

# Planejamento Dinâmico de Rotas para VANTs em Patrulha Naval

Luiz Henrique Souza Caldas<sup>1</sup>, Daniel Ratton Figueiredo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Programa de Engenharia de Sistemas e Computação (PESC)  
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE)  
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

lhscaldas@cos.ufrj.br, daniel@cos.ufrj.br

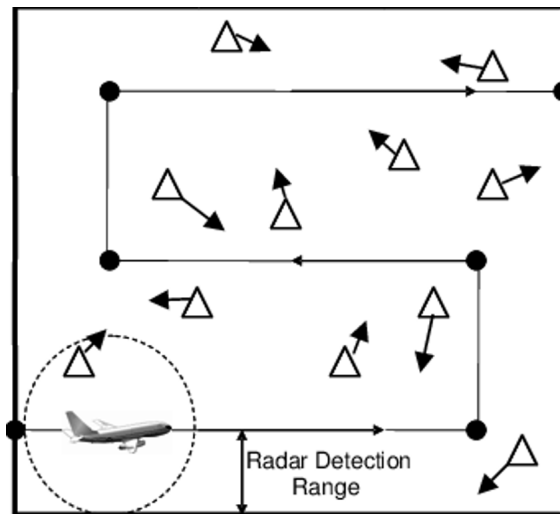
**Resumo.** *Este trabalho apresenta uma abordagem de planejamento dinâmico de rotas para VANTs em patrulhas navais, considerando a detecção progressiva de alvos ao longo da missão. São comparadas três políticas de navegação: passiva, com rota fixa; greed, que prioriza alvos próximos; e Simulated Annealing, que utiliza amostragem estocástica para otimizar a ordem de visita. As simulações, conduzidas em ambiente modular com geração aleatória de navios, avaliam métricas como distância percorrida, taxa de detecção e tempo de execução. Os resultados mostram que, embora a política Simulated Annealing obtenha melhor desempenho com poucos navios, a greed é mais eficiente computacionalmente e mais adequada para replanejamentos em tempo real.*

## 1. Introdução

O uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) em operações de vigilância marítima tem se expandido significativamente, impulsionado por desafios associados à extensão da costa brasileira e à importância estratégica de suas águas jurisdicionais, que concentram a maior parte do comércio exterior e das reservas nacionais de petróleo e gás natural [Andrade et al. 2021]. Esses cenários exigem métodos eficientes de planejamento de rotas, sobretudo quando os alvos são parcialmente conhecidos e os sensores têm capacidades limitadas.

A tarefa pode ser modelada como uma variação do Problema do Caixeiro Viajante (TSP), incorporando restrições operacionais como autonomia limitada, sensores de diferentes alcances e alvos móveis ou parcialmente observáveis [Marlow et al. 2007]. Técnicas como o *Simulated Annealing* têm mostrado bom desempenho em problemas de roteamento com múltiplos mínimos locais, sendo úteis para o replanejamento dinâmico [Kosmas and Vlachos 2012]. Abordagens mais recentes propõem replanejamento em tempo real com base em dados sensoriais para garantir cobertura progressiva de alvos não detectados [Penicka et al. 2017].

Este trabalho propõe uma abordagem baseada em TSP adaptado para patrulha marítima com inserção progressiva de novos alvos detectados durante a missão, respeitando as limitações operacionais do VANT e explorando estratégias de navegação dinâmicas.



**Figura 1. Patrulha naval realizada por aeronave.**  
**Fonte:** [Marlow et al. 2007].

## 2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para o planejamento dinâmico de rotas de VANTs em missões de vigilância marítima, considerando a detecção progressiva de alvos ao longo do percurso. A proposta visa adaptar o Problema do Caixeiro Viajante (TSP) a um contexto em que novos pontos de interesse são identificados durante a missão. A solução deve permitir o replanejamento eficiente da rota, de forma a maximizar a inspeção de alvos relevantes, respeitando os limites de autonomia da aeronave.

## 3. Metodologia

A abordagem proposta consiste em simular missões de vigilância marítima com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) que percorrem rotas pré-definidas compostas por linhas paralelas, geradas a partir de parâmetros como ponto inicial, largura da área, espaçamento entre linhas e número de passagens.

Durante o voo, o VANT utiliza dois sensores: um radar com alcance de 50 milhas náuticas (MN), que detecta navios, e uma câmera de inspeção visual com alcance de 20 MN, que confirma sua identificação. Um navio detectado pelo radar tem seu estado atualizado para “detectado”, e se estiver ao alcance da câmera, passa a ser “inspecionado”.

