



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 Tasinazzo (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*

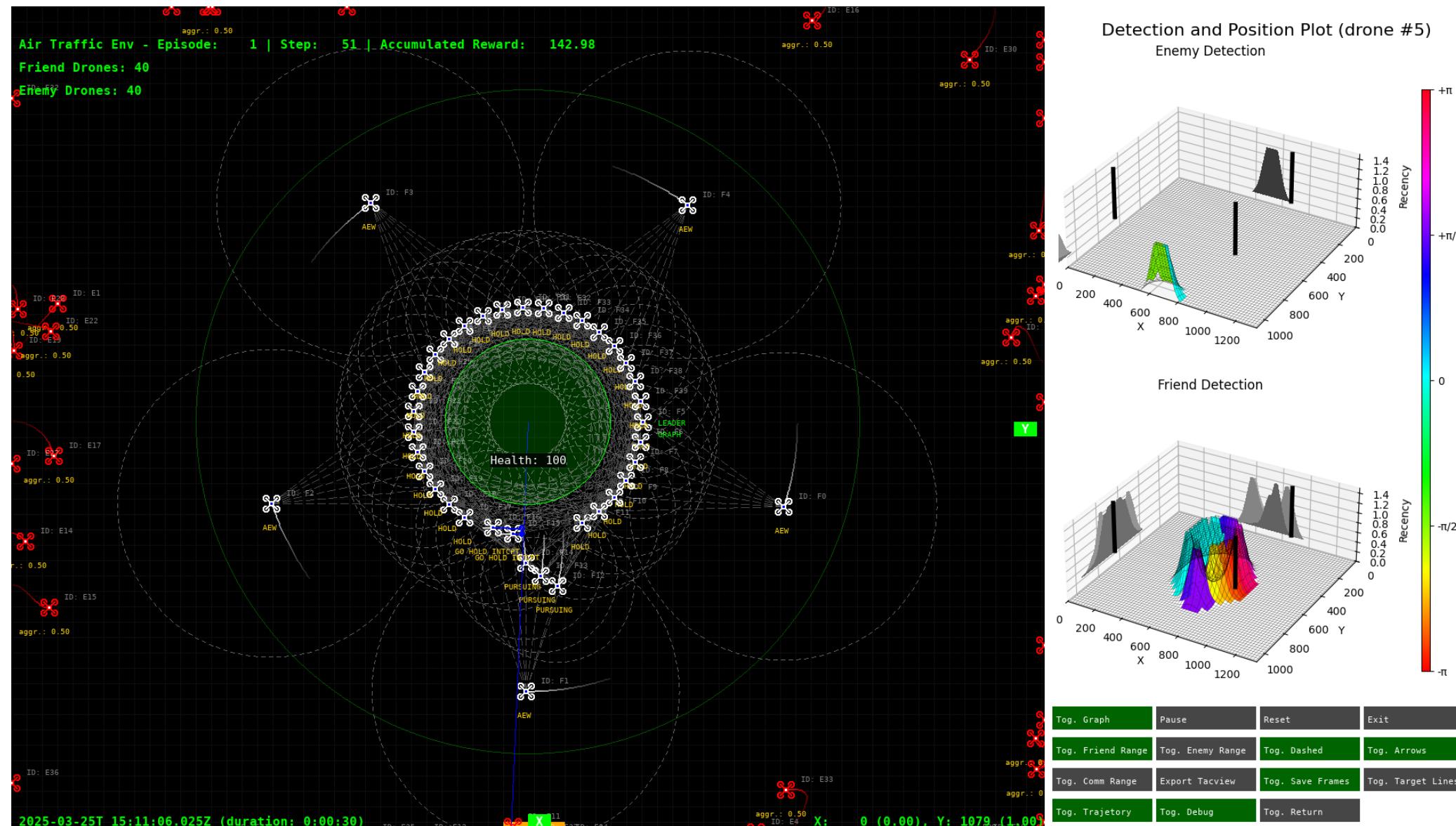


Figura 4: Interface principal do simulador.

