

Aplicación de Algoritmos de Optimización por Enjambre en la Coordinación de Drones

Cristian Cative y Julian Nivia
Universidad

Abstract—Este documento presenta la implementación de técnicas de optimización por enjambre aplicadas a la coordinación de drones en diferentes escenarios. En particular, se desarrollan dos ejercicios: el primero, orientado al uso del algoritmo de *Particle Swarm Optimization* (PSO) para la formación de figuras específicas con drones evitando obstáculos; y el segundo, mediante *Ant Colony Optimization* (ACO) para la simulación de un terreno post-desastre en el cual los drones buscan supervivientes de manera adaptativa. Se deja además un espacio para la integración de un tercer punto de trabajo. Los resultados muestran la aplicabilidad de estas técnicas en la planificación colectiva y adaptativa de vehículos no tripulados.

I. INTRODUCCIÓN

La coordinación de enjambres de drones es un campo de investigación creciente debido a su aplicación en áreas como logística, búsqueda y rescate, monitoreo ambiental y defensa. Para lograr que múltiples drones trabajen de manera eficiente y adaptativa, se han implementado técnicas de inteligencia de enjambre, entre las que destacan el *Particle Swarm Optimization* (PSO) y el *Ant Colony Optimization* (ACO).

Este trabajo explora la implementación de ambos algoritmos en dos contextos específicos: formación de figuras geométricas y búsqueda de objetivos en un entorno post-desastre. La integración de estos métodos busca demostrar su potencial en escenarios reales con restricciones dinámicas.

II. MARCO TEÓRICO

A. *Particle Swarm Optimization* (PSO)

PSO es una técnica de optimización inspirada en el comportamiento colectivo de aves y peces. Cada partícula (en este caso, dron) ajusta su posición en función de su mejor experiencia personal y la del grupo, permitiendo una convergencia eficiente hacia objetivos definidos.

B. *Ant Colony Optimization* (ACO)

ACO se inspira en el comportamiento de las colonias de hormigas, que depositan feromonas virtuales para reforzar caminos hacia recursos. En robótica y sistemas multiagente, este enfoque se traduce en exploración adaptativa, en la que los drones priorizan rutas con mayor probabilidad de éxito basándose en la experiencia colectiva.

C. *Aplicaciones en drones*

La combinación de PSO y ACO ha sido aplicada en problemas de planificación de trayectorias, formación de enjambres, evasión de obstáculos y búsqueda de recursos, siendo altamente útiles en entornos dinámicos e inciertos.

III. OBJETIVOS

A. *Objetivo General*

Implementar y evaluar algoritmos de inteligencia de enjambre (PSO y ACO) en la coordinación de drones para tareas de formación y exploración adaptativa.

B. *Objetivos Específicos*

- Diseñar una simulación en la que los drones conformen figuras geométricas mediante PSO, incorporando obstáculos en el entorno.
- Implementar un modelo basado en ACO para la exploración de un terreno post-desastre, considerando cobertura, feromonas virtuales y búsqueda de supervivientes.
- Analizar métricas de desempeño como porcentaje de cobertura, energía consumida y adaptabilidad frente a cambios del entorno.
- Documentar los resultados de los ejercicios y proponer mejoras para su aplicación en escenarios reales.

IV. RESULTADOS

A. *Punto 1: PSO con formación de drones*

En este punto se implementó un modelo de *Particle Swarm Optimization* (PSO) donde un enjambre de drones se organiza para conformar tres formaciones: *estrella*, *robot* y *dragón*. El sistema considera fallos en algunos drones, obstáculos circulares y el ajuste dinámico de la velocidad en función de la posición objetivo y el promedio del enjambre.

El código implementado permite simular el comportamiento adaptativo de los drones, distinguiendo entre:

- **Drones activos:** mostrados en color azul.
- **Drones fallidos:** mostrados en color rojo.
- **Objetivos de la formación:** representados con marcadores verdes.
- **Obstáculos:** representados como círculos grises en el terreno.

A continuación, se presentan las formaciones obtenidas:

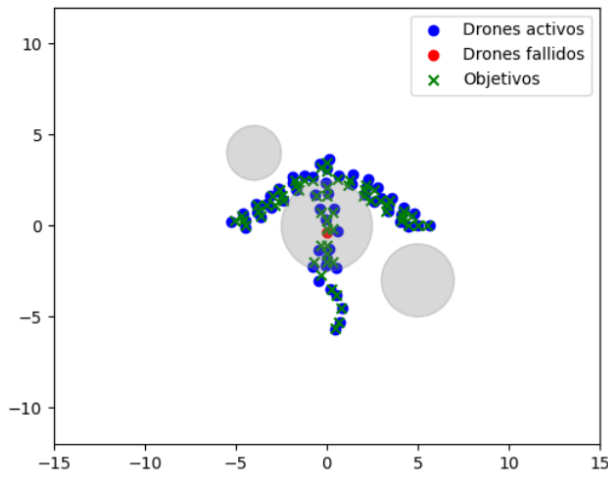


Fig. 1. Formación tipo *dragón* con drones coordinados mediante PSO.

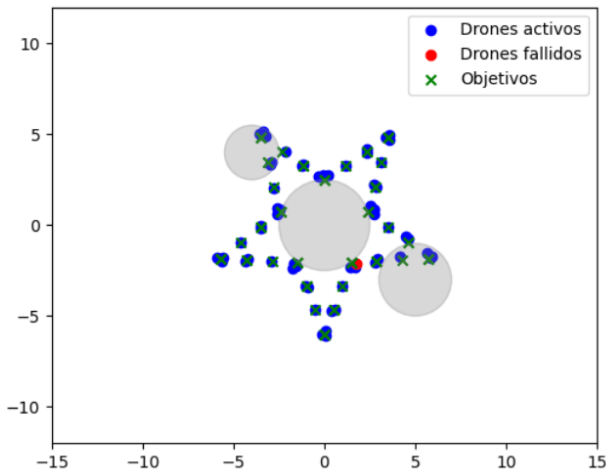


Fig. 2. Formación tipo *estrella* con drones activos y fallidos.

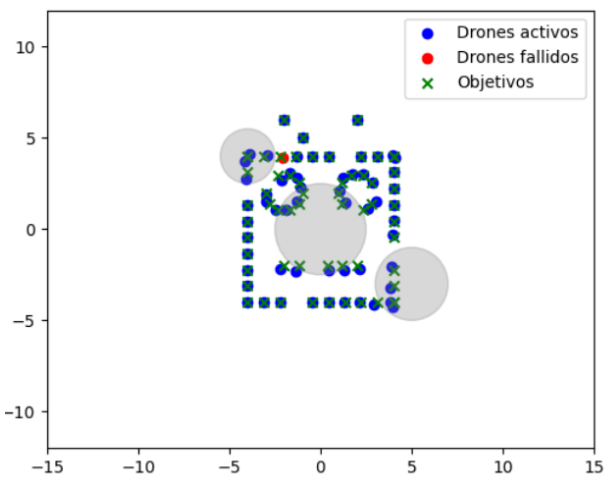


Fig. 3. Formación tipo *robot*, con adaptación frente a obstáculos.

El sistema demostró que, incluso ante fallos individuales, el enjambre mantiene la coherencia y tiende a completar la figura objetivo. Esto evidencia la capacidad de PSO para la coordinación robusta en escenarios dinámicos.

B. Punto 2: Coordinación de drones con ACO

El segundo experimento se centra en la implementación del algoritmo de Colonias de Hormigas (ACO) para la exploración y rescate en un entorno afectado por un desastre. El objetivo principal es coordinar un enjambre de drones para maximizar la cobertura del área y localizar supervivientes, considerando la presencia de obstáculos y cambios dinámicos en el terreno.

La simulación muestra el comportamiento colectivo del enjambre de drones en el terreno, representado en la Figura 4. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Supervivientes encontrados: 6/8.
- Cobertura del área: 62.4%.
- Energía consumida: 120000 unidades.

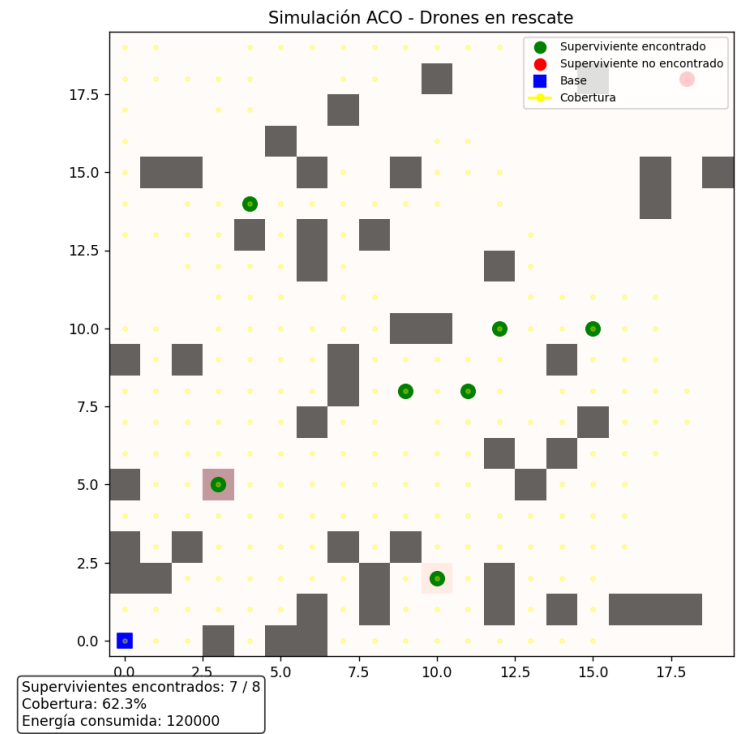


Fig. 4. Simulación del algoritmo ACO aplicado a un enjambre de drones en un escenario de rescate.

PUNTO 3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN ABC CON RECARGA Y BATERÍA

En esta sección se presentan los resultados de la simulación del algoritmo **ABC (Artificial Bee Colony)** aplicado al sistema de polinización con drones, incorporando el modelo de **gestión de batería y recarga automática**. Cada imagen muestra un instante representativo del proceso, evidenciando cómo los drones (abejas artificiales) ejecutan la búsqueda y polinización de flores dentro del entorno definido.

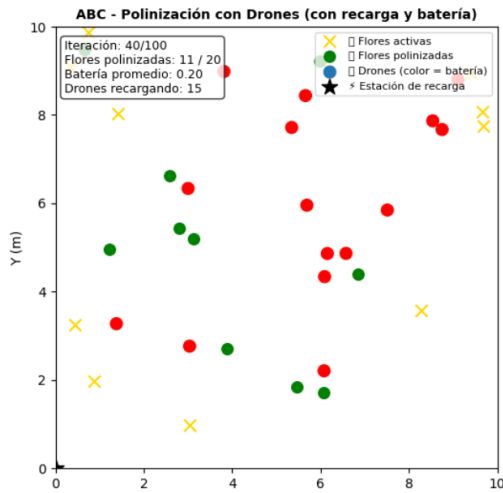


Fig. 5. Iteración 40: inicio del proceso de recarga de los drones con bajo nivel de batería.

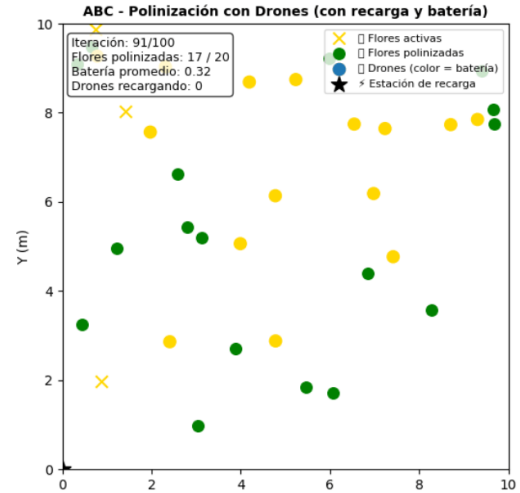


Fig. 7. Iteración 91: finalización del proceso de polinización, con la mayoría de flores completadas.

En la simulación, los drones inician la búsqueda de flores con **energía completa**, lo que les permite desplazarse libremente por el área de trabajo y comenzar la polinización. Sin embargo, conforme avanza la ejecución del algoritmo, la batería de los drones comienza a **descargarse de manera proporcional a su desplazamiento y actividad**, provocando que varios de ellos deban dirigirse hacia la **estación de recarga**.

Alrededor de la mitad de las iteraciones (iteración 40–50), se observa un punto crítico donde un porcentaje considerable de drones se encuentra en proceso de recarga, evidenciando la **priorización automática de la recarga energética**. Este comportamiento es fundamental para garantizar la continuidad de la tarea sin interrupciones y refleja un adecuado manejo de los recursos energéticos dentro del sistema.

Posteriormente, los drones con batería restaurada retoman la tarea de polinización, lo que se traduce en un aumento progresivo del número de flores polinizadas. En las últimas iteraciones (cercanas a la 90), la mayoría de los drones presentan niveles energéticos estables y la polinización total está casi completada.

En conclusión, el modelo evidencia que la incorporación del **módulo de gestión de batería y recarga automática** no sólo permite una operación más realista, sino que optimiza el rendimiento del enjambre, asegurando que las tareas de polinización se realicen de manera continua y eficiente a pesar del desgaste energético natural de los drones.

V. CONCLUSIONES

Conclusión Punto 1 – PSO con formación de drones

La implementación del algoritmo PSO demostró una alta eficacia en la coordinación colectiva de drones para la conformación de figuras geométricas predefinidas. El sistema mantuvo estabilidad incluso ante la falla de unidades individuales, lo que evidencia la robustez del modelo y su capacidad de autorregulación. La interacción entre las partículas permitió

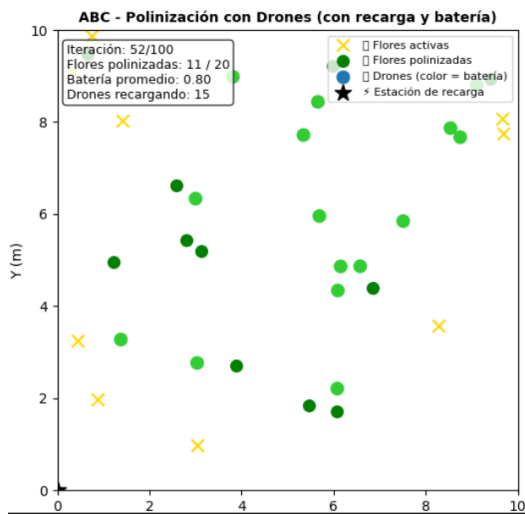


Fig. 6. Iteración 52: proceso de recarga completado y drones reanudando la polinización.

que cada dron ajustara su posición basándose en el comportamiento promedio del enjambre y su propio mejor estado, logrando formaciones coherentes y adaptativas. Esto sugiere que el PSO es un enfoque adecuado para tareas de formación y control distribuido en entornos dinámicos.

Conclusión Punto 2 – Coordinación de drones con ACO

El modelo basado en el algoritmo ACO permitió observar un comportamiento emergente eficiente en la exploración de terrenos desconocidos. Los drones, guiados por la dinámica de feromonas virtuales, fueron capaces de cubrir gran parte del área de búsqueda y localizar la mayoría de los objetivos planteados. La estrategia de actualización de trayectorias contribuyó a evitar redundancias y mejorar la cobertura general. En consecuencia, se concluye que ACO ofrece un marco de coordinación ideal para misiones de búsqueda y rescate, al promover la cooperación indirecta y la adaptabilidad ante condiciones cambiantes del entorno.

Conclusión Punto 3 – ABC con gestión de batería y recarga automática

La simulación del algoritmo ABC, aplicada al escenario de polinización con drones, validó la efectividad de incorporar un sistema de gestión energética inteligente. Los drones inician sus tareas con energía completa, pero al alcanzar niveles bajos de batería, priorizan automáticamente el retorno a la estación de recarga, asegurando la continuidad de la operación. Este comportamiento refleja un balance eficiente entre exploración y sostenibilidad energética. En conjunto, el modelo demuestra que la combinación de la dinámica del algoritmo ABC con un módulo de recarga autónoma permite un desempeño continuo, estable y energéticamente viable para aplicaciones agrícolas y ambientales con enjambres de drones.

VI. REFERENCIAS

REFERENCES

- [1] Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks.
- [2] Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colomi, A. (1996). Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.
- [3] Bayındır, L. (2016). A review of swarm robotics tasks. Neurocomputing, 172.
- [4] Waharte, S., & Trigoni, N. (2010). Supporting search and rescue operations with UAVs. International Conference on Emerging Security Technologies.