



FORÇA AÉREA BRASILEIRA
Asas que protegem o País



SIGE 2025

SIMPÓSIO DE APLICAÇÕES OPERACIONAIS EM ÁREAS DE DEFESA

Algoritmo Distribuído para Enxame de Drones Defensivos de Pequeno Porte Baseado em Planejamento

Lucas Silva **Lima** (ITA)

Dr. João Paulo de Andrade **Dantas** (IEAv)

Dr. Paulo Marcelo **Tasinaffo** (ITA)

REALIZAÇÃO



APOIO



PATROCÍNIO



ROTEIRO

1. Introdução

- ☐ Contextualização
- ☐ Definição do problema
- ☐ Proposta de solução
- ☐ Delimitação de escopo

2. Metodologia

- ☐ Simulador *DroneSwarm2D*
- ☐ Algoritmos de Defesa
- ☐ Modelagem de Ameaças
- ☐ Táticas Comparadas e Métricas de Avaliação

3. Resultados

4. Próximos Passos

5. Referências

INTRODUÇÃO

Contextualização: Emprego de drones de pequeno porte em conflitos armados



Figura 1: Drone de pequeno porte operando em ambiente urbano durante missão ofensiva.

Contextualização: Emprego de drones de pequeno porte em conflitos armados

- ☐ Proliferação massiva: Mais de 80 países utilizam drones de pequeno porte para fins militares

- ☐ Democratização tecnológica:
 - Custos reduzidos de fabricação
 - Sensores miniaturizados
 - Algoritmos de navegação acessíveis

- ☐ Fácil construção: Adaptação de plataformas comerciais para fins hostis

Enxame de Drones



Figura 2: Uso massivo de drones de pequeno porte.

Limitações da Defesa Atual para esse novo desafio

- ☐ Míssil (US\$ 100k+) vs. Drone comercial (US\$ 500)
- ☐ Arquiteturas centralizadas: Pontos únicos de falha
- ☐ Estoques limitados vs. ataques em massa

***Sukhoi Su-57* (US\$ 34.4 M) destruído por drone de pequeno porte e baixo custo (10/06/24)**



Figura 3: Imagem satélite pré e pós-ataque realizado por drone de pequeno porte à aeronave militar.

Definição do problema

☐ Uma nova era de ameaças aéreas:

“A democratização da tecnologia de drones transformou pequenas aeronaves em armas acessíveis e letais”

COMO DEFENDER ÁREAS CRÍTICAS CONTRA ATAQUES DE ENXAMES DE
DRONE DE PEQUENO PORTE COORDENADOS?

PROPOSTA DE SOLUÇÃO

Proposta: Defesa Autônoma e Distribuída usando o mesmo tipo de vetor

Conceito Central: Enxame de drones defensivos autônomos operando em rede ad hoc descentralizada

- ☐ Sem comando central: Eliminação de pontos únicos de falha
- ☐ Coordenação emergente: Comportamento coletivo através de regras locais
- ☐ Tomada de decisão distribuída: Cada agente decide com base em informações parciais

Vantagens Esperadas: Maior resiliência, escalabilidade e custo-efetividade

Escopo do Trabalho

Foco da Pesquisa:

- ☐ Camada de aplicação (OSI): Algoritmos de coordenação e diretor de navegação
- ☐ Simulação 2D: *DroneSwarm2D*
- ☐ Planejamento clássico: Comportamento determinístico
- ☐ Comunicação idealizada: Troca de mensagens em raio fixo
- ☐ Tratamento de Falhas: Perdas de mensagens, falha de sensor, bipartição de rede, etc

Não Abordado: Aspectos de *hardware*, protocolos de rede de baixo nível, segurança criptográfica e artefato bélicos destinados a neutralização de drones de pequeno porte