A cada passo da missão, o VANT atualiza sua rota com base em uma das seguintes políticas de decisão:

- **Política passiva:** mantém a rota original, inspecionando apenas os navios que entram no alcance da câmera sem alterar o trajeto.
- **Política *greedy*:** reordena dinamicamente os waypoints restantes e os navios detectados, priorizando os mais próximos da posição atual do VANT.
- **Política *simulated annealing*:** aplica uma técnica estocástica baseada em *Markov Chain Monte Carlo (MCMC)* para buscar uma sequência de visita aos waypoints restantes e aos navios detectados mais eficiente em termos de distância.

O algoritmo de *Simulated Annealing* inicia com uma permutação aleatória dos navios detectados e waypoints remanescentes. Em cada iteração, uma nova rota é gerada invertendo a ordem de um subintervalo da rota atual, escolhendo dois pontos da rota atual de forma uniforme e invertendo a ordem dos pontos entre eles. O espaço de soluções é representado por um grafo conexo, onde vértices são permutações possíveis e arestas conectam soluções que diferem por uma inversão, formando uma cadeia de Markov irreduzível, aperiódica e simétrica.

A nova rota  $s'$  é aceita se sua distância total  $f(s')$  for menor que a atual  $f(s)$ ; caso contrário, ainda pode ser aceita com probabilidade  $e^{-\frac{f(s')-f(s)}{T}}$ , onde  $T$  é a temperatura. Esse mecanismo permite explorar soluções subótimas no início do processo, ajudando a escapar de mínimos locais.

A temperatura  $T$  decresce exponencialmente segundo  $T = T_0 \cdot \beta^i$ , com  $T_0$  como temperatura inicial,  $\beta$  como fator de decaimento ( $0 < \beta < 1$ ) e  $i$  representando o ciclo de temperatura. A cada ciclo de temperatura  $i$ , são realizadas  $N$  perturbações, salvando-se a melhor rota encontrada até então. O algoritmo retorna a melhor solução global observada, não necessariamente a última.

Assume-se que os navios estejam estáticos durante a simulação, dada a alta velocidade do VANT. A missão termina quando a autonomia é atingida ou não restam destinos a visitar. Dados como número de alvos detectados e inspecionados, distância percorrida e tempo de execução são registrados ao final da simulação.

## 4. Resultados

Nesta seção, comparam-se as políticas de navegação passiva, *greedy* e *simulated annealing*, com base em simulações onde o VANT percorre uma trajetória sistemática sobre a área de interesse (AI), sendo redirecionado conforme a política adotada e os alvos detectados.

### 4.1. Valores de Entrada

As simulações consideram os seguintes parâmetros:

- Área de interesse:  $300 \times 300$  MN
- Velocidade do VANT: 300 nós
- Alcance dos sensores: radar (50 MN), câmera (20 MN)
- Autonomia do VANT: 2400 MN
- Quantidade de navios: 10 a 200 (incrementos de 25)
- Distribuição dos navios: aleatória e estática

Parâmetros específicos do *Simulated Annealing*:

- $T_0 = 10.0$ ,  $T_{\min} = 10^{-4}$
- Fator de resfriamento:  $\beta = 0.90$
- Iterações por ciclo:  $N = 50$

Cada cenário é repetido 100 vezes para as 3 políticas e 9 níveis de densidade, totalizando 2700 simulações. Os resultados são apresentados como médias, em valores absolutos (ex: distância e tempo) ou percentuais (ex: taxa de detecção/inspeção), conforme o caso.

## 4.2. Ambiente de Simulação

A simulação foi implementada com dois módulos principais: *AmbienteMaritimo*, que gera o cenário e os navios aleatoriamente, e *VANT*, que modela a trajetória, sensores e política de navegação da aeronave. Essa separação facilita a manutenção e extensibilidade do sistema.

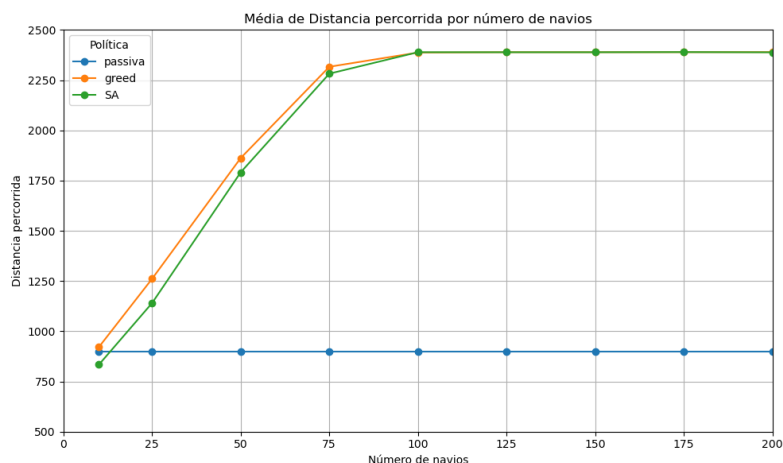
A cada passo, o *VANT* realiza duas ações: movimenta-se em direção ao próximo ponto definido pela política de navegação (respeitando sua velocidade e autonomia), e executa a varredura sensorial. Se o deslocamento previsto exceder a autonomia restante, a simulação é encerrada.

