



Universidad Pedagógica Nacional  
Facultad de Ciencia y Tecnología  
Departamento de Tecnología  
Licenciatura en Electrónica

Simulación de un sistema de control de posición para un equipo de Cuatricópteros en un ambiente virtual.

Sergio Fidel Castiblanco Gómez  
2007203020

Bogotá, D.C. Noviembre 2014

Universidad Pedagógica Nacional  
Facultad de Ciencia y Tecnología  
Departamento de Tecnología  
Licenciatura en Electrónica

Simulación de un sistema de control de posición para un equipo de Cuatricópteros en un ambiente virtual.

Sergio Fidel Castiblanco Gómez

Trabajo de grado para optar al título de Licenciado en Electrónica

Director: Prof. Diego Rivera

Bogotá, D.C. Noviembre de 2014

**Título en español**

Simulación de un sistema de control de posición para un equipo de Cuatricópteros en un ambiente virtual

**Title in English**

Simulation of a position control system for a team Quadrotors in a virtual environment.

**Palabras clave:** Cuatricóptero, Sistema de Planificación, Control Difuso, Control posición, entorno 3D.

**Keywords:** Quadrotor, Control, Simulation, Navigation, 3d environment.

**Nota de aceptación**

AUGUSTO GUARIN  
**Jurado**

DIEGO QUIROGA  
**Jurado**

DIEGO RIVERA  
**Director**

## RESUMEN ANALÍTICO EN EDUCACIÓN - RAE

1. Información General	
<b>Tipo de documento</b>	Tesis de Grado
<b>Acceso al documento</b>	Universidad Pedagógica Nacional. Biblioteca Central
<b>Título del documento</b>	Simulación de un sistema de control de posición para un equipo de Cuatricópteros en un ambiente virtual.
<b>Autor(es)</b>	Castiblanco Gómez, Sergio Fidel
<b>Director</b>	Rivera, Diego Mauricio
<b>Publicación</b>	Bogotá. Universidad Pedagógica Nacional, 2014. 83p.
<b>Unidad Patrocinante</b>	Universidad Pedagógica Nacional
<b>Palabras Claves</b>	Cuatricóptero, Planning Systems, Fuzzy Logic, Control posición, entorno 3D

2. Descripción
Se desarrollan algoritmos para el control de posición de un equipo de Cuatricópteros utilizando dos técnicas de control inteligente, una basada en control difuso y otra en Planning Systems. De igual forma se implementa y diseña una plataforma de simulación, en la cual se puede verificar el funcionamiento de las técnicas de control mencionadas anteriormente y además se pueden modificar parámetros del algoritmo (posición deseada, cantidad de Quadrotores, ubicación, distancia mínima entre ellos).

3. Fuentes
Para la realización del proyecto se consultaron 15 fuentes bibliográficas, siendo las más relevantes las siguientes:  1. Berna, F. A. (2010). <i>Desarrollo de una plataforma de tiempo real para la implementación de algoritmos de control multivariables: Ampliación al control de orientación de vehículos aéreos</i> . España: Universidad Politécnica de Valencia. Máster de Automática e informática industrial. Recuperado el 14 de octubre de 2014, del sitio Web de la Biblioteca Universidad de Politécnica de

Valencia:

2. Centes, C. y Saotome, O (2012). *Dynamic Swarm Formation with Potential Fields and A\* Path Planning in 3D environment*. Brasil: Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP.
3. Lebar Bajec Iztok, Mraz Miha y Zimic Nikolaj (2003). *Boids with a fuzzy way of thinking*. University of Ljubljana (Eslovenia). Faculty of Computer and Information Science. Recuperado el 14 de octubre de 2014, del sitio Web: [http://lrs.fri.uni-lj.si/people/ilbajec/papers/ilb\\_asc03.pdf](http://lrs.fri.uni-lj.si/people/ilbajec/papers/ilb_asc03.pdf)
4. Costa D.O. (2011). *Modeling identification and control of a quadrotor, aircraft*. Master's thesis, Czech Technical University in Prague Czech Technical University in Prague Czech Technical University in Prague.
5. Passino, M. K. (2004). *Biomimicry for Optimization, Control, and Automation*. Capítulo 6, planning systems.
6. Reynolds, C. W. *Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model*. Recuperado el 14 de octubre de 2014, del sitio Web: <http://www.cs.toronto.edu/~dt/siggraph97-course/cwr87/>
7. Rich, E y Knight, K. (1994) *Inteligencia Artificial*. Madrid: McGraw-Hill, D.L.
8. Schermuk, D. M. (2012) *Diseño e Implementación de un controlador para la Orientación de un QuadRotor*. Tesis de Grado de Ingeniería Electrónica. Universidad de Buenos Aires.

#### 4. Contenidos

El documento se encuentra organizado de la siguiente forma:

Capítulo 1, presenta el planteamiento del problema y su delimitación, además se proyecta su perfil a lo largo de los objetivos propuestos y la justificación.

Capítulo 2, desarrolla la temática referente al marco de referencia de antecedentes teóricos. En particular se hace énfasis en el modelamiento del Cuatricóptero, modelo "boids", campos potenciales y técnicas de control (Fuzzy y Planning).

Capítulo 3, menciona aspectos metodológicos, incluye la metodología de diseño y el diseño mismo.

Capítulo 4, presenta el proceso de desarrollo para la elaboración de los algoritmos planteados.

Capítulo 5, presenta resultados y análisis alcanzados a través de la evaluación de desempeño realizada en el desarrollo de los algoritmos de control propuestos y las conclusiones derivadas al desarrollo.

## 5. Metodología

La metodología escogida para el desarrollo del proyecto de grado es la RUP (Rational Unified Process), "la cual se caracteriza por ser un proceso de ingeniería de software de desarrollo interactivo e incremental, su objetivo es asegurar la producción de software de alta calidad, la forma en que se estructura y sus objetivos hace de éste método el más apropiado para ser implementado" (Gómez, 2007).

FASES Y ACTIVIDADES A REALIZAR:

• FASE INICIO:

Colección de la información

Análisis e interpretación de la información.

• FASE DE ELABORACIÓN:

Diseño de algoritmo para el control de posición de un Cuatricóptero.

Diseño de plataforma de simulación.

Creación de algunos escenarios de prueba para las técnicas de control implementadas.

• FASE DE CONSTRUCCION:

Diseño y prueba de algoritmo en el cual un equipo de Cuatricópteros naveguen sin obstáculos.

Diseño y prueba de algoritmo en el cual un equipo de Cuatricópteros naveguen con obstáculos.

• FASE TRANSICIÓN:

Prueba y mejoramiento del sistema final.

## 6. Conclusiones

- Este trabajo se ha dedicado a desarrollar dos algoritmos que entregan la referencia al control de posición para la navegación de grupo de Cuatricópteros en un ambiente en 3D, el cual pretende que el enjambre llegue a la posición deseada de forma autónoma. Por tanto, no se trata de

analizar un Cuatricóptero en concreto, ni tipos de maniobra en particular, tampoco alteración de la estructura para la obtención de resultados, aun así fue pertinente el estudio de su modelamiento matemático y su comportamiento dinámico, basado en modelos existentes desarrollados en investigaciones a nivel mundial.