METODOLOGIA

Simulador *DroneSwarm2D*

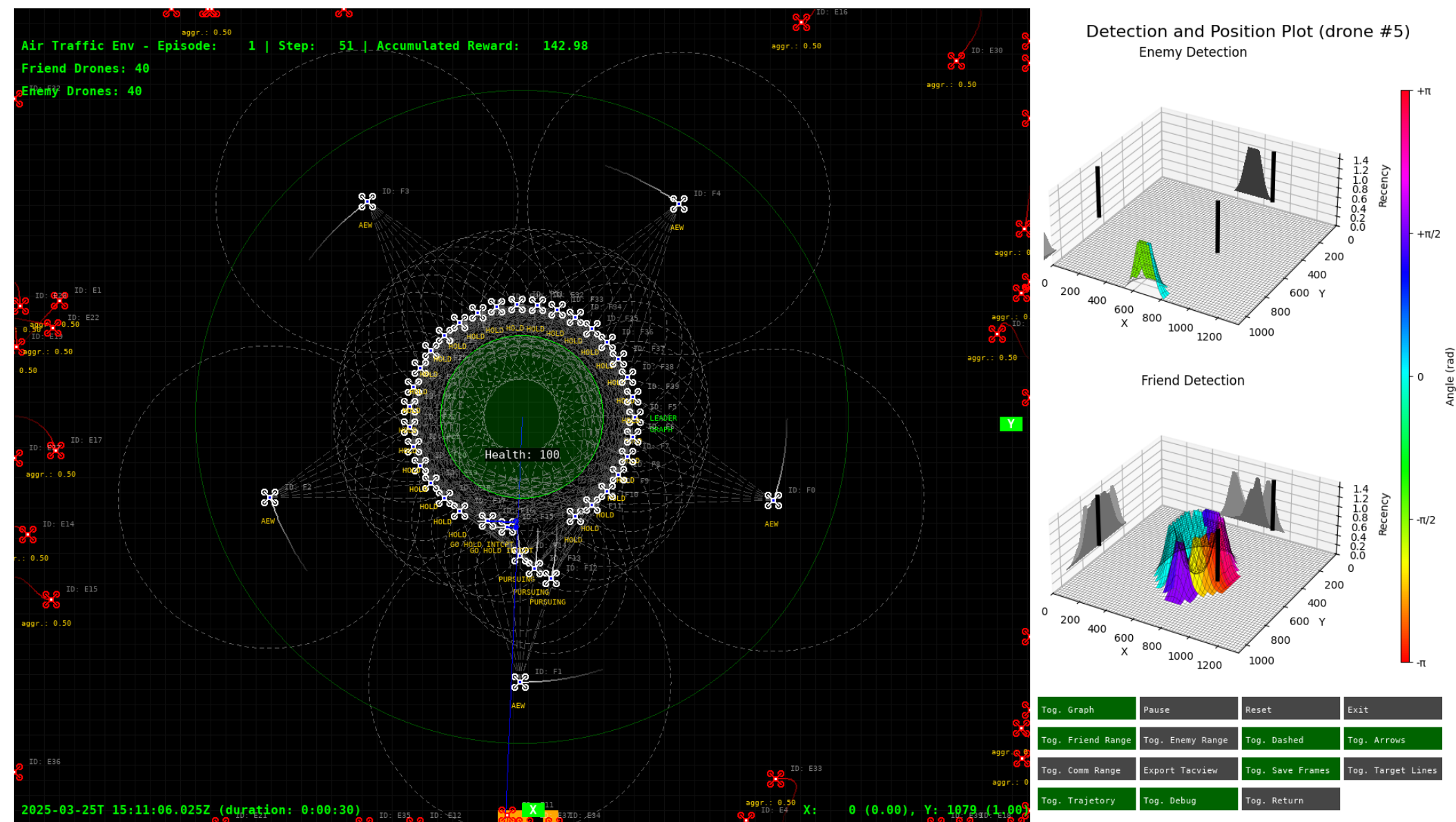


Figura 4: Interface principal do simulador.

Características:

- ☐ Linguagem: *Python*
- ☐ Visualização: tempo real
- ☐ Extensível: *Env. RL*

Interface:

- ☐ Simulação: drones e ambiente
- ☐ Estados: representação interna dos agentes

Simulador *DroneSwarm2D*

Conceito central: Drones possuem visão restrita do ambiente e sensor somente de avistamento (direção)

Três Componentes:

- ☐ Matriz de Recência: Atualidade $[0,1]$ por região
- ☐ Matriz de Direção: Vetores de movimento observados
- ☐ Posição Própria: Referência para integração

Mecanismos:

- ☐ Decaimento exponencial
- ☐ Junção seletiva de informações
- ☐ Validação por coerência

Simulador *DroneSwarm2D*

Matriz de Recência e direção: Representação vetorial que condensa informação de quão recente foi uma detecção, onde e com qual direção (conhecimento que emerge da rede distribuída)