Em seguida, o *VANT* verifica a presença de navios nos raios do radar (50 MN) e da câmera (20 MN). O estado de um navio é atualizado de *nao detectado* para *detectado* ao entrar no alcance do radar, e para *inspecionado* quando também estiver ao alcance da câmera.

A política de navegação define como os pontos (navios detectados e waypoints remanescentes) são ordenados. A política *passiva* segue a rota fixa; a *greed* prioriza os pontos mais próximos; e a *Simulated Annealing* aplica uma metaheurística para minimizar a distância total. A política é avaliada dinamicamente, permitindo que o *VANT* ajuste sua rota conforme novos alvos são descobertos.

## 4.3. Distância Percorrida

A Figura 2 mostra a média da distância total percorrida pelo *VANT* conforme a política de navegação e a quantidade de navios. A política *passiva* mantém uma trajetória fixa, enquanto *greed* e *Simulated Annealing* aumentam a distância percorrida à medida que mais navios são introduzidos.

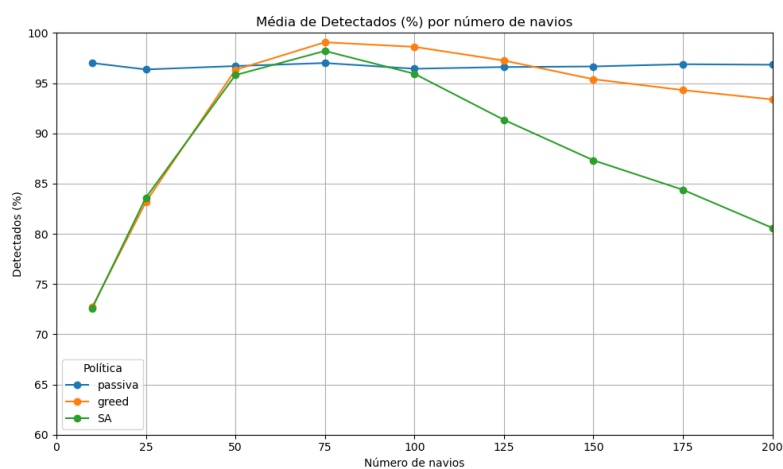


**Figura 2. Média da distância percorrida por política e quantidade de navios.**

A partir de 100 navios, ambas as políticas ativas atingem o limite de autonomia do *VANT*. Antes disso, *Simulated Annealing* apresenta menor distância média que *greed*, indicando trajetórias mais eficientes.

#### 4.4. Detecção de Navios

A Figura 3 apresenta a média percentual de navios detectados ao longo da missão, considerando aqueles identificados pelo radar ao menos uma vez. A política *passiva* mantém uma taxa de detecção quase constante e, na maioria dos cenários, superior às demais, exceto entre 50 e 125 navios, onde há um cruzamento temporário de desempenho.

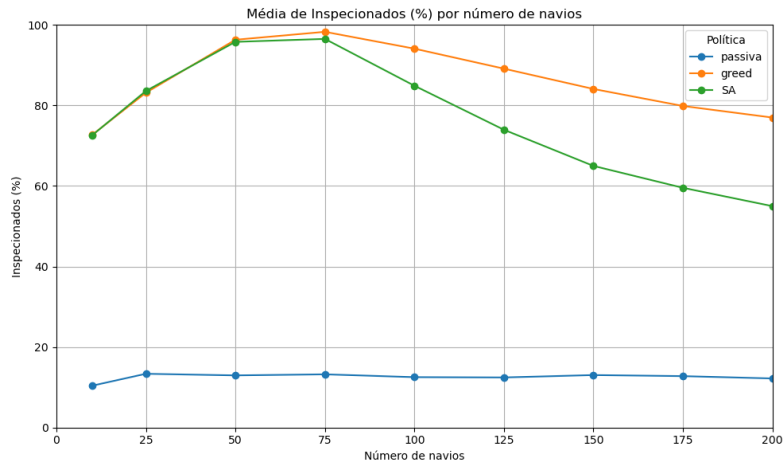


**Figura 3. Média percentual de navios detectados por política e quantidade de navios.**

Esse desempenho da política *passiva* se deve ao fato de ela cobrir toda a área de interesse, maximizando as chances de detecção por radar. Já *greed* e *Simulated Annealing* têm desempenho similar até 75 navios, mas em cenários mais densos a *greed* tende a detectar mais. A queda geral de desempenho dessas políticas a partir de 100 navios está ligada à limitação de autonomia do VANT, conforme indicado na Figura 2.