- Según los resultados obtenidos al verificar las dos técnicas con diferentes condiciones se puede afirmar que la técnica más efectiva es la de Planning Systems, ya que la referencia de posición para los Cuatricópteros es más estable, evade de la mejor forma los obstáculos, además requiere de menos iteraciones para cumplir el objetivo.
- Con la técnica de Planning Systems es más fácil modificar algunos parámetros como la distancia de navegación de los miembros del enjambre, solo bastas con modificar el coeficiente de las variables cohesión y separación, en cambio con la otra técnica se debe modificar las funciones de membresía del Control Fuzzy.
- Las dos técnicas sin la presencia de obstáculos tienen una característica de desempeño similar en cantidad de iteraciones necesarias para cumplir el objetivo, tiempo y referencias de posición de los Cuatricópteros.
- Las trayectorias de navegación del enjambre de Cuatricópteros cuando parte en coordenadas cercanas, tienen un mejor rendimiento con la técnica de Planning Sytems. Pero el Control Fuzzy genera mejores trayectorias cuando el grupo de Cuatricópteros parten en una posición relativamente grande entre ellos.

<b>Elaborado por:</b>	Sergio Fidel Castiblanco Gómez		
<b>Revisado por:</b>	Diego Mauricio Rivera		
<b>Fecha de elaboración del Resumen:</b>	21	10	2014



## Índice general

Índice general	II
Índice de tablas	V
Índice de figuras	VI

### **Capítulo 1.....1**

1. Planteamiento del problema.....1	1
1.1. Identificación y formulación del problema.....1	1
1.2. Justificación.....2	2
1.3. Delimitación.....2	2
1.4. Objetivos del proyecto.....3	3
1.4.1. Objetivo general.....3	3
1.4.2. Objetivos específicos.....3	3
2. Antecedentes (Estado del arte).....4	4

### **Capítulo 2.....8**

2. Marco de referencia .....8	8
2.1. Introducción.....8	8
2.2. Cuatricópteros.....8	8
2.2.1. Estructura del Cuatricópteros .....10	10
2.2.2 Cinemática.....11	11
2.2.3. Dinámica.....11	11

2.3. Sistema de Control.....	13
2.3.1. Control Fuzzy .....	14
2.3.2. Planning Systems.....	15
2.4. Boid .....	16
2.4.1. Boids.....	16
2.4.2. Reglas Boids.....	17
2.5. Campos potenciales.....	18
<b>Capítulo 3.....</b>	<b>20</b>
3. Marco metodológico.....	20
3.1. Metodología.....	20
3.2 Estrategia de análisis.....	21
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>23</b>
4. Desarrollo proyecto.....	23
4.1 Desarrollo Técnico.....	23
4.1.1. Desarrollo algoritmo de control Planning Systems.....	23
4.1.1.1. Calcular la distancia entre varios puntos (Cuatricópteros).....	23
4.1.1.2. Calcular separación y cohesión inspirado en los Boids.....	25
4.1.1.3. Meta.....	27
4.1.1.4. Calcular obstáculos.....	29
4.1.1.5. La suma vectorial (Separación, cohesión, vector meta y vectores obstáculo).....	40
4.1.2. Desarrollo algoritmo de control Fuzzy.....	42

4.1.2.1. Calcular la distancia entre varios puntos (Cuatricoptores).....	43
4.1.2.2. Calcular separación y cohesión inspirado en los Boids siguiendo la Lógica difusa.....	43
4.1.2.3. Calcular meta.....	47
4.1.2.4. Calcular Obstáculos.....	47
4.1.2.5. Suma vectorial de Cohesión, Separación, obstáculo y meta.....	48
4.2. Desarrollo plataforma de visualización y simulación.....	49
<b>Capítulo 5.....</b>	<b>51</b>
5. Análisis y resultados.....	51
5.1 Planning Systems.....	51
5.2 Control Fuzzy.....	51
5.3 Funcionamiento y Comparación entre Planning Systems y Control Fuzzy.....	56
5.3.1. Funcionamiento técnicas sin obstáculos.....	56
5.3.2 Funcionamiento técnicas con obstáculos.....	59
5.4. Conclusiones.....	65
5.5. Trabajos futuros.....	65
<b>Bibliografía.....</b>	<b>67</b>

## **Anexos**

Parte de Algoritmos.

## **Índice de tablas.**

---

- 4.1. Membresías elegidas para Control Fuzzy de la regla de Separación y Cohesión.
- 5.1. Coordenadas de cuatro Cuatricópteros, Planning Systems sin obstáculos.
- 5.2. Coordenadas de cuatro Cuatricópteros, Control Fuzzy sin obstáculos.
- 5.3. Coordenadas de Cuatricópteros, Planning Systems con obstáculos.
- 5.4. Coordenadas de Cuatricópteros, Control Fuzzy con obstáculos.
- 5.5. Coordenadas de Cuatricópteros, Planning Systems con obstáculos.
- 5.6. Coordenadas de Cuatricópteros, Control Fuzzy con obstáculos.

---

## **Índice de figuras.**

---

- 2.1. Cuatricóptero.
- 2.2. Sistema de referencia para el modelo del Cuatricóptero.
- 2.3. Sensado para encontrar el punto mínimo y allí moverse.
- 2.4. Contorno del medio ambiente en dos dimensiones en el cual se puede observar además posición de llegada y partida y cinco obstáculos.
- 2.5. Reglas de los Boids.
  - 4.1. Ubicación de tres Cuatricóptero en el espacio virtual.
  - 4.2. Regla de Cohesión entre tres Boids.
  - 4.3. Regla de la Separación entre tres Cuatricópteros en el espacio virtual.
  - 4.4. Diagrama de vectores de reglas cohesión y separación.
  - 4.5. Representación de Reglas: (Cohesión, Separación y meta).

- 4.6. Efectos de la Separación, con dos valores distintos de unión entre miembros del enjambre (a y b).
- 4.7. Diagrama de vectorial de Separación, Cohesión y Meta para tres Cuatricópteros.
- 4.8. Algoritmo Planning Systems en 3D.
- 4.9. Navegación de tres Cuatricópteros Planning Systems en 3D.
- 4.10. Entrada y salida del Sistema Fuzzy para la Cohesión.
- 4.11. Reglas del Sistema Fuzzy para la Cohesión. (a y b).
- 4.12. Regla Fuzzy para separación y cohesión.
- 4.13. Regla número uno, Obstáculo. Efecto medio de repulsión sobre el Cuatricóptero.
- 4.14. Regla número dos, Obstáculo. Efecto nulo de repulsión sobre el Cuatricóptero.
- 4.15. Regla número tres, Obstáculo. Efecto alto de repulsión sobre el Cuatricóptero.
- 4.16. Regla de la Separación entre tres Cuatricópteros en el espacio virtual. (Repulsión)
- 4.17. Regla de la Separación entre tres Cuatricópteros en el espacio virtual. (Atracción)
- 4.18. Efecto de atracción meta a Cuatricópteros).
- 4.19. Repulsión entre Obstáculo y tres Cuatricópteros en el espacio virtual 3D.
- 4.20. Navegación de tres Cuatricópteros utilizando Control Fuzzy.
- 4.21. Plataforma de visualización y simulación para los algoritmos.
- 5.1. Trayectoria Planning Systems de cuatro Cuatricópteros, sin obstáculos.
- 5.2. Trayectoria Control Fuzzy de cuatro Cuatricópteros, sin obstáculos.
- 5.3. Trayectoria Planning Systems de tres Cuatricópteros, con obstáculos.
- 5.4. Trayectoria Control Fuzzy de tres Cuatricópteros, con obstáculos.
- 5.5. Trayectoria Planning Systems de tres Cuatricópteros, con obstáculos.
- 5.6. Trayectoria Control Fuzzy de tres Cuatricópteros, con obstáculos.
- 5.7. Zoom a la Trayectoria Control Fuzzy de tres Cuatricópteros, con obstáculos.