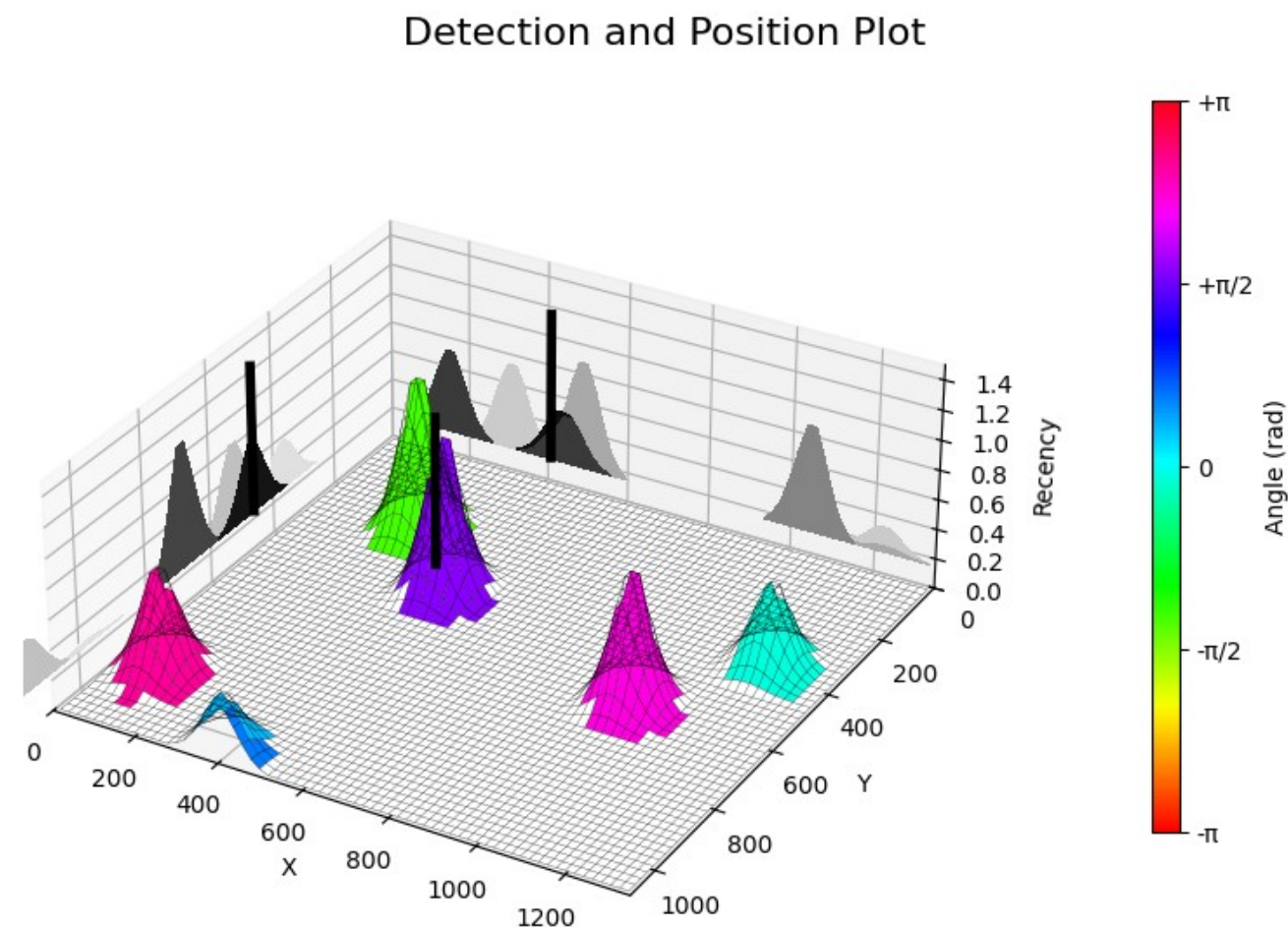


Figura 5: Representação interna de drone defensivo: matriz de recência e direção.

Simulador *DroneSwarm2D*

Junção de estados: Processo de fusão de estados internos entre drones por comunicação *ad hoc*

Exemplo de junção de matrizes de recência e direção

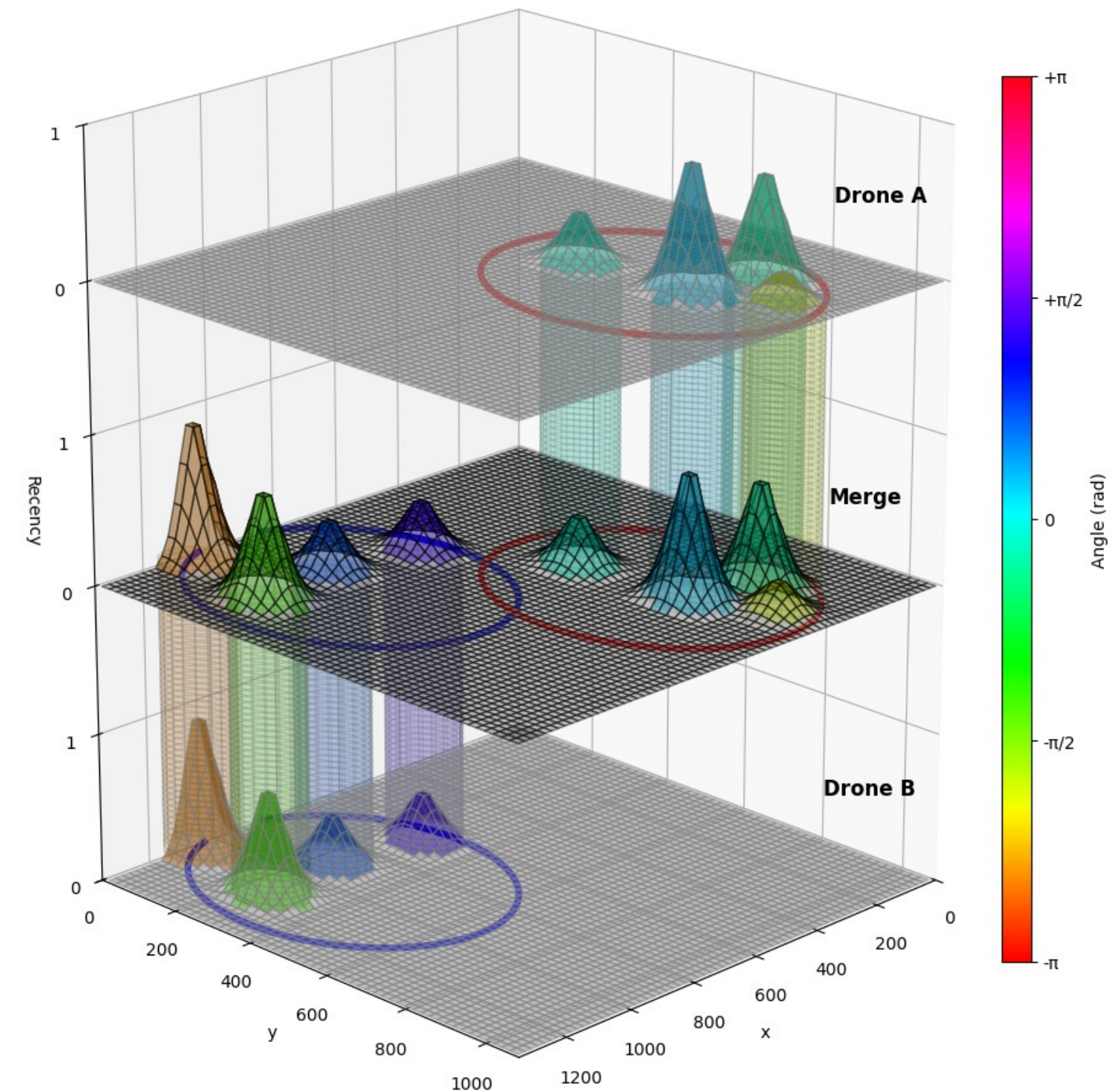


Figura 6: Junção de estados internos.