#### 4.5. Inspeção de Navios

A Figura 4 mostra a média percentual de navios inspecionados em função da quantidade de navios no cenário. A política *passiva* apresenta taxas significativamente inferiores às de *greed* e *Simulated Annealing*, como esperado, por não desviar da rota para confirmar alvos detectados.

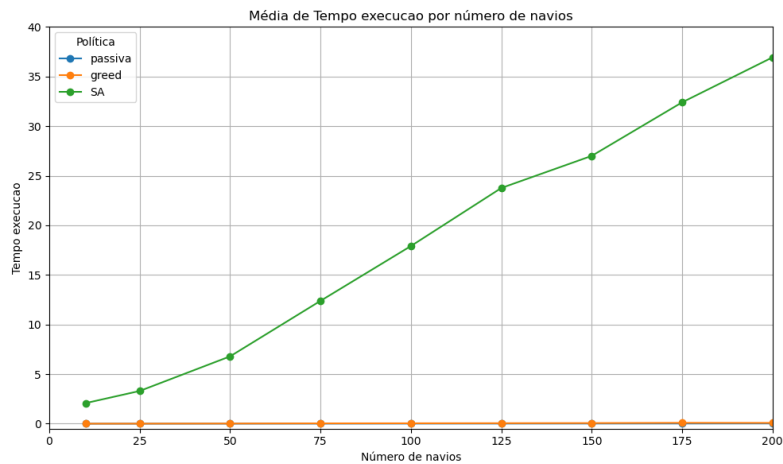


**Figura 4. Média percentual de navios inspeccionados por política e quantidade de navios.**

As políticas ativas têm desempenho semelhante até 75 navios. Em cenários mais densos, *greed* tende a inspeccionar mais. A queda nas taxas médias deve-se à limitação de autonomia do VANT, que encerra a missão antes de visitar todos os alvos.

#### 4.6. Tempo de Execução

A Figura 5 mostra o tempo médio de execução das simulações para cada política, em função do número de navios no cenário. A política *Simulated Annealing* apresenta tempo crescente, enquanto *passiva* e *greed* mantêm tempos quase constantes e significativamente menores.



**Figura 5. Tempo médio de execução da simulação por política e quantidade de navios.**

O tempo da política *Simulated Annealing* cresce linearmente com o número de navios, pois a cada iteração (controlada por  $T_0$ ,  $T_{\min}$ ,  $\beta$  e número de perturbações), calcula-se o custo da rota com complexidade  $O(n)$ , onde  $n$  é o total de pontos a visitar.

A política *greed* também cresce linearmente, pois em cada passo calcula distâncias ( $O(n)$ ) e ordena os candidatos ( $O(n \log n)$ ). No entanto, os tempos absolutos são muito menores (entre 0,01 e 0,09 segundos), o que faz o gráfico aparentar comportamento constante.

#### 4.7. Comparação Visual das Trajetórias

A Figura 6 mostra os resultados das simulações com 50 navios para as três políticas de navegação. Cada subfigura exibe os waypoints paralelos, a trajetória real do VANT e os navios inspecionados, ilustrando como cada política ajusta o percurso durante o voo.