---

El presente trabajo investigativo desarrolló dos algoritmos para simular el control de posición de un equipo de Cuatricópteros, en el cual se pueda verificar el funcionamiento de las dos técnicas de Control Inteligente implementadas, una basada en Fuzzy Control y otra en Planning Systems. Se pretende que el grupo pueda llegar a una posición deseada de forma autónoma; los algoritmos fueron elaborados por medio de la herramienta de software matemático MATLAB.

Para desarrollar este trabajo se inició con una recolección de información referente a la temática inmersa en el proyecto, luego se realizó un análisis, diseño e implementación orientada a la base de la construcción, de igual forma se procede a realizar pruebas por medio de iteraciones buscando cumplir todos los objetivos propuestos. A partir de esto se hace un análisis al rendimiento de los dos algoritmos para encontrar el más acertado, el que cumple con mayor exactitud el objetivo final.

En los algoritmos un grupo de Cuatricópteros navega en un entorno virtual, cuyo objetivo es controlar la posición de los miembros del enjambre para llegar a un lugar deseado, evitando colisiones entre ellos y superando posibles obstáculos que se encuentren en el camino, para esto se usaron las reglas básicas de los Boids y Campos Potenciales. Por tanto, no se trata de analizar en concreto, ni tipos de maniobra en particular, tampoco alteración de la estructura para la obtención de resultados.





---

### 1. Planteamiento del problema

---

#### 1.1 . Identificación y formulación del problema

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV, Unmanned Air Vehicle) son objeto de investigación, debido a su gran aplicabilidad en varios campos de desarrollo, tanto en la parte militar como en la civil y ayudan al hombre a interactuar con áreas o lugares potencialmente peligrosos o de difícil acceso, ya que se usan principalmente en espacios con adversidades, generalmente en desastres naturales, vigilancia, búsquedas, rescates e inspección de instalaciones, estructuras o personas. Es así como vuelo autónomo, es uno de los objetivos de un sistema de control de navegación, tiene la capacidad de realizar tareas de forma automática y se caracteriza por ser el nivel superior en el control de sistemas de vuelo.

Debido a lo anterior se da la necesidad de diseñar un control de posición para un equipo de Cuatricópteros, el cual se caracteriza por llegar a un lugar deseado de forma autónoma en un ambiente desconocido para el grupo, sorteando de la mejor manera los posibles obstáculos que se presentan en el camino y evitando el choque entre los Cuatricópteros. Para implementar dicha función, se utilizan dos técnicas de Control inteligente, una basada en Control Fuzzy y otra en Planning Systems, de igual forma se usan las tres reglas básicas de los Boids, que permiten que el grupo de Cuatricópteros naveguen de forma correcta en el ambiente virtual.

## 1.2. Justificación.

Se considera este trabajo investigativo pertinente e importante ya que permite tener un acercamiento a dos de las técnicas de control inteligente y así mismo darle aplicabilidad en sistemas de navegación autónomo, conociendo la importancia que tiene en diversos campos de la vida cotidiana, brindando herramientas para interactuar con áreas o lugares potencialmente peligrosos o de difícil acceso para el hombre, desastres naturales, vigilancia, búsquedas, rescates e inspección de instalaciones, estructuras o personas.

Además abre las puertas a nuevas formas de desarrollo de sistemas que puedan ser implementados en la vida real, solucionando algunas de las posibles problemáticas y supliendo necesidades antes mencionadas.

Anteriormente se mencionaron algunas de las posibles aplicaciones, pero es importante mencionar que estos Cuatricópteros tienen un campo de desarrollo mucho más amplio, ya que pueden utilizarse en aspectos simples de la vida, como entregar una correspondencia, activar un interruptor o movilizar un objeto de un lugar a otro, hasta la solución de problemas y desarrollos más robustos. Desarrollado en el campo militar, industrial y civil.

## 1.3. Delimitación

Se entrega algoritmos para simular el control de posición de un equipo de Cuatricópteros, en el cual se pueda verificar el funcionamiento de las dos técnicas de Control Inteligente implementadas, una basada en Control Fuzzy y Planning Systems. Se pretende que el grupo de Cuatricópteros pueda llegar a una posición deseada de forma autónoma, con las características anteriormente mencionadas. Además se puede modificar

parámetros del algoritmo (posición deseada, cantidad de Cuatricópteros, ubicación, distancia mínima entre ellos).

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo general

Diseñar un ambiente virtual y algoritmo para el control de posición de un grupo de Cuatricópteros, usando técnicas de control inteligente y siguiendo las reglas de los boids, que permita evadir obstáculos, llegar a una posición deseada y evitar choques entre Cuatricópteros.

### 1.4.2 Objetivos específicos

1. Realizar el control de los Cuatricópteros utilizando dos técnicas de control inteligente, una basada en Control Fuzzy y otra en Planning Systems, en el cual un equipo de Cuatricópteros naveguen en un ambiente libre y con obstáculos.
2. Diseñar e implementar una plataforma de simulación, en la que se pueda verificar el funcionamiento de las técnicas de control implementadas, y además se puedan modificar parámetros del algoritmo.
3. Crear algunos escenarios de prueba para las técnicas de control implementadas, para poder contrastar las técnicas de Control Fuzzy y Planning Systems

## 2. Antecedentes (Estado del arte)

No se tiene exactitud histórica del inicio en el que el hombre empezó a desarrollar y trabajar con vehículos aéreos no tripulados (UAV, Unmanned Air Vehicle), se tienen registros de que el principio de estas máquinas se remonta a los años 1849, un simple mecanismo que contenía bombas se utilizó en el ataque a la ciudad de Italia (Venecia). En la Primera y Segunda Guerra Mundial inicio con fuerza el estudio, desarrollo y diseño de UAV, enfocado a aplicaciones militares, creando vehículos radio controlados. El ejército Norteamericano desarrolló un UAV, con el fin de atender con objetivos deseados, dicha nave contenía explosivos. De igual forma se desarrollaron naves no tripuladas con el fin de espionaje y reconocimiento.

Posteriormente los UAV tenían cámaras y mejoras en la parte de electrónica y comunicaciones.

Los vehículos no tripulados, son objeto de estudio en los últimos años con mayor frecuencia, debido a su gran utilidad y aplicación en varios campos de la ciencia, como la vida cotidiana, entre algunas:

- ✓ Vigilancia de tierras.
- ✓ Control de fronteras.
- ✓ Mediciones meteorológicas, atmosféricas, climáticas.
- ✓ Vigilancia y control de líneas del tendido eléctrico, oleoductos y represas de agua.
- ✓ Prevención, lucha, rescate.
- ✓ Vigilancia de carreteras, tráfico, accidentes.
- ✓ Búsqueda de personas perdidas en ambientes con condiciones adversas.
- ✓ Desastres naturales
- ✓ Terremotos.
- ✓ Terrorismo.
- ✓ Agricultura, control de siembras
- ✓ Cámaras aéreas.
- ✓ Seguridad ciudadana.
- ✓ Entrega de correspondencia.

La historia de los Cuatricópteros inicia a principios del siglo XX, donde el francés Charles Richet, diseñó una estructura la cual no funcionó, pero dio principio para que años después se desarrollara un Cuatricóptero tripulado. Posteriormente, en 1956, se desarrolló un prototipo para uso militar y civil, el cual voló satisfactoriamente.

“A finales de los años 90, Bell y Boing trabajaron conjuntamente en el desarrollo de un tripulado llamado Quad Tiltrotor” (Sánchez y Ruiz, 2011). El cual se caracterizaba por permitir el despegue vertical, con los rotores paralelos al suelo y podía sobrevolar de avance, gracias a los movimientos de los cuatro rotores.