Interceptação baseada em navegação proporcional

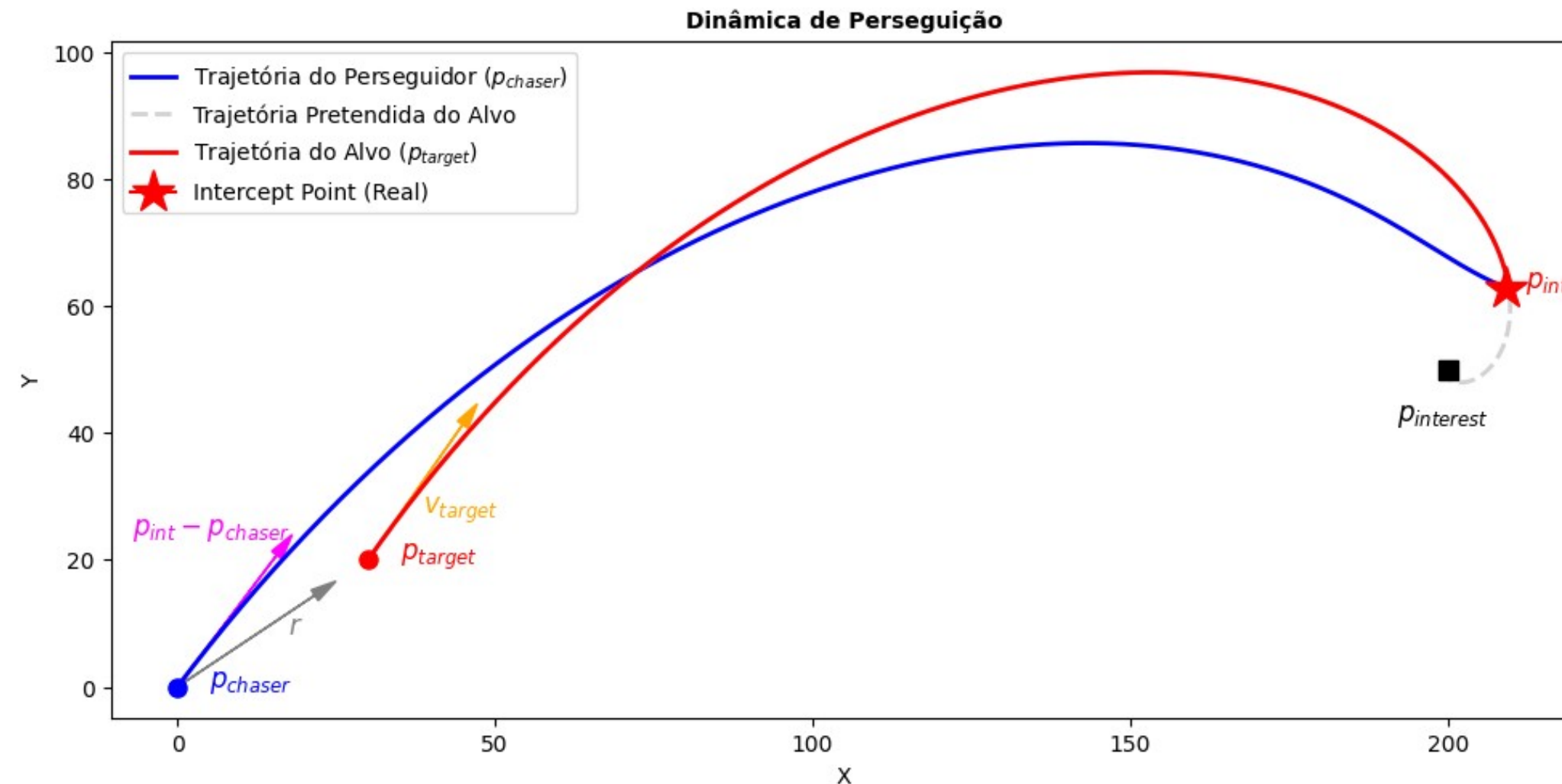


Figura 7: Geometria da interceptação.

Problema: Calcular trajetória ótima para interceptar alvo móvel

Condição de interceptação:

$$\| r + v_t t \| = v_c t$$

Solução:

- ☐ Equação quadrática em t
- ☐ Tempo ótimo de interceptação
- ☐ Direção do ponto de encontro