## 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:**

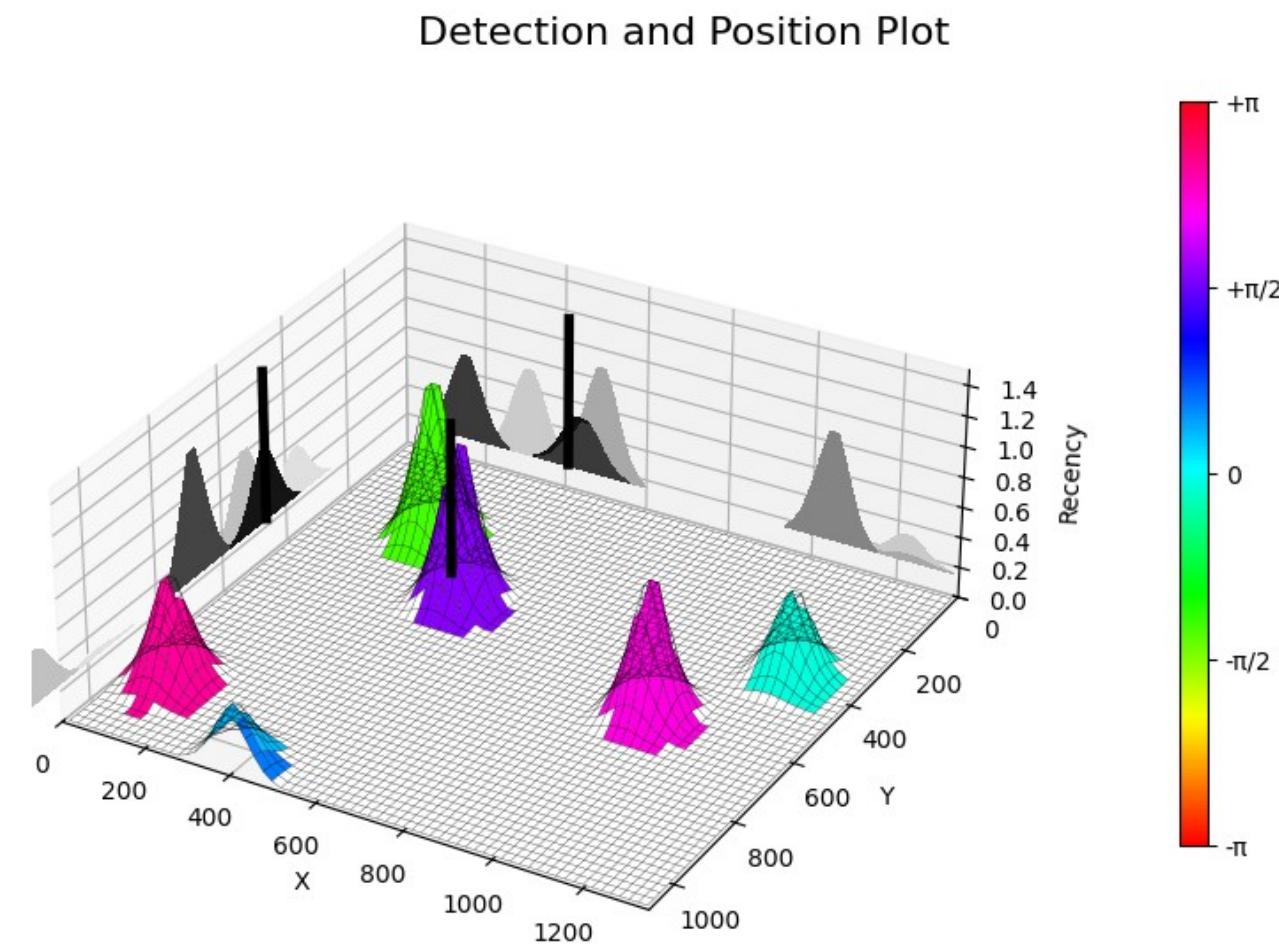
- Matriz de Recência: Atualidade [0,1] por região
- Matriz de Direção: Vetores de movimento observados
- Posição Própria: Referência para integração

**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)

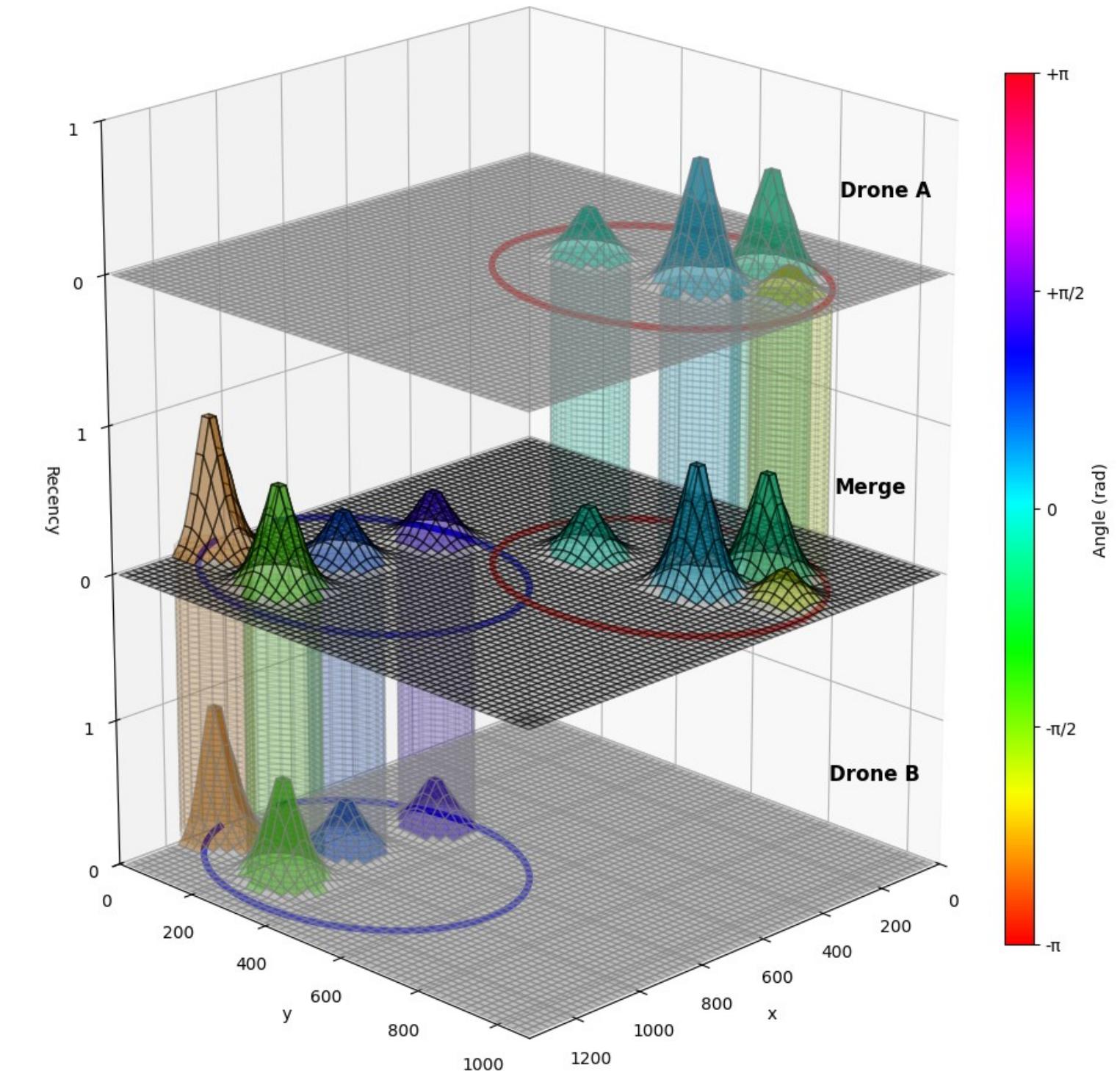


**Figura 5:** Representação interna de drone defensivo:  
matriz de recência e direção.

# 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

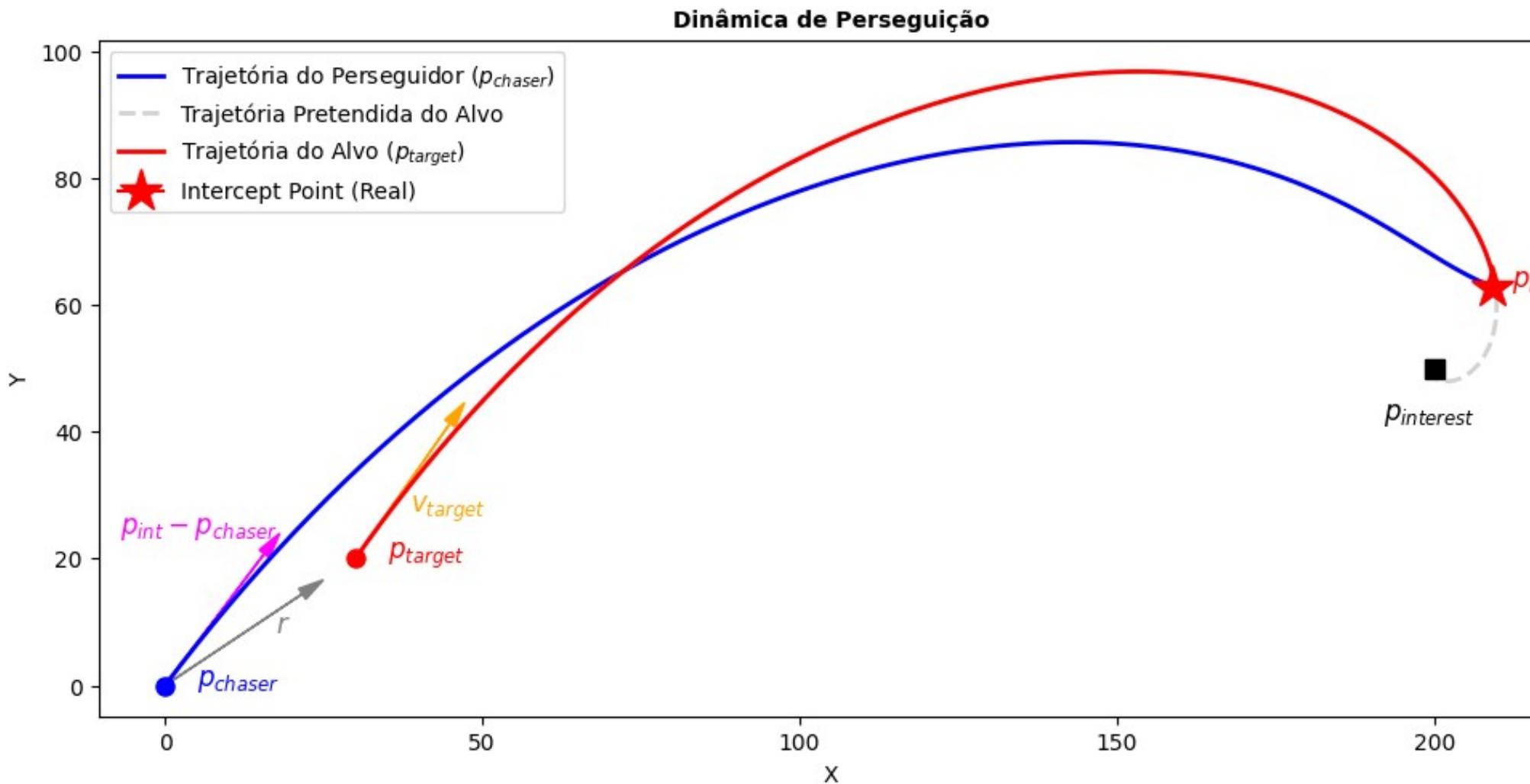


Figura 7: Geometria da interceptação.

**Problema:** Calcular trajetória ótima para interceptar alvo móvel

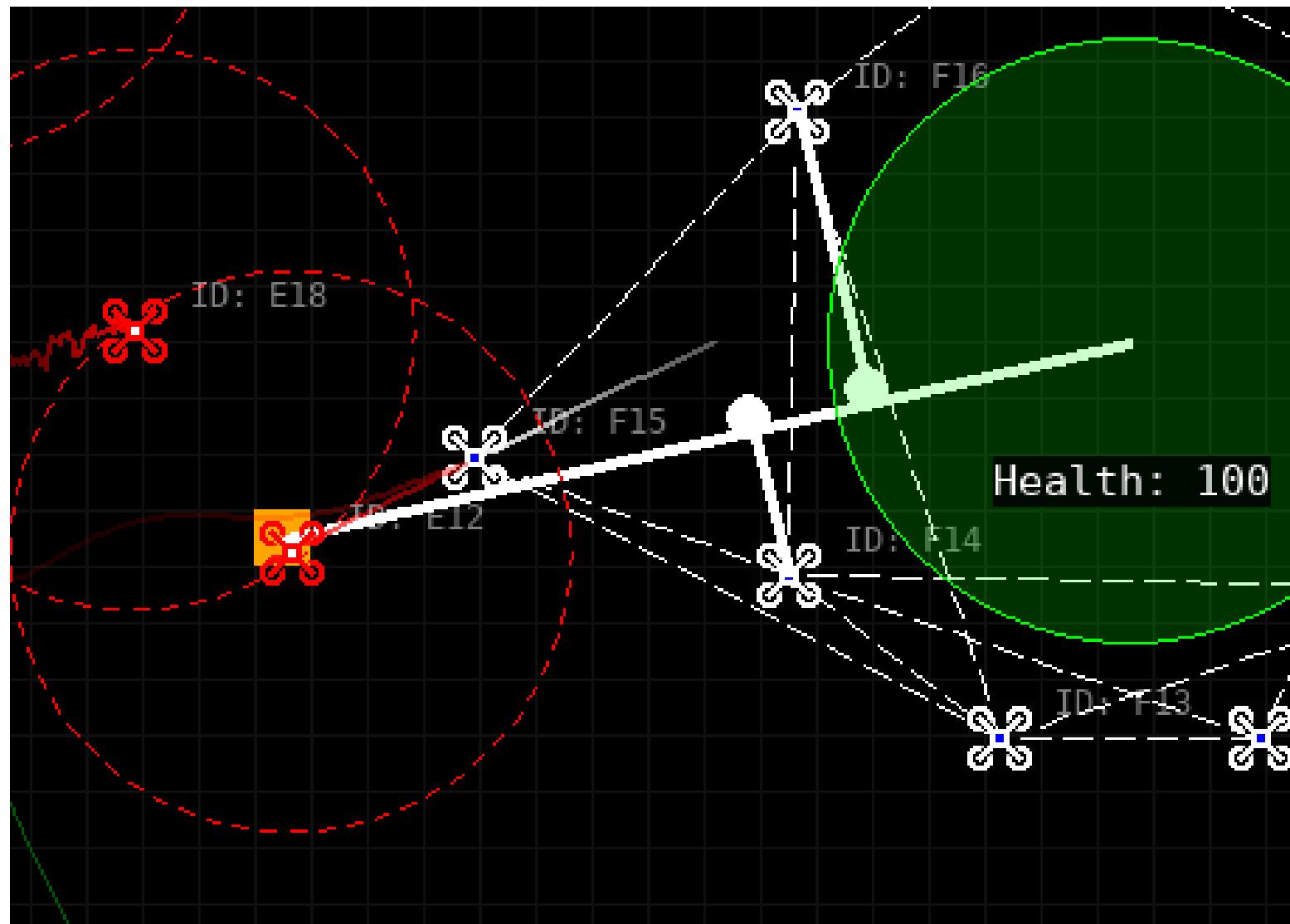
**Condição de interceptação:**

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

**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

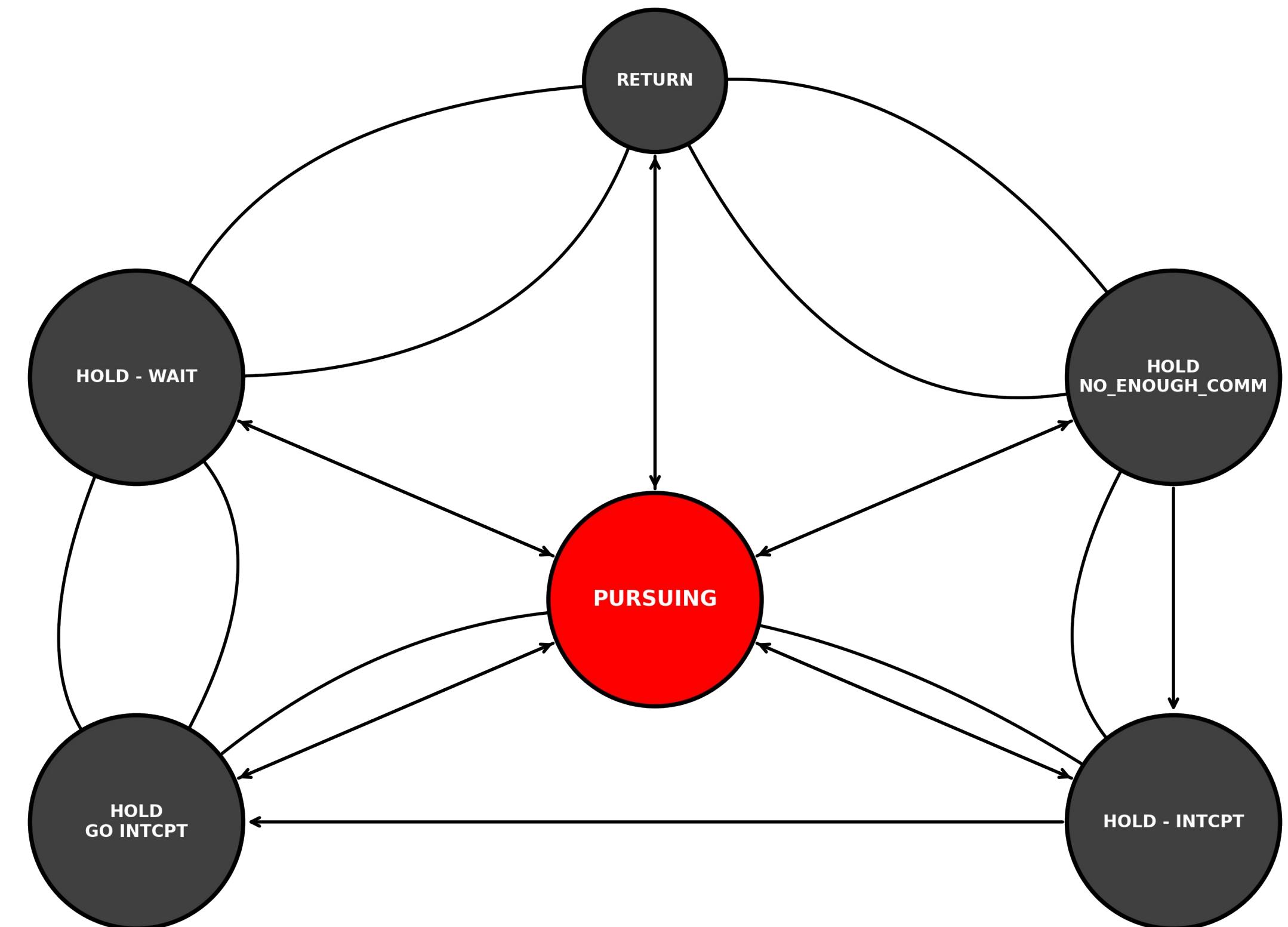
## Ações:

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

**Resultado:** Defesa em camadas e cobertura otimizada

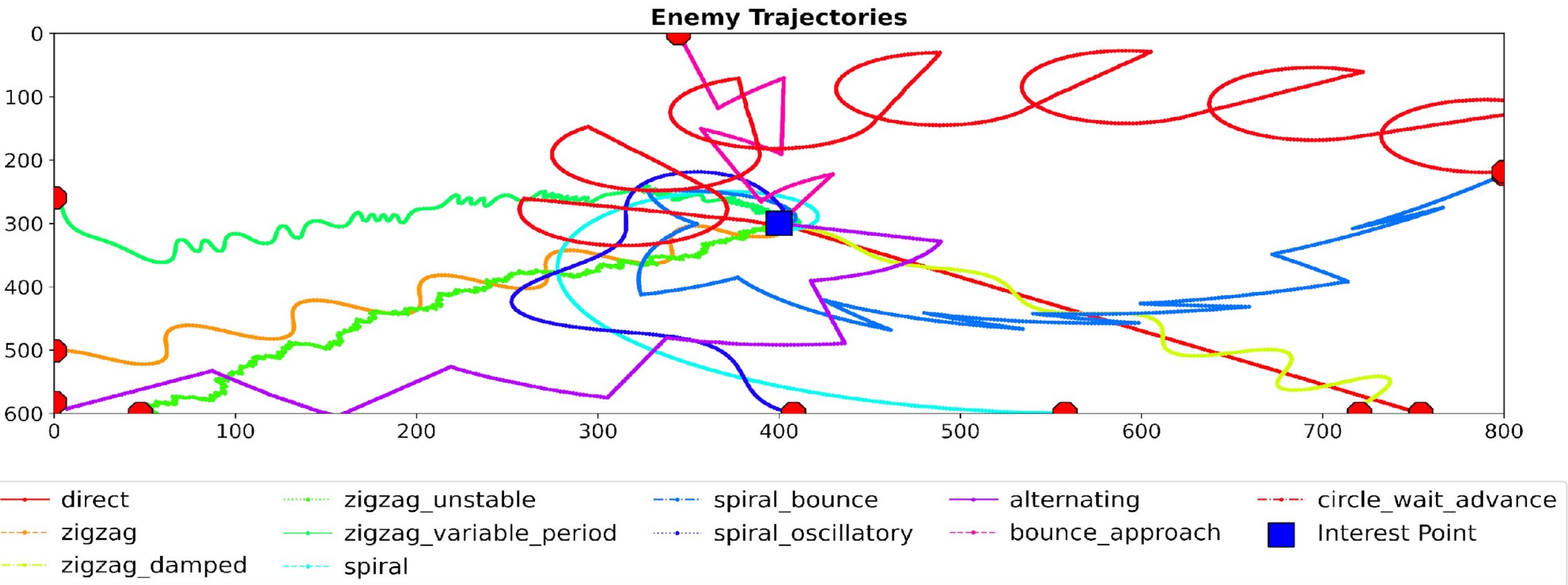
# Simulador *DroneSwarm2D*

**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
- $\alpha$ : Agressividade [0,1]

## Comportamento

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

**Resultado:** Ameaças dinâmicas e pseudoaleatórias que se adaptam à defesa

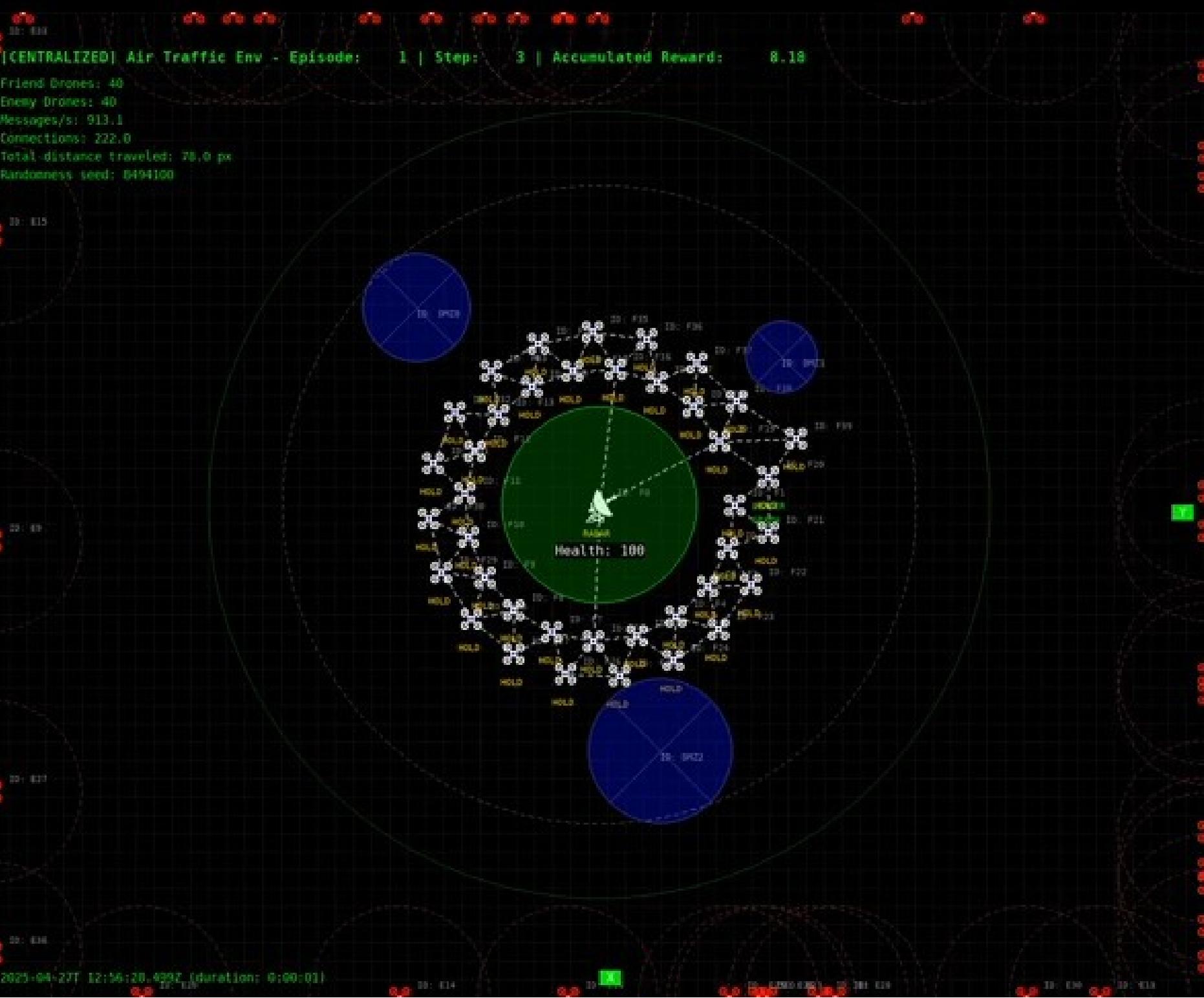
# Cenários

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

# **RESULTADOS**

# Simulação

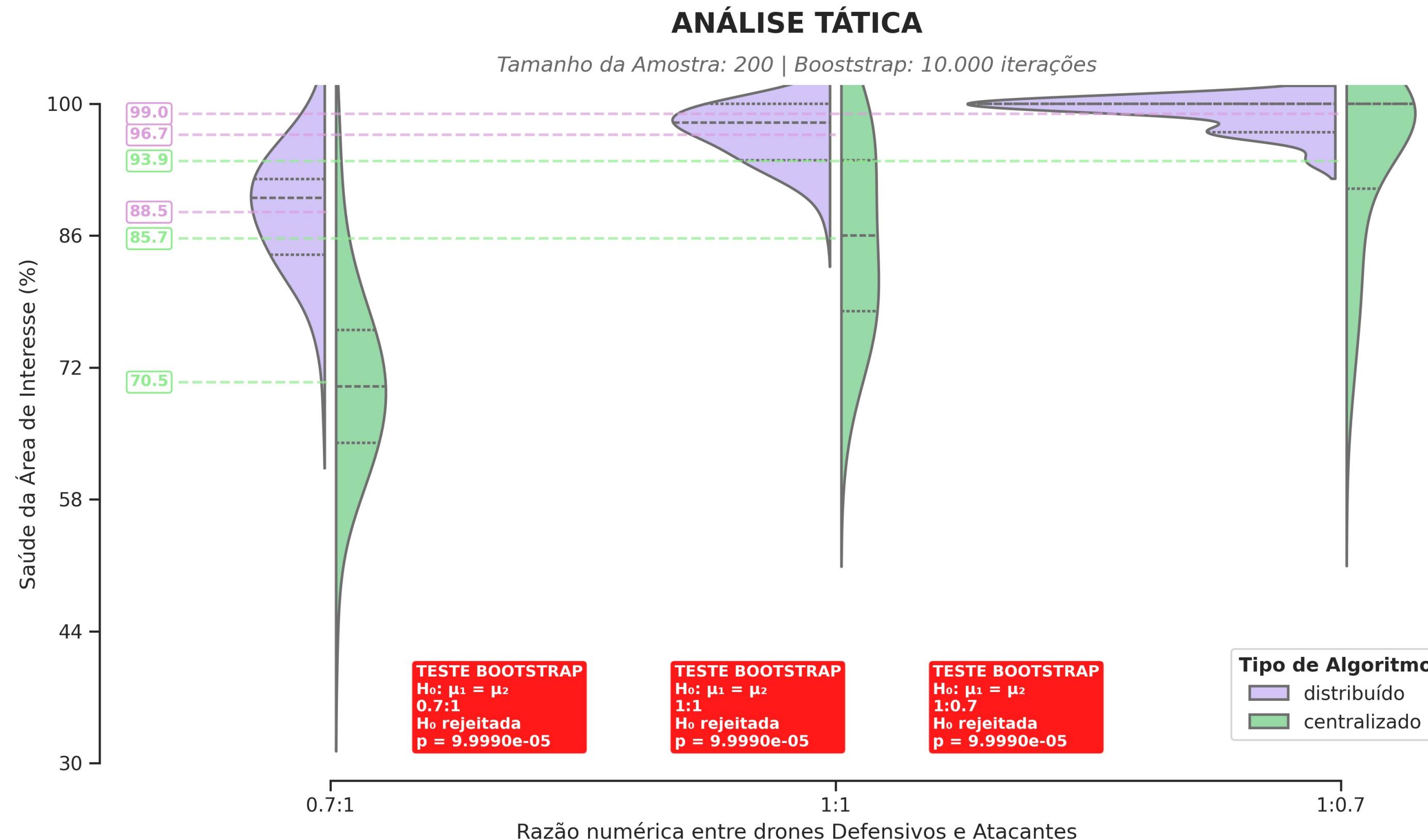
Centralizado



Distribuído

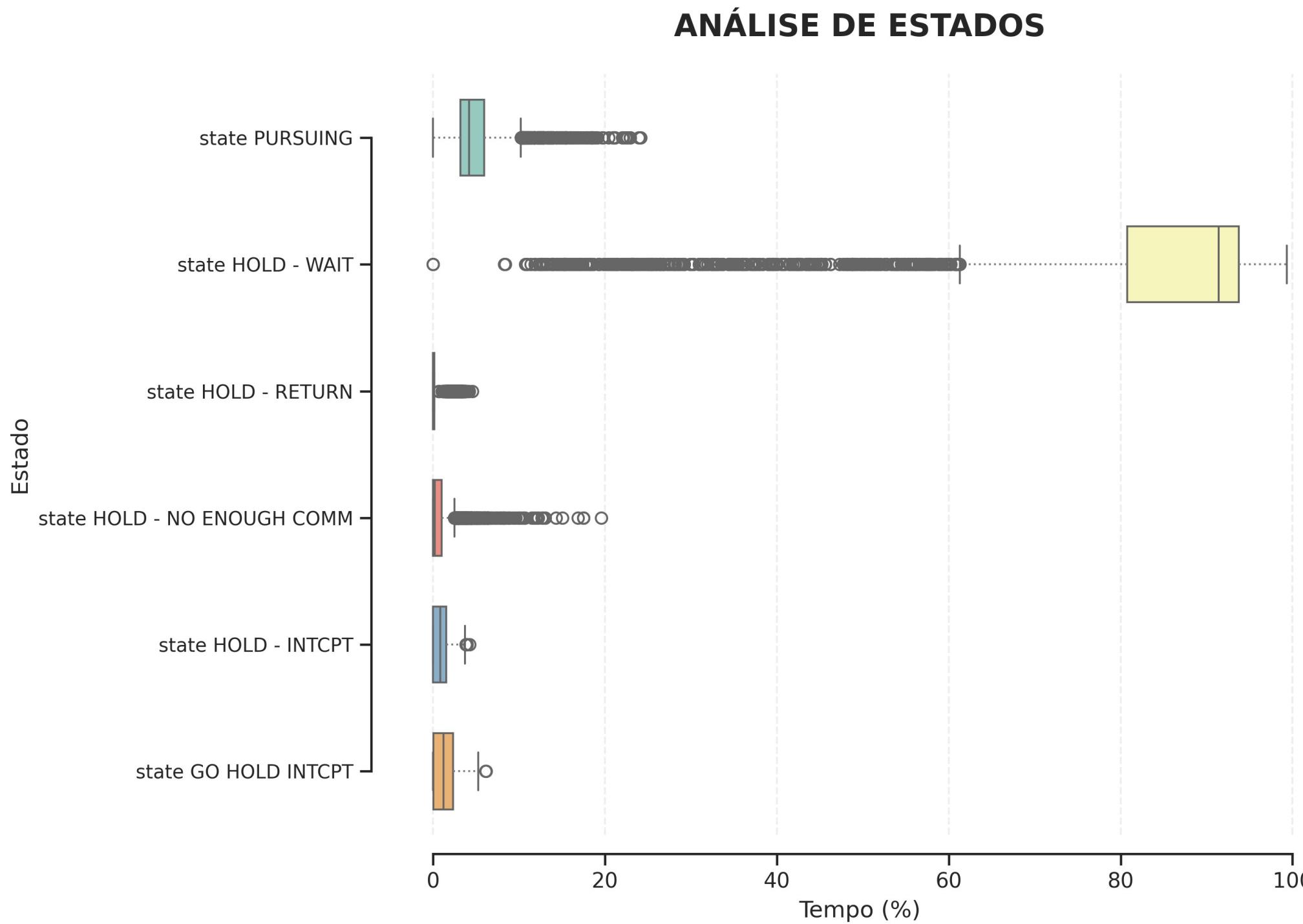


# Capacidade defensiva



**Figura 11:** Gráfico contendo análise comparativa das táticas 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 mudançasparadigmáticas (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](mailto:limalsl@ita.br)



Instituto Tecnológico de Aeronáutica