Con los Cuatricópteros se pretende desarrollar sistemas de control para el vuelo, en el cual podemos mencionar tres estructuras fundamentales que se centran en:

- ✓ Incrementar la estabilidad, el cual permite estabilizar el sistema con mayor exactitud y precisión, con un proceso de control simple, el cual controla comportamiento dinámico del sistema.
- ✓ Incrementar el comportamiento, a demás de estabilizar la nave, estos sistemas deben solucionar una respuesta con ciertas prestaciones a referencias.
- ✓ Vuelo autónomo, Son sistemas de control totalmente autónomo que tienen la capacidad de realizar tareas de forma automática, es el nivel superior en el control de sistemas de vuelo y actualmente el que tiene más auge y estudio investigativo, enfocado a múltiples aplicaciones.

El aporte de trabajos desarrollados, que fueron base conceptual y ayudaron al proceso de investigación que se adelantó en el presente trabajo de grado, se mencionará a continuación:

Passino, K. (2004), en su libro trata de emular la inteligencia humana, creando elementos para decidir cómo controlar un sistema, realizando representaciones que permiten hacer predicciones sobre el medio ambiente y cómo reaccionaría a distintos planes, para elegir entre los planes alternativos y ejecutar una secuencia de acciones que sólo se encuentra en los organismos superiores, lo cual se realiza por medio de simples reglas. Esto permitió que en este proyecto de grado se analice el funcionamiento de la técnica de control Planning Systems propuesta por el autor, tomando la base teórica para la elaboración del primer algoritmo propuesto buscando cumplir con los objetivos propuestos.

Morata, F. (2008-2009). En este trabajo se implementó y simuló un control Fuzzy para estabilizar el movimiento de un Cuatricóptero, lo cual contribuyo a este proyecto ya que sirvió para el análisis del funcionamiento de Cuatricóptero, su modelamiento matemático y dinámico, además se analizó el sistema de control Fuzzy implementado para la estabilización del movimiento.

Lebar, B., Mraz, M. y Zimic, N (2003). En este artículo se realizó un estudio que se caracteriza por analizar la toma de decisiones por parte de algunos animales que interactúan en grupo (Boids), aproximando reglas o comportamientos similares que pueden ser implementadas con lógica difusa, por su similitud, este artículo permitió evidenciar la utilidad y aplicación de las reglas de los boids e implementación de sistemas autónomos de vuelo.

Schermuk, D. (2012). En este trabajo se presentó el desarrollo y validación experimental de un control para un Cuatricóptero, utilizando un control PID y un control LQR como parte de la estrategia de control, usando dos formas de estabilización de la aeronave. Lo cual sirvió a este proyecto para el análisis del modelamiento matemático del Cuatricóptero, proporcionando también información importante para marco de referencia y estado del arte.

Reynolds, C. W. (1986), diseño el modelo matemático para el vuelo de un enjambre, el cual se centra en explicar las tres reglas básicas que rigen su modelo. Este trabajo aporta al presente proyecto de grado, ya que para la realización de los dos algoritmos se utilizó la regla de separación y cohesión de los boids, para el vuelo del enjambre de los Cuatricópteros.

Centes, C. y Saotome, O (2012). Realizan un trabajo investigativo enfocado en el movimiento de un enjambre utilizando campo potencial, el cual se realizará en un ambiente 3D. Este trabajo permitió utilizar para el movimiento de un enjambre el concepto de campo potencial que se usó en las reglas de cohesión y separación en los algoritmos implementados.

Así como el trabajo de Espitia, H.E. y Sofrony (2012), en el cual se realiza un algoritmo para planear trayectorias de robots móviles, empleando campos potenciales y enjambres de partículas activas brownianas.

---

### 2. Marco de referencia.

---

#### 2.1 Introducción.

Es pertinente mencionar que se entiende por Inteligencia Artificial “es la parte de las Ciencias de la computación que se ocupa del diseño de sistemas informáticos inteligentes, esto es sistemas que exhiben las características que asociamos con la inteligencia en el comportamiento humano” (Barr & Feigemaum, ‘80s), otra apreciación: “La Inteligencia Artificial es el estudio de cómo hacer que las computadoras hagan cosas que hasta el momento, los humanos hacen mejor” (Rich & Knight, 1994). El objetivo de un sistema de control automático o inteligente “es encontrar un dispositivo externo al sistemas dinámico a controlar (el controlador o compensador) que proporcione una señal adecuada al mismo para que la salida del sistema tenga características deseadas” (Caicedo).

#### 2.2. Cuatricópteros

“Cuatricóptero, consiste en una estructura central donde se encuentran las baterías y la aviónica del dispositivo unida a cuatro largueros con un conjunto propulsor (motor-hélice) en el extremo de cada larguero, formando una cruz perfecta brindando la posibilidad de sustentarse en el aire controlando su orientación y traslación”(Peña, Vivas & Rodríguez, 2010).

Tiene varias ventajas comparadas con un helicóptero común, entre ellas están: la estabilidad del aparato, mayor maniobrabilidad, mayor sencillez mecánica y mayor capacidad de carga. “Un Cuatricóptero se controla variando la velocidad angular de los



cuatro motores. En el motor delantero y trasero rotan en sentido horario mientras que los laterales rotan en sentido contrario a las manecillas del reloj. Con ello, los efectos giroscópicos y los momentos aerodinámicos tienden a cancelarse en vuelos estacionarios.

El movimiento de un cuerpo rígido posee seis grados de libertad: tres de ellos definen la posición de un punto de referencia en el cuerpo: (altura, desplazamiento vertical y desplazamiento horizontal), y los otros tres definen la orientación del cuerpo: (alabeo, cabeceo y guiñada)” (Morata, 2008-2009).



Fig. 2.1: Cuatricóptero. [Imagen de Rollin Bishop]. (2012). Tomado de: <http://www.themarysue.com/thought-controlled-quadrotor/#geekosystem>

Es importante para el proceso de control de Cuatricópteros conocer variables fundamentales como la posición, orientación y velocidad. Para ello se utiliza dos alternativas, que serán mencionadas a continuación:

- ✓ “Navegación inercial, que se basa en la medición de aceleraciones y velocidades de angulares en el vehículo. Generalmente se utilizan giróscopos y acelerómetros, los

cuales pueden ser complementados con magnetómetros, barómetros, GPS, etc. a fin de evitar derivas temporales en las mediciones”. (Woodman, 2007)

- ✓ Seguimiento visual, se caracteriza en ubicar cámaras con el fin del rastreo, estableciendo su posición y orientación.

El presente trabajo se orienta al objetivo de sistema de control de vuelo, basado en la fase sistemas de pilotaje automático (Autopilots), que se caracteriza porque “constituyen el nivel de control jerárquicamente superior. Son sistemas de control totalmente automáticos que son capaces de realizar por sí solos ciertos tipos de maniobras, como por ejemplo, el despegue, el aterrizaje, o vuelo estacionario a cierta altura” (Schermuk, D. 2012).

### 2.2.1. Estructura del Cuatricóptero.

A continuación se detallan los elementos básicos que componen un simple Cuatricóptero

- ✓ Base, consiste en una estructura central, formando una cruz perfecta, donde se encuentran las baterías y los cuatro motor-hélice en el extremo de cada esquina. está compuesta generalmente de materiales como el de aluminio y piezas de fibra de carbono.
- ✓ Rotores, El Cuatricóptero cuenta con cuatro motores , “los cuales son los encargados de convertir la fuerza eléctrica, provista por la batería, en la fuerza mecánica requerida para accionar la aeronave, regulando su velocidad a través de los comandos enviados a las tarjetas electrónicas”(Schermuk D., 2012). Y hélices, son hechas generalmente de una combinación de Nylon y Carbono.
- ✓ Controladores de Velocidad, “estos funcionan como onduladores de corriente, accionando los diferentes bobinados del motor y controlando así su velocidad. Las

tarjetas electrónicas reciben una señal de referencia, cuyas características dependen de cada modelo en particular, a partir de la cual establecen la velocidad de rotación del motor” (Schermuk D., 2012).