Estratégia de Posicionamento Passivo

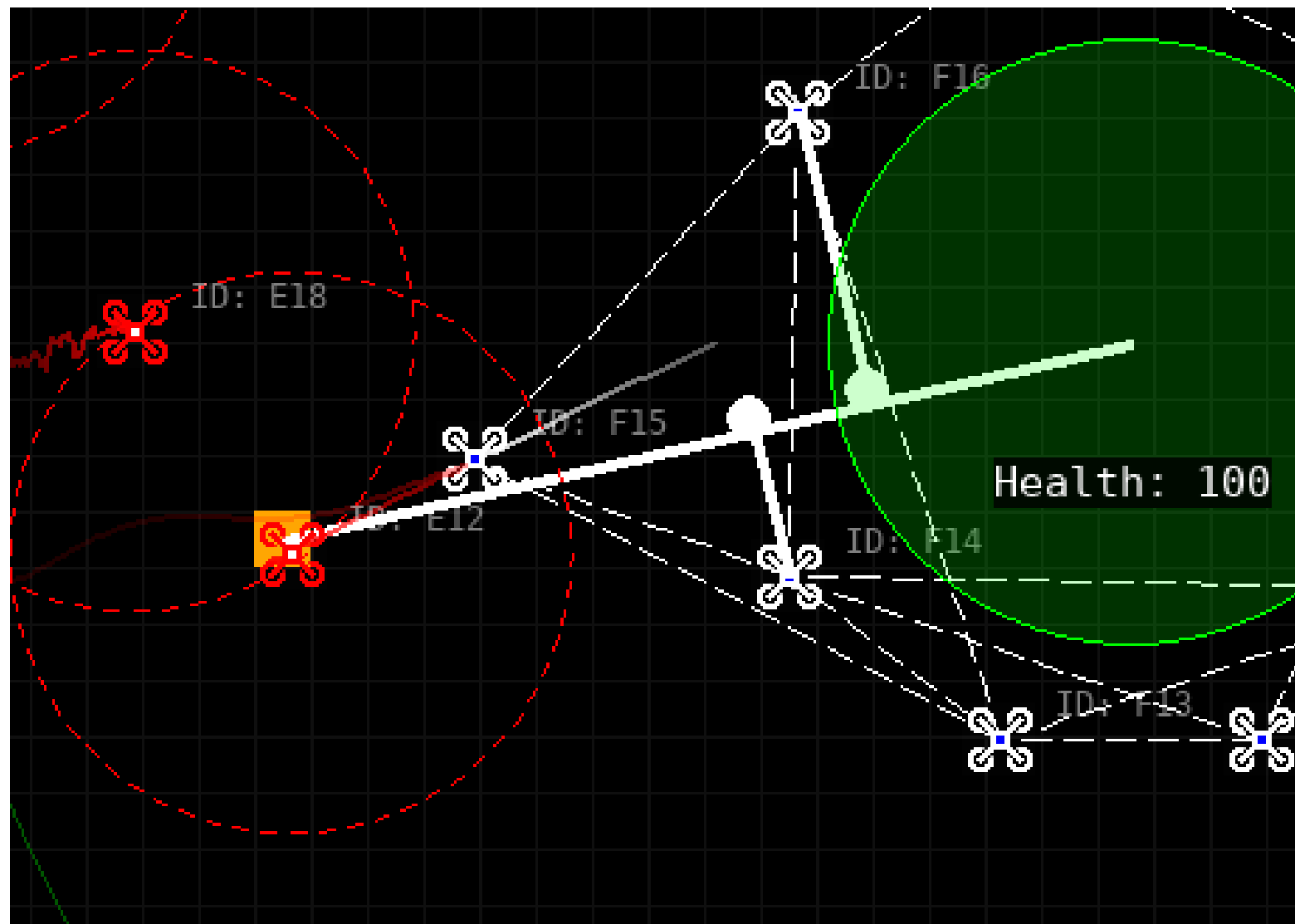


Figura 8: Formação de defesa em camadas com posicionamento estratégico dos drones.

Holding Ativo: Estado de espera estratégica não estático

Ações:

- ☐ Identificar ameaça prioritária
- ☐ Calcular trajetória prevista
- ☐ Posicionar-se interceptando
- ☐ Coordenar com vizinhos

Resultado: Defesa em camadas e cobertura otimizada

Simulador *DroneSwarm2D*

Comportamentos:
composto por sub-rotinas
que regem todas as ações
possíveis do drone

