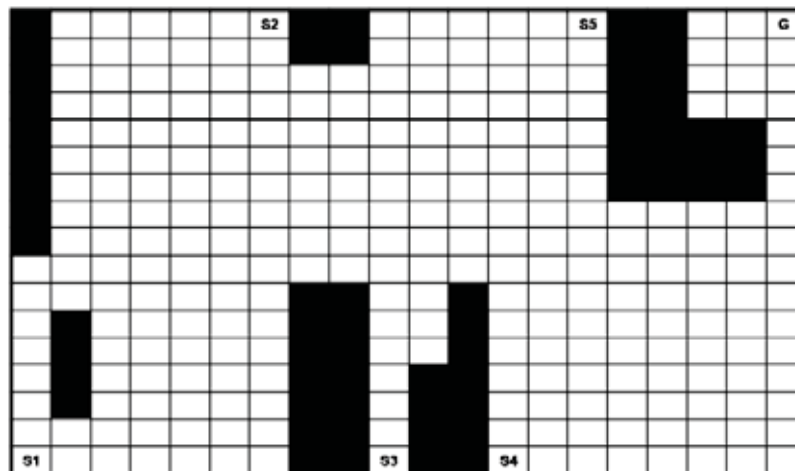


Figura 10. Localização dos pontos iniciais e do ponto destino.

Em seguida, o caminho gerado para cada um dos 5 pontos é determinado e a distância percorrida calculada. Nos resultados apresentados a seguir, quando ocorre empate na busca pela célula livre de menor valor consideramos o segundo critério de desempate, ou seja, escolhemos o vizinho mais próximo do ponto destino, usando distância euclidiana. A Tabela 1 mostra o resultado obtido, onde é possível ver que a aeronave posicionada no ponto S4 deverá ser alocada para realizar a missão, pois chegará mais rápido ao ponto destino.

Tabela 1. Distância percorrida para cada ponto inicial.

	<i>Distância</i>
S1	33,3
S2	25,4
S3	25,6
S4	20,6
S5	22,0

A rota gerada é ilustrada na Figura 11. Este resultado pode parecer esperado mas, dependendo do tamanho do problema e de suas características, obter esta resposta de forma rápida e precisa pode ser fundamental num cenário de defesa.

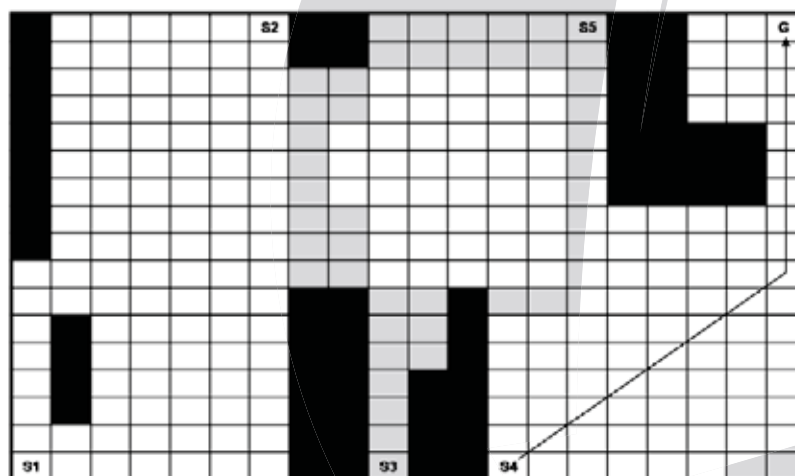


Figura 11. Rota gerada para a aeronave de interceptação até o incursor.

3.2 Proteção de áreas sensíveis

Quando um incursor é identificado dentro do espaço aéreo e existem áreas sensíveis (pontes, radares, centros de comando e controle, etc) dentro da região que podem estar sob ameaça, uma das ações da defesa consiste em definir quais meios de defesa (aéreos ou, até mesmo, terrestres) seriam acionados para garantir a integridade destas áreas sensíveis.

Uma primeira opção seria alocar os meios que estão mais próximos das áreas sensíveis. Desta forma, a ideia utilizada no cenário anterior para definir quais aeronaves de interceptação seriam acionadas pode ser também utilizada aqui. Neste caso, os meios de defesa seriam posicionados nos N pontos e, ao invés de considerar o ponto destino como sendo a provável localização do incursor, a área sensível seria considerada como destino. Assim, os meios de defesa mais próximos daquela área sensível seriam os acionados para realizar a sua proteção.