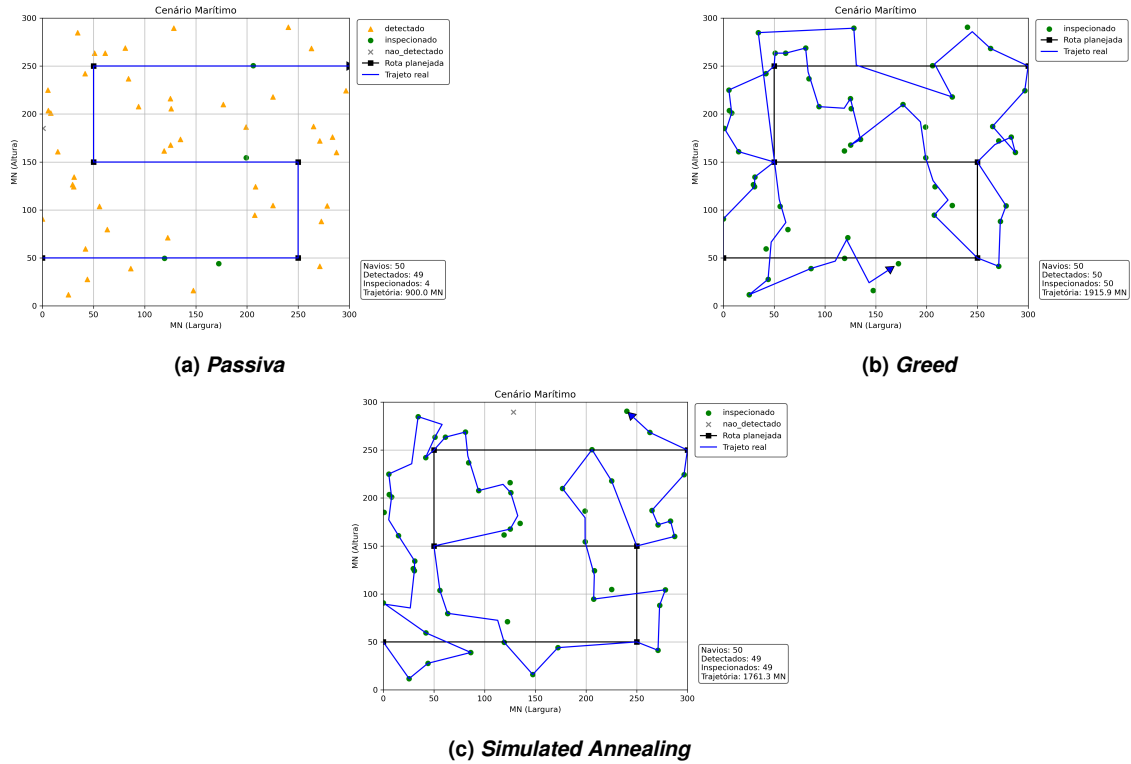


Figura 6. Trajetória do VANT para as três políticas de navegação (50 navios).

Na política *passiva*, o VANT segue rigorosamente a rota de referência. Na *greed*, ele desvia para inspecionar os alvos mais próximos, resultando em uma trajetória mais adaptativa, porém com sobreposição de caminhos. Já na *Simulated Annealing*, a rota também é ajustada, mas de forma mais otimizada, minimizando a distância e evitando cruzamentos. Isso indica maior eficiência da política estocástica em termos de percurso.

## 5. Conclusão

Este trabalho apresentou uma abordagem de planejamento dinâmico de rotas para VANTs em patrulhas navais, com inserção progressiva de alvos detectados durante o voo. Foram comparadas três políticas de navegação: *passiva* (rota fixa), *greed* (priorização por proximidade) e *Simulated Annealing* (otimização estocástica da sequência de visita). As simulações avaliaram diferentes densidades de navios, considerando métricas como distância percorrida, cobertura e tempo de execução.

A política *greed* obteve melhor desempenho geral, especialmente em cenários com mais de 75 navios, combinando bons resultados com baixo custo computacional. Já o *Simulated Annealing* mostrou vantagens em cenários menos densos. Em ambientes mais carregados, a limitação de autonomia do VANT reduziu a eficácia das estratégias ativas.

Como trabalhos futuros, propõe-se: (i) incorporar dinâmica realista do VANT, com restrições de manobra e aceleração; (ii) permitir movimento dos navios; (iii) paralelizar simulação e otimização para replanejamento em tempo real; (iv) investigar funções de custo mais elaboradas, que levem em consideração a exploração do ambiente. Tais avanços podem tornar a abordagem mais aplicável a cenários operacionais reais.

## Referências

- Andrade, I. d. O., Rocha, A. J. R. d., and Franco, L. G. A. (2021). Blue amazon management system (sisgaaz): Sovereignty, surveillance and defense of the brazilian jurisdictional waters. Discussion Paper 261, Institute for Applied Economic Research (Ipea), Brasília.
- Kosmas, O. and Vlachos, D. (2012). Simulated annealing for optimal ship routing. *Computers & Operations Research*, 39(3):576–581.
- Marlow, D., Kilby, P., and Mercer, G. (2007). The travelling salesman problem in maritime surveillance: Techniques, algorithms and analysis. *Defence Science and Technology Organisation (DSTO), Australia*.
- Penicka, R., Saska, M., Reymann, C., and Lacroix, S. (2017). Reactive dubins traveling salesman problem for replanning of information gathering by uavs. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 1433–1440. IEEE.