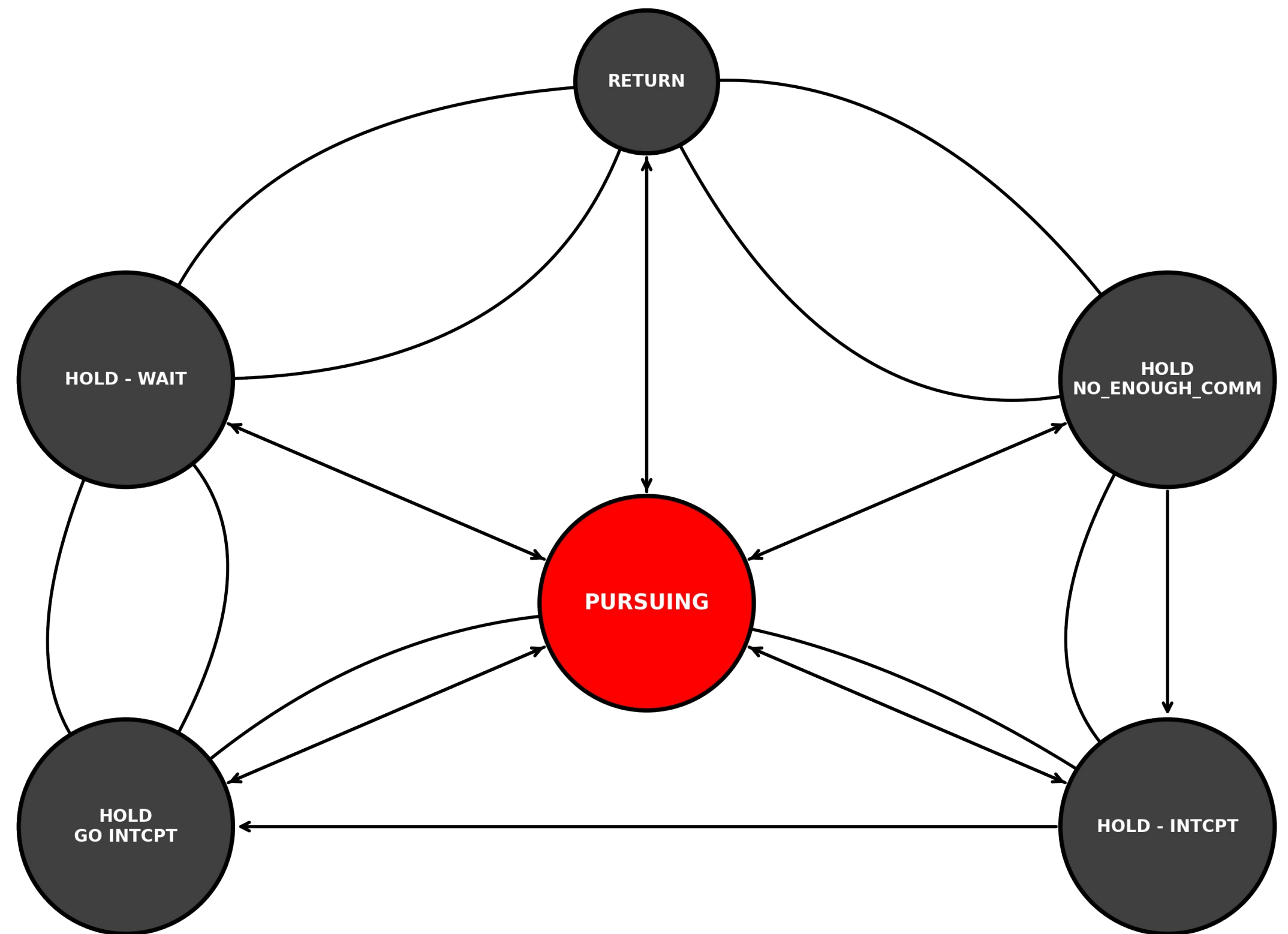


Figura 9: Máquina Estados Finitos (FSM) que descreve comportamento do drone.

Modelagem dos Drones Inimigos

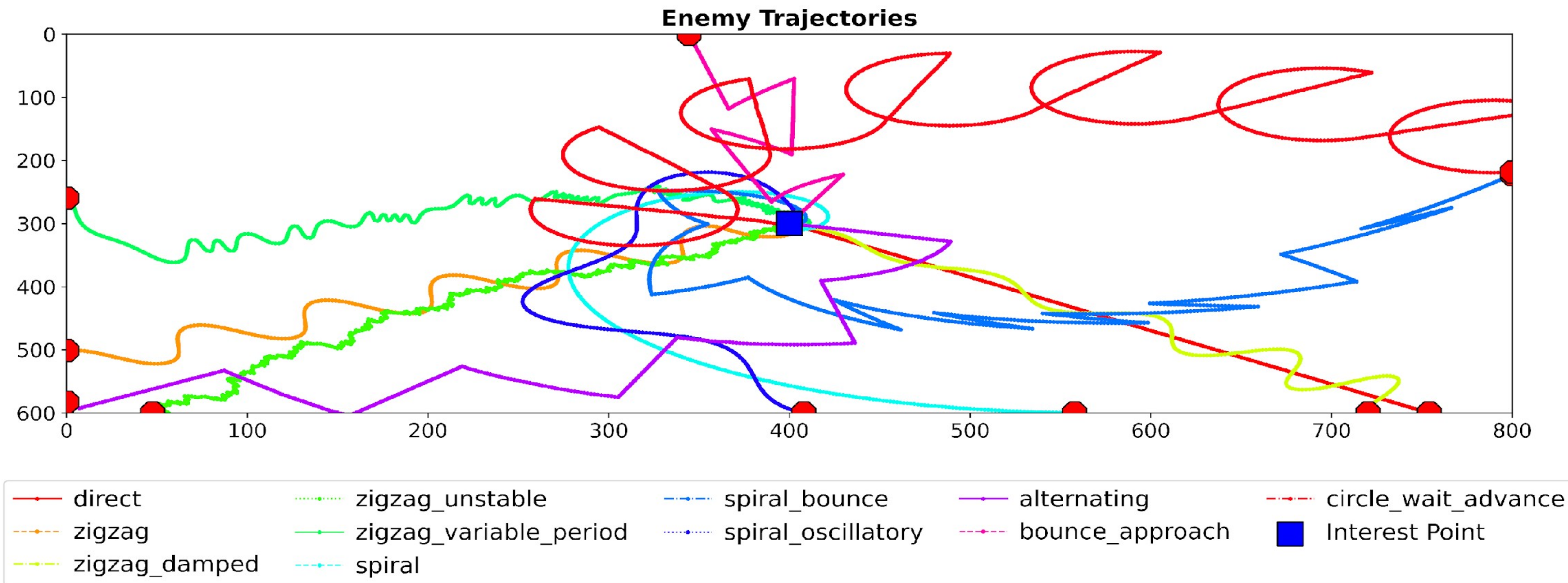


Figura 10: Diversidade de padrões de ataque modelados.

Comportamento Adaptativo

- ☐ Trajetórias variadas: Direta, zigzag, espiral, oscilatória
- ☐ Detecção de defensores: Decisão entre ataque e evasão

Algoritmo de agressividade adaptativa com base em distância ao alvo.

$$p_{attack} = \max \left(1 - \frac{d}{2R}, \alpha \right)$$

Parâmetros

- d : Distância ao alvo
- R : Raio defensivo
- α : Agressividade [0,1]

Comportamento

- *Se $r < p_{attack}$: Ataque direto*
- *Caso contrário: Evasão temporária*

Resultado: Ameaças dinâmicas e pseudoaleatórias que se adaptam à defesa

Cenários

- ❑ **Coordenação Distribuída:** O algoritmo que rege o comportamento defensivo é distribuído. A informação que se propaga na rede permite que as ações tomadas localmente fomentem uma estratégia coletiva.
- ❑ **Coordenação Centralizada:** Elemento central é a única informação do ambiente (detecção amiga e inimiga). Ele comanda as ações de cada drone e dele parte a tática a ser adotada.

RESULTADOS

Simulação

Centralizado



Distribuído



Capacidade defensiva

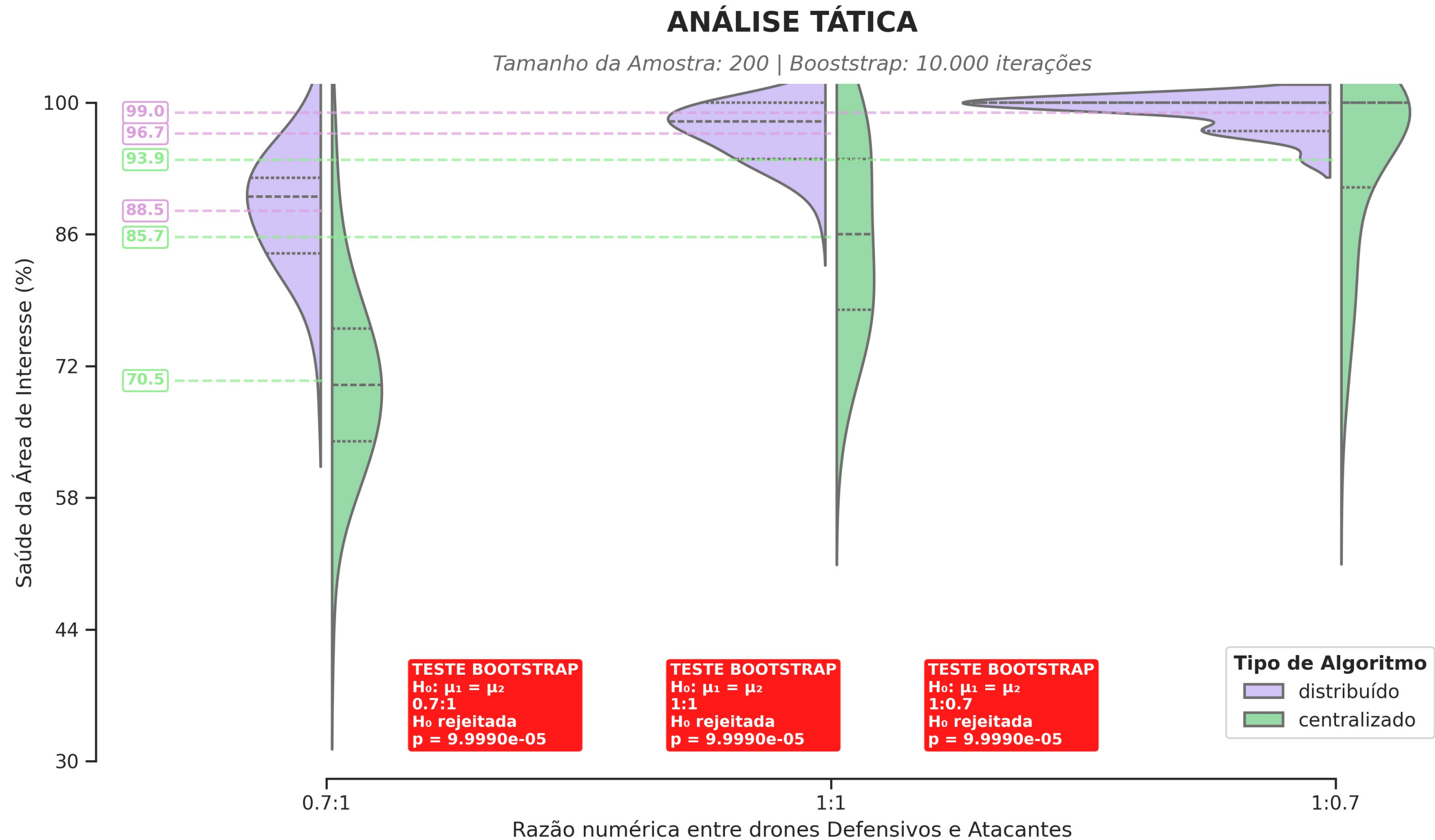


Figura 11: Gráfico contendo análise comparativa das tática defensivas.

Sub-rotina predominante

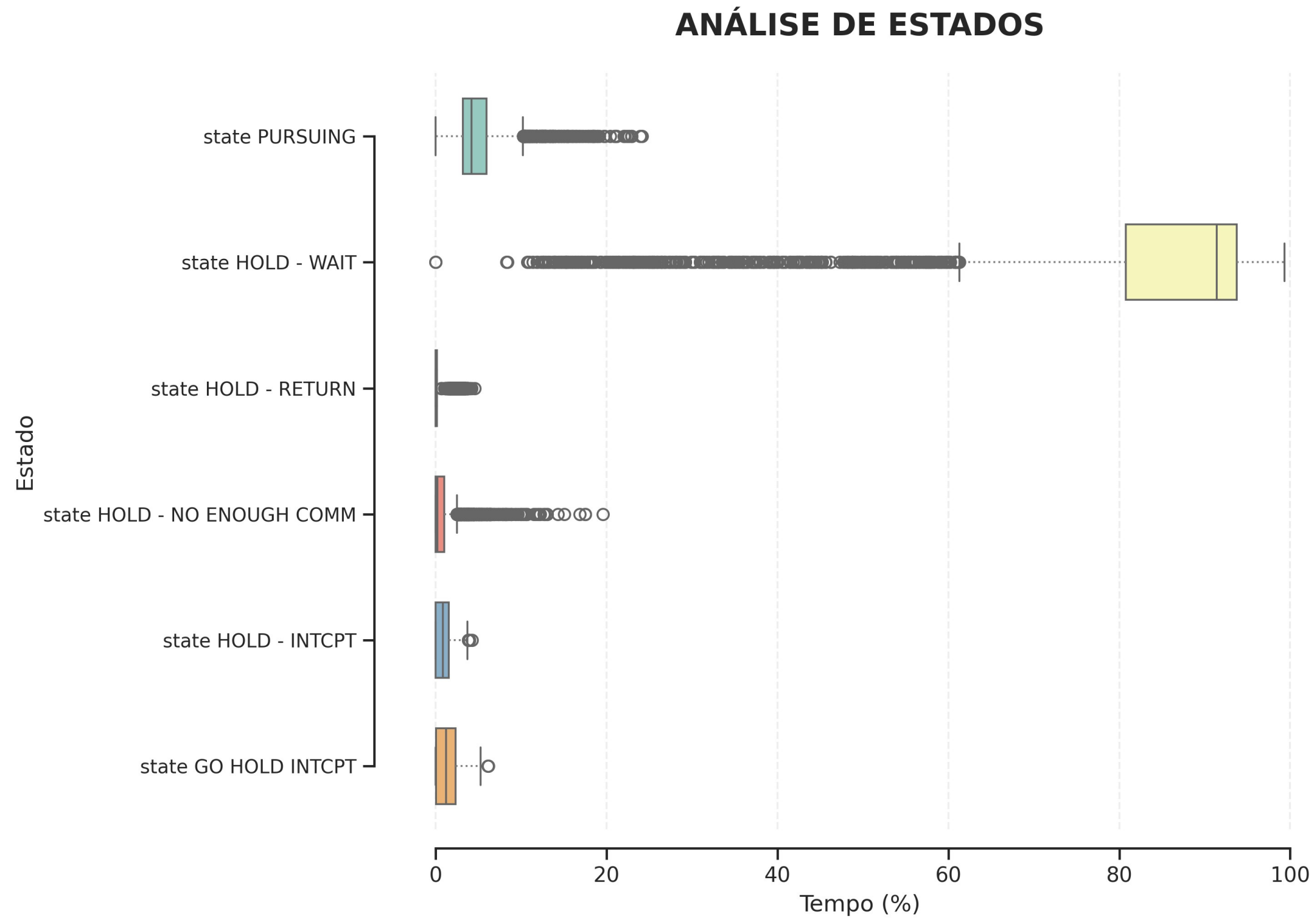


Figura 12: *Boxplot* com distribuição temporal das sub-rotinas que regem o comportamento do drone defensivo.

PRÓXIMOS PASSOS

Próximos Passos

- ☐ O resultado obtido já é superior ao *status quo*, contudo, existe oportunidade de melhorias a serem feitas na sub-rotina de *HOLD-WAIT*, na qual o drone permanece a maior parte do tempo.
- ☐ Projeto de pesquisa em andamento (mestrado): algoritmo distribuído para enxame de drones defensivos de pequeno porte baseado em Inteligência Artificial (IA).

REFERÊNCIAS

Referências Principais

- BARREIROS, D. **Projeções sobre o Futuro da Guerra: Tecnologias disruptivas e mudanças paradigmáticas (2020–2060)**. IE-UFRJ Discussion Paper, 2019.
- FIGUEIREDO, B. M. **The Use of Uncrewed Aerial Systems by Non-State Armed Groups: Exploring Trends in Africa**. UNIDIR, 2024.
- GONG, J. et al. Introduction to Drone Detection Radar with Emphasis on Automatic Target Recognition. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, 2023.
- DANTAS, J. P. A. et al. ASA: A Simulation Environment for Evaluating Military Operational Scenarios. **Proceedings of the 20th International Conference on Scientific Computing**, 2022.
- SILVA, L. B. **Plataforma de cossimulação para sistemas autônomos com múltiplos drones**. Tese(Doutorado) — Universidade Federal do Ceará, 2019.
- CATARRO, T. et al. Energy-Aware PSO-based Topology Control in FANETs. **Ad Hoc Networks**, 2024. In press.
- BEKMEZCI, I.; SAHINGOZ, O. K.; TEMEL, S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey. **Ad Hoc Networks**, v. 11, n. 3, p. 1254–1270, 2013.
- TANENBAUM, A. S.; VAN STEEN, M. **Distributed Systems: Principles and Paradigms**. Pearson Education, 2010.
- LYNCH, N. A. **Distributed Algorithms**. Morgan Kaufmann, 1996.
- RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. 3rd ed. Pearson Education, 2016.
- GHALLAB, M.; NAU, D.; TRAVERSO, P. **Automated Planning: Theory and Practice**. Morgan Kaufmann, 2004.
- WOOLDRIDGE, M. **An Introduction to MultiAgent Systems**. 2nd ed. John Wiley & Sons, 2009.
- GUPTA, L.; JAIN, R.; VASZKUN, G. Survey of important issues in UAV communication networks. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 18, n. 2, p. 1123–1152, 2016.

Muito Obrigado!

Lucas Silva Lima
limalsl@ita.br



Instituto Tecnológico de Aeronáutica