3.3 Destruição de áreas sensíveis

Neste cenário, vamos considerar a visão do incursor e, neste caso, como comentado anteriormente, quando este entra no espaço aéreo de um país, seu primeiro objetivo é não ser identificado pelos radares e, uma possibilidade, seria voar a uma altitude onde a cobertura radar não é total e contém áreas de vulnerabilidades. Desta forma, a grade ilustrada na Figura 9 será utilizada para mostrar a solução obtida pois o incursor deve levar em consideração todos os obstáculos mostrados nesta figura para gerar sua rota até a área sensível.

Neste cenário, vamos considerar que a área sensível é o ponto destino e o ponto inicial se refere ao incursor. Com isto, a Transformada de Distância tradicional pode ser aplicada para definição da rota. O resultado está apresentado na Figura 12.

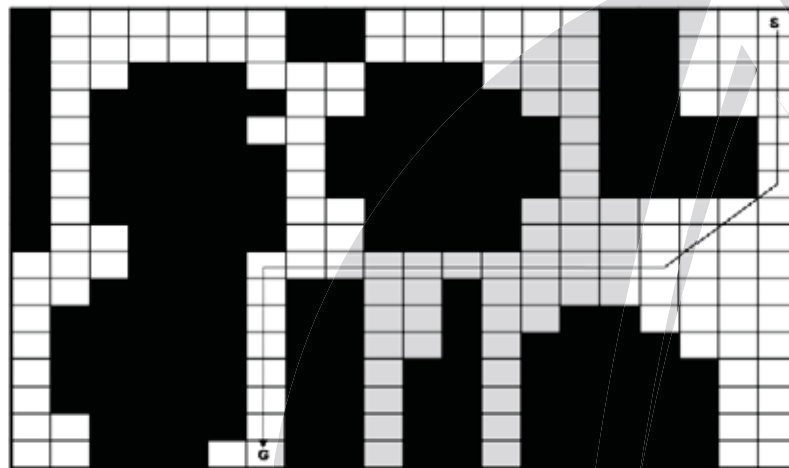


Figura 12. Caminho gerado pela transformada de distância.

Uma outra possibilidade de utilizar a Transformada de Distância como descrita aqui e ainda considerando este cenário consiste em, dado um conjunto de áreas sensíveis que poderiam ser alvos para a aeronave incursora, definir qual seria a escolhida. Neste caso, a localização das áreas sensíveis seriam as posições iniciais e o local onde o incursor entra no espaço aéreo da região, o destino.

Observe que buscar esta visão do incursor pode também ser interessante do ponto de vista da defesa, pois ao utilizar a metodologia apresentada para prever possíveis rotas do incursor e possíveis alvos, o resultado poderá auxiliar no planejamento de defesa das áreas sensíveis e para interceptação das aeronaves incursoras.

4. Considerações Finais

Neste trabalho, apresentamos alguns cenários relacionados à vigilância aérea onde o método Transformada de Distância foi aplicado. Este método consiste em gerar uma rota

eficiente saindo de um ponto inicial a um ponto destino com o objetivo de otimizar um determinado critério como, por exemplo, a distância percorrida. A forma como o método é construído pode resultar num aumento do esforço computacional ao utilizar diferentes pontos destino. Nos cenários apresentados, os valores da grade foram gerados uma única vez, de forma a não afetar a eficiência do método.

Sendo um estudo preliminar, foram realizados testes computacionais que, apesar de limitados, mostraram-se promissores. Futuramente, outros testes computacionais serão realizados com o objetivo de comparar os resultados obtidos com os de algoritmos tradicionalmente utilizados para geração de rotas como, por exemplo, o algoritmo Dijkstra (Dijkstra, 1959; Goldberg e Luna, 2000).

Ressalta-se que a ideia apresentada neste trabalho somente é válida caso não exista nenhuma alteração na configuração da malha durante o tempo de realização da rota como ocorre em ambientes dinâmicos ou quando uma área não é conhecida *a priori*.

Referências

- Chin, Y. T., Wang, H., Tay, L. P., Wang, H. e Soh, W. Y. C.** (2001), Vision guided AGV using distance transform, *XXXII International Symposium on Robotics*. Disponível em: <http://www.ntu.edu.sg/home/hw/isr2001.pdf>.
- Dijkstra, E. W.** (1959), A note on two problems in connection with graphs, *Numerische Mathematik*, 1, 269–271.
- Goldberg, M. C. e Luna, H. P. L.**, *Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos*, Editora Campus, R. J, 2000.
- Hart, P. E., Nilsson, N. J. e Raphael, B.** (1968), A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths, *IEEE Transaction System Science and Cybernetics*, 4, 100–107.
- Petersen Júnior, F., Aquino, M. R. C. e Salles, R. N.** (2008), Plataforma AEROGRAF: um SIG voltado para a Força Aérea, *Spectrum (Revista do Comando-Geral de Operações Aéreas)*, 11, 26-28.
- 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, *International Conference on Advanced Robotics*.