- ✓ Batería, Para la alimentación del Cuatricópteros se utiliza generalmente baterías de Litio-Polímero.
- ✓ Tarjeta electrónica, Generalmente cuentan con una tarjeta la cual funciona para la adquisición y procesamiento de datos; algunas cuentan con sensores, acelerómetros, giróscopos, magnetómetros, barómetro, etc.

### 2.2.2. Cinemática

El movimiento de un cuerpo rígido posee seis grados de libertad: tres de ellos definen la posición de un punto de referencia en el cuerpo y los otros tres definen la orientación del cuerpo” (Morata, 2008-2009)

### 2.2.3. Dinámica.

Siguiendo el modelamiento de la dinámica propuesto por (Costa, M., 2011), que se caracteriza por utilizar “el sistema de referencia  $O^B$ , con sus ejes ortogonales X, Y y Z. A partir de este sistema de referencia se definirán el vector de velocidades

$\Omega = [p \ q \ r]^T$  y el vector de rotaciones  $\Omega = [p \ q \ r]^T$ ”.

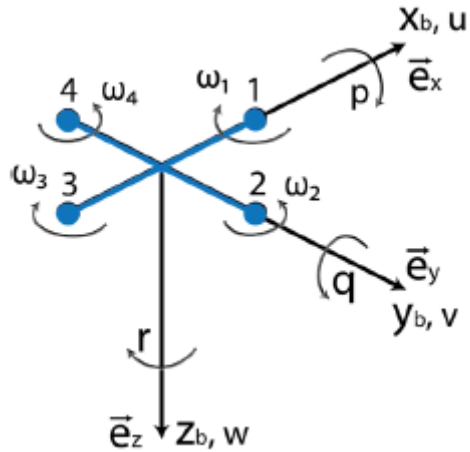


Fig.2.2 Sistema de referencia para el modelo del Cuatricóptero. [Imagen de Daniel Schermuk]. (Buenos Aires, 2013).

Para cualquier sistema de referencia inercial se deberá cumplir la ecuación de torque:

$$\vec{M} \triangleq \frac{d\vec{L}}{dt} = \frac{d}{dt} (\vec{I} \cdot \vec{\Omega}) \quad (2.1.)$$

Siendo I el tensor de inercia del cuerpo en cuestión:

$$\vec{I} = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.2.)$$

Donde se tomará la simplificación  $I_{ij} = 0 \forall i \neq j$ , la cual es válida para cuerpos con distribución de masa simétrica. Esto conlleva a la matriz

$$\vec{I} = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Se desarrollarán el producto vectorial, para hallar cada una de las tres ecuaciones de momento de cada eje. Estas ecuaciones implican que la rotación en torno a dos ejes

generará un torque en el tercero, ecuación (2.4.). Utilizando un razonamiento análogo al anterior, se pueden deducir las ecuaciones de traslación del Cuatricóptero.

$$\begin{aligned} M_x &= I_x \dot{p} + (I_z - I_y) qr \\ M_y &= I_y \dot{q} + (I_x - I_z) rp \\ M_z &= I_z \dot{r} + (I_y - I_x) pq \end{aligned} \quad (2.4.)$$

La segunda ley de Newton para un sistema de referencia inercial:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} = \frac{d}{dt} (m \cdot \vec{V}) \quad (2.5.)$$

“Donde,  $m$  es la masa total del Cuatricóptero y  $P$  su momento lineal y refiriendo esta ecuación al sistema de referencia solidario al cuerpo del vehículo y considerando los efectos relacionados con su carácter no inercial se obtiene”:

$$\vec{F} = \left( \frac{d\vec{P}}{dt} \right)_{\text{cuerpo}} + \vec{\Omega} \times \vec{P} \iff \vec{F} = m (\dot{\vec{V}} + \vec{\Omega} \times \vec{V}) \quad (2.6.)$$

Se desarrolla el producto vectorial se obtiene:

$$\begin{aligned} F_x &= m (\dot{u} + qw - vr) \\ F_y &= m (\dot{v} + ru - wp) \\ F_z &= m (\dot{w} + pv - uq) \end{aligned} \quad (2.7.)$$

De este modo se logra modelar la dinámica del cuerpo de la aeronave en un conjunto de ecuaciones, que permiten la descripción matemática del sistema físico.

### 2.3. Sistemas de Control.

Es pertinente mencionar que se entiende por Inteligencia Artificial “es la parte de las Ciencias de la computación que se ocupa del diseño de sistemas informáticos inteligentes, esto es sistemas que exhiben las características que asociamos con la inteligencia en el comportamiento humano” (Barr & Feigemaum, ‘80s), otra apreciación:

“La Inteligencia Artificial es el estudio de cómo hacer que las computadoras hagan cosas que hasta el momento, los humanos hacen mejor” (Rich & Knight, 1994). El objetivo de un sistema de control automático o inteligente “es encontrar un dispositivo externo al sistemas dinámico a controlar (el controlador o compensador) que proporcione una señal adecuada al mismo para que la salida del sistema tenga características deseadas” (Caicedo).

Entre las técnicas de Control Inteligente se utilizarán las siguientes:

### 2.3.1 Control Difuso (Fuzzy logic)

“La lógica difusa es una técnica contenida en la inteligencia computacional, que usa los principios y lenguaje semejante a como lo hacen los seres humanos, en la solución de problemas. En el campo del control de procesos la lógica difusa se aplica desde hace varias décadas con excelentes resultados en el control de procesos no lineales”. (Gutiérrez, 2009)

El control difuso se caracteriza por estar formado de conjuntos difusos, en el que el grado de pertenencia de una función puede tomar además de valores uno o cero, valores intermedios. La lógica difusa es una herramienta eficaz para el control de subsistemas y procesos industriales complicados y su principal objetivo es “crear un sistema que teniendo como entradas ciertas trayectorias deseadas, obtiene como salida la correspondiente consigna de control” (Morata, 2008-2009). La lógica Difusa es una buena herramienta cuando los datos no son precisos.

La historia de controladores difusos tiene su origen en Mandami (Mandami, 1974) y Sugeno (Sugeno, 1985) que mediante una jerarquía de módulos básicos, las estrategias borrosas planteadas posibilitan la ejecución de maniobras complejas. A partir de ahí, se han sucedido numerosas aplicaciones con esta técnica, haciendo acciones más agresivas sin perder la robustez y suavidad de la técnica.

Su fundamento principal es obtener una salida de control deseada, la cual depende de entradas deseadas.

### 2.3.2. Planning Systems.

Es un sistema de control avanzado el cual se caracteriza por tratar de emular la inteligencia humana, creando elementos para decidir cómo controlar un sistema, “realizando representaciones para generar predicciones del medio con el cual va interactuar” (Passino K., 2004).

Es un sistema de control avanzado que se caracteriza por tratar de emular la inteligencia humana, realizando representaciones para generar predicciones sobre el medio ambiente y cómo reaccionaría a distintos planes, para elegir entre los planes alternativos, y ejecutar una secuencia de acciones, que sólo se encuentra en los organismos superiores, planificación que se realizan por medio de simples reglas.

Es importante mencionar que el vehículo conoce su posición propia y la posición a la cual desea llegar; este se va moviendo sobre el medio ambiente que es una rejilla fina descendiente en busca de la posición final, buscando moverse a puntos mínimos evitando los obstáculos, debido al descenso de la función gaussiana. El sistema predice cual es el mínimo en cada interacción, ya que la técnica hace un barrido de 360° sobre él (fig.2.3.) y detecta el menor valor en altitud, entonces se movería a la posición más favorable sin perder de vista la meta principal.

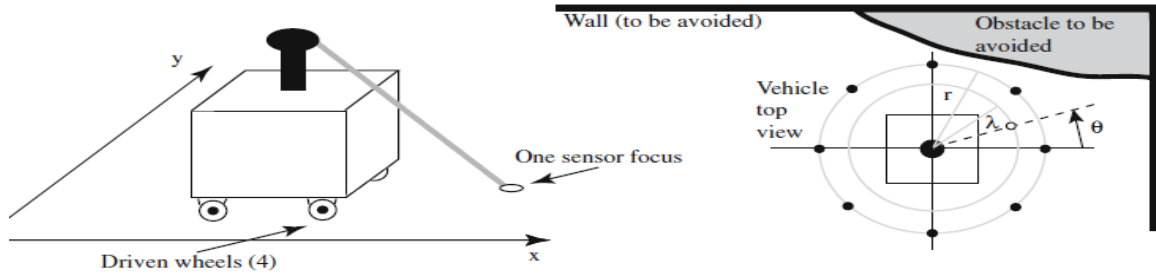


Fig.2.3 Sensado para encontrar el punto mínimo y allí moverse. [Imagen de Kevin Passino]. (2012).

Contorno del medio ambiente en dos dimensiones, Posición (o) y posición de partida(x)

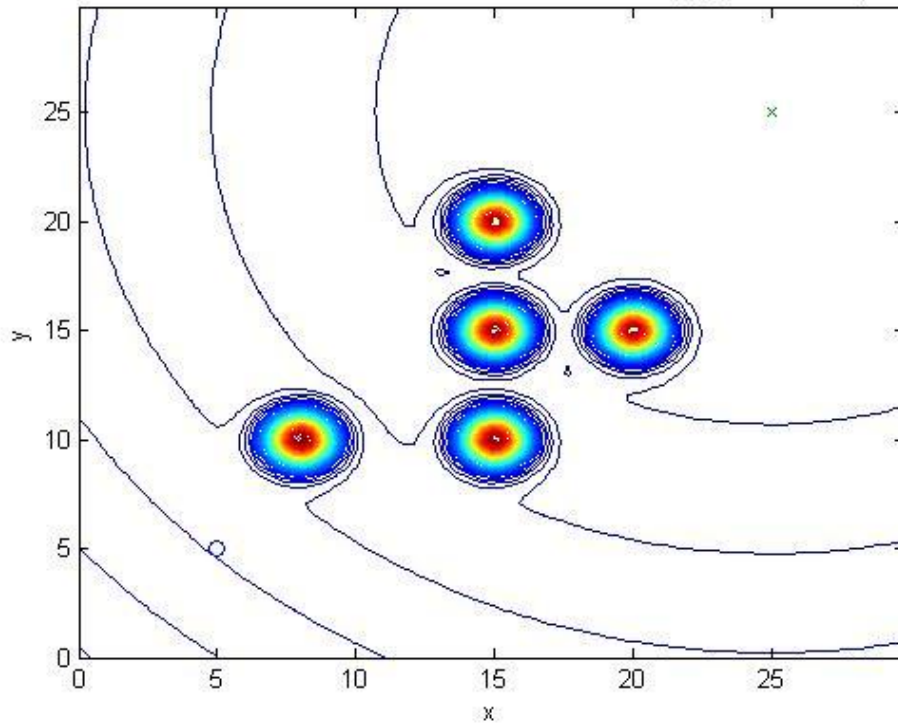


Fig.2.4. Contorno del medio ambiente en dos dimensiones en el cual se puede observar además posición de llegada y partida y cinco obstáculos. [Imagen de Kevin Passino]. (2012). Tomada Software Matlab.

## 2.4 “Boid”.

### 2.4.1 “Boids”.

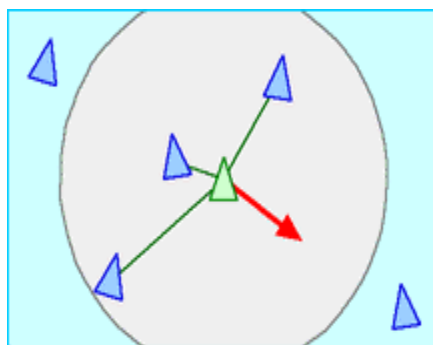
Es un modelo informático que simula el movimiento en manada de algunos animales, por ejemplo: aves y peces; fue creado en 1986 por Craig Reynolds. “Se basa utilizando geometría tridimensional computacional, utilizando la animación por ordenador



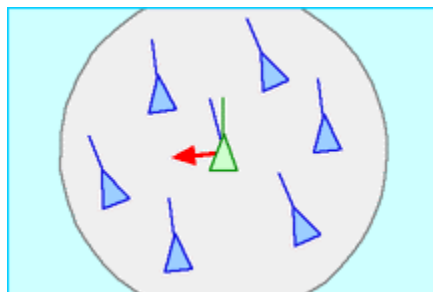
o el diseño asistido por ordenador. El modelo básico cuenta con tres simples reglas o comportamientos de dirección, que describen como un miembro del enjambre maniobra individualmente basado en las posiciones y velocidades de los demás miembros de la manada” (Reynolds, 1986).

Para el movimiento del enjambre se utiliza un modelo de campos de fuerza en el cual existe una fuerza de repulsión o atracción tanto del obstáculo como a los demás miembros del enjambre, los campos de fuerza tienden a ser fuerte cerca y demasiado débil lejos; los “boids” son atraídos a medida que se alejan de los demás miembros del enjambre y son rechazados a medida que se acercan a un boid, de igual forma ocurre con los obstáculos, los boids son rechazados a medida que se acerca al obstáculo.

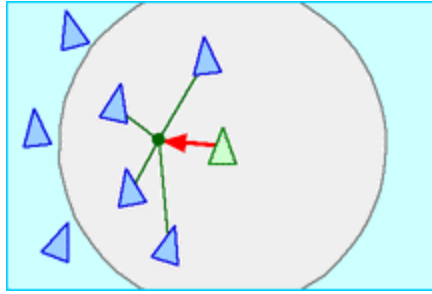
2.4.2 Las tres reglas y sus principales características son las siguientes:



Separación: Un boid debe conservar una distancia mínima con respecto a otro boid o cualquier objeto ubicado en el ambiente de la simulación.



Alineación: Un boid debe igualar la velocidad de los demás miembros del grupo.



Cohesión: Un boid debe moverse hacia el centro de gravedad definido por el grupo.

Fig. 2.5. Reglas de los Boids. [Imagen de Craig Reynolds]. Tomada del sitio web: <http://www.red3d.com/cwr/boids/>

## 2.5. Campos potenciales.

Cómo se comentó anteriormente, Para el movimiento de los miembros del enjambre se utiliza un modelo de campos de fuerza en el cual existe una fuerza de repulsión o atracción tanto del obstáculo cómo a los demás miembros del enjambre, los campos de fuerza tienden a ser fuerte cerca y demasiado débil lejos; los boids son atraídos a medida que se alejan de los demás boids y son rechazados a medida que se acercan a un boid, de igual forma ocurre con los obstáculos, los boids son rechazados a medida que se acerca al obstáculo.

El método de campos potenciales es una de las técnicas para la generación de trayectorias de los vehículos aéreos no tripulados, *“Entre los primeros desarrollos, existe el presentado por Khatib, que propone que los obstáculos y el robot tengan una carga eléctrica del mismo signo, con la finalidad de generar una repulsión, mientras que la meta tiene asociada una carga eléctrica de signo opuesto, para atraer el robot al punto destino”* (Espitia & Sofrony, 2012).

“Es posible utilizar el campo de potencial artificial como una entrada al controlador del robot, haciendo que el controlador de seguir el campo resultante hacia el objetivo moviendo el robot en la dirección del gradiente de  $U_{(p)}$ ”, (Bentes, C & Saotome, 2012).

Donde  $U_{(p)}$ :

$$U_{(p)} = U_{atracción (p)} + U_{repulsión (p)} \quad (2.8.)$$

La anterior formula se puede explicar de la siguiente forma, El potencial total del espacio de trabajo se obtiene al sumar los potenciales atractivos y repulsivos se generan de forma separada. “Para generar la trayectoria con estos potenciales, sólo se requiere calcular los gradientes; sin embargo, los campos potenciales pueden ser no convexos, presentando mínimos locales que dejaría estancado al robot en un punto diferente al objetivo” (Bentes,C & Saotome,2012).

---

### 3. Marco metodológico

---

#### 3.1. Metodología.

La metodología escogida para el desarrollo del trabajo de grado es la RUP (Rational Unified Process), “la cual se caracteriza por ser un proceso de ingeniería de software de desarrollo iterativo e incremental, su objetivo es asegurar la producción de software de alta calidad, la forma en que se estructura y sus objetivos hacen de éste método el más apropiado para ser implementado” (Gómez, 2007).

Tiene como método de desarrollo cuatro fases, las cuales son:

- ✓ FASE DE INICIO: Esta fase se caracteriza por recolección de la información y planeación de lo que se quiere hacer y los requisitos del mismo.
- ✓ FASE DE ELABORACIÓN: Se crea un plan de proyecto, modelamiento de la organización, análisis y una parte de implementación orientada a la base de la construcción.
- ✓ FASE DE CONSTRUCCIÓN: Construcción del algoritmo, se caracteriza por el diseño e implementación de lo propuesto, de igual forma se procede a realizar pruebas por medio de iteraciones hasta que se termine cada una de las implementaciones.
- ✓ FASE TRANSICIÓN: En esta fase se prueba que el algoritmo cumpla lo estipulado.

## FASES Y ACTIVIDADES A REALIZAR:

### ✓ FASE INICIO:

Colección de la información

Análisis e interpretación de la información.

### ✓ FASE DE ELABORACIÓN:

Diseño de algoritmo para el control de posición de un Cuatricóptero.

Diseño de plataforma de simulación.

Creación de algunos escenarios de prueba para las técnicas de control implementadas.

### ✓ FASE DE CONSTRUCCION:

Diseño y prueba de algoritmo en el cual un equipo de Cuatricópteros naveguen sin obstáculos.

Diseño y prueba de algoritmo en el cual un equipo de Cuatricópteros naveguen con obstáculos.

### ✓ FASE TRANSICIÓN:

Prueba y mejoramiento del sistema final.

Conclusiones.

## 2.2. Estrategia de análisis.

Para lograr los objetivos propuestos en el presente trabajo, se desarrolló bajo la modalidad de medios de simulaciones, implementación y detección de fallos, con base en los conceptos y a las diferentes pruebas obtenidas, el programa escogido para el desarrollo de esta investigación es MATLAB. En primer lugar se desarrollo un algoritmo de control

de posición para la navegación en un enjambre de Cuatricópteros en un espacio 3D implementando la técnica de Sistema de Planificación y otro algoritmo de control utilizando técnica de control Difuso. Realizando ensayos de acierto y encontrando posibles fallas del sistema para poder ser corregidas, buscando mejoras y ajustes en el código.

Luego realizar las modificaciones pertinentes de cada uno de los códigos, se determinará y evaluará la estructura de los algoritmos planteados, comprobando su efectividad mediante la comparación de la información y los datos obtenidos, la cual orientará el proyecto hacia una respuesta adecuada a los objetivos planteados.

El presente trabajo de grado tiene como objetivo el desarrolló, comprobación, obtención y análisis de resultados del control de posición para un enjambre de Cuatricópteros. Por tanto, no se trata de analizar un Cuatricóptero en concreto, ni tipos de maniobra en particular, tampoco alteración de la estructura para la obtención de resultados.

---

## 4. Desarrollo del Proyecto

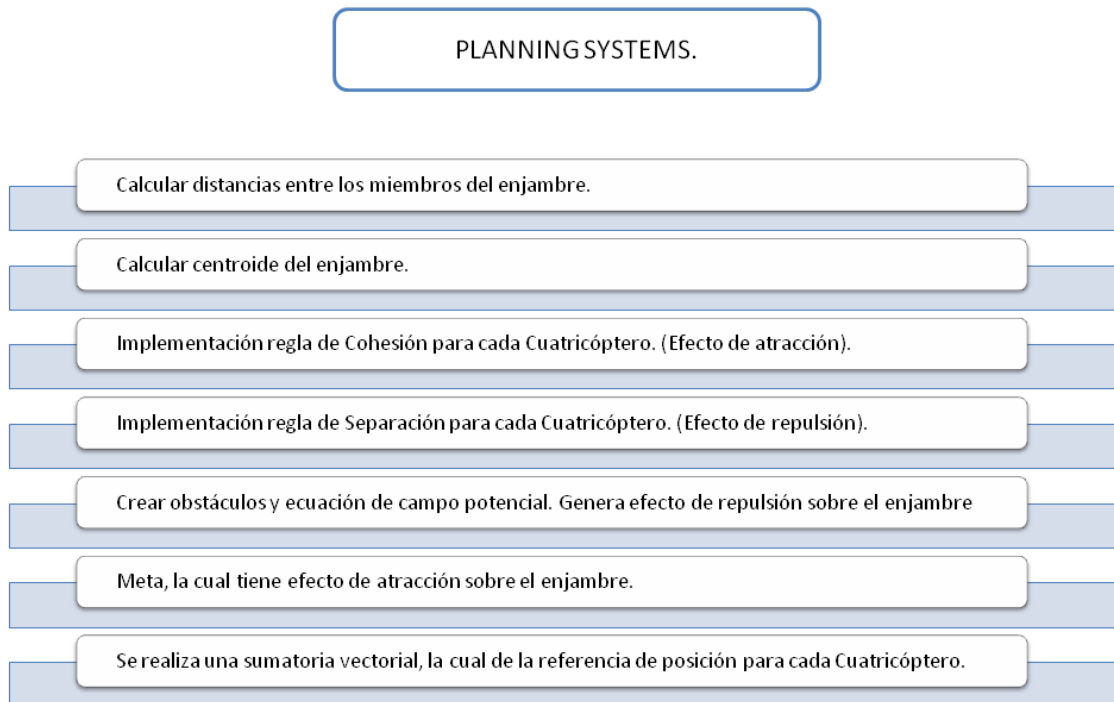
---

### 4.1. Desarrollo Técnico.

#### 4.1.1. Desarrollo algoritmo de control Sistema de Planificación.

El programa escogido para el desarrollo de este proyecto de investigación es MATLAB, en primer lugar se desarrolló un algoritmo de control de posición para la navegación de un enjambre de Cuatricópteros.

Esquema de desarrollo del algoritmo de Planning Systems.



Aspecto del desarrollo:

#### 4.1.1.1. Calcular la distancia entre varios puntos (Cuatricópteros).

Cada Cuatricóptero es ubicado en el plano cartesiano, allí se le asigna una posición en cada una de sus coordenadas (X, Y y Z), es importante conocer la ubicación del Cuatricóptero y de los demás miembros del enjambre en el espacio. Para ello se desarrolla un método simple para calcular la distancia de un punto con referencia a todos los miembros presentes en el ambiente virtual.

Como se muestra en la fig.4.1, se ubican tres miembros del enjambre en el espacio para calcular la distancia que los separa entre sí y se muestra el pseudocódigo implementado para cumplir dicho objetivo, en el que se calcula la distancia entre dos Cuatricópteros.

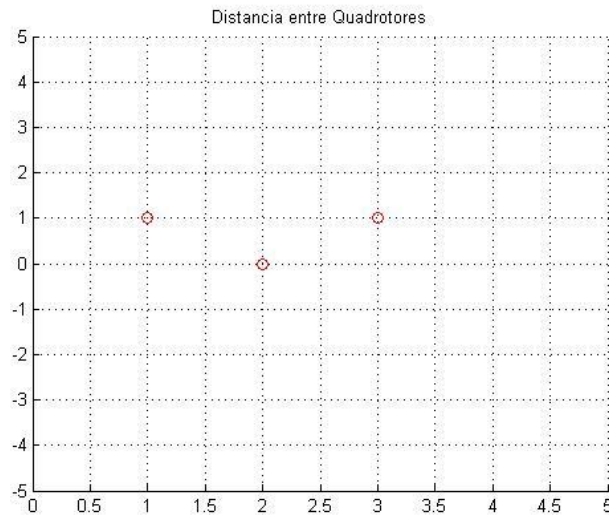


Fig.4.1. Ubicación de tres Cuatricóptero en el espacio virtual. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

Este algoritmo arroja la siguiente matriz (4.1.), que se caracteriza por su tamaño de 3x3, debido a que se están calculando tres puntos, siempre será proporcional (n numero de Cuatricóptero, n x n: tamaño de la matriz distancia). La primera fila muestra los resultados de distancia del punto con relación a los otros dos y así sucesivamente; el primer valor de la fila es igual a 0, lo que quiere decir que está comparando la distancia consigo mismo lo cual genera dicho resultado, el segundo valor de la fila uno es la distancia entre el punto 1 y el



punto 2 y el tercer valor muestra la distancia entre el punto uno y el punto 3. Observando la grafica anterior y la matriz se puede visibilizar que efectivamente la distancia entre el punto 1 y 3 es de 2.000.

$$\text{matrizDist} = \begin{bmatrix} 0 & 1.4142 & 2.000 \\ 1.4142 & 0 & 1.4142 \\ 2.000 & 1.41.42 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.1.)$$

#### 4.1.1.2. Calcular separación y cohesión inspirado en los Boids.

Para ello se desarrolla un algoritmo el cual trata de emular el comportamiento de navegación de un grupo de boids, siguiendo las dos reglas básicas (separación y cohesión), entendiendo estas así:

##### *Cohesión.*

En esta regla cada Boids debe moverse hacia el centro de gravedad del grupo. Para esto se elaboro el siguiente algoritmo que cumple con dicho objetivo, este se caracteriza por calcular el centro de cada coordenada para cada uno de los puntos dependiendo el número de naves, así mismo será el número de centros necesarios calculados.

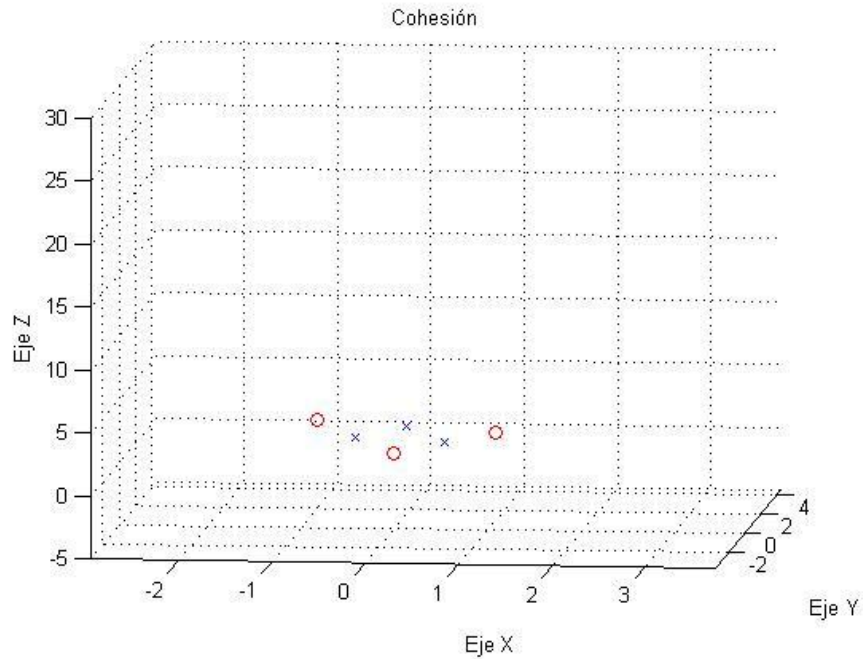


Fig.4.2. Regla de Cohesión entre tres Boids. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

El pseudocódigo para calcular la regla de Cohesión fue:

1. Obtain puntos(:,1), puntos(:,2) y puntos(:,3) values  
(Get inputs to coordinates Cuatricóptero)
2. Compute mf1[i] and mf2[j] for all i, j
4. For ki=1 to n,  
(n= Numbers Cuatricóptero)  
 $X(1,ki) = (((\text{sum}(\text{puntos}(:,1)) * \alpha - \text{puntos}(ki,1)) / (n-1)))$ ;  
 $Y(1,ki) = (((\text{sum}(\text{puntos}(:,2)) * \alpha - \text{puntos}(ki,2)) / (n-1)))$ ;  
 $Z(1,ki) = (((\text{sum}(\text{puntos}(:,3)) * \alpha - \text{puntos}(ki,3)) / (n-1)))$ ;
5. Next ki
6. Output (X,Y y Z)
7. Go toStep

### *Separación*

Con esta regla cada boid debe conservar una distancia mínima con respecto a otro boid o cualquier objeto ubicado en el ambiente de la simulación. Para cumplir con esto se realizará un algoritmo el cual debe ser capaz de indicar el movimiento de cada punto el este es modificado por el efecto de los demás integrantes del ambiente, es decir el efecto de atracción y repulsión que indica la nueva posición en el ambiente. En la fig.4.3. Se muestran tres círculos color rojo que representan los Cuatricópteros y tres puntos negros los cuales indican la posición siguiente que debe tomar cada Cuatricópteros, lo cual cumple la regla de separación.

El pseudocódigo para calcular la regla de Separación fue:

1. Obtain puntos(:,1), puntos(:,2) y puntos(:,3) values  
(Get inputs to coordinates Cuatricóptero)
2. Compute  $x[kk,k]$  and  $y[kk,k]$  for all  $kk, k$
4. For  $ki=1$  to  $n$ , For  $k=1$  to  $n$   
( $n$ = Numbers Cuatricóptero)  
 $x = \text{puntos}(kk,1) - \text{puntos}(k,1);$   
 $y = \text{puntos}(kk,2) - \text{puntos}(k,2);$   
 $z = \text{puntos}(kk,3) - \text{puntos}(k,3);$
5. Next  $kk,k$
6. Output ( $z,y,z$ )
7. Go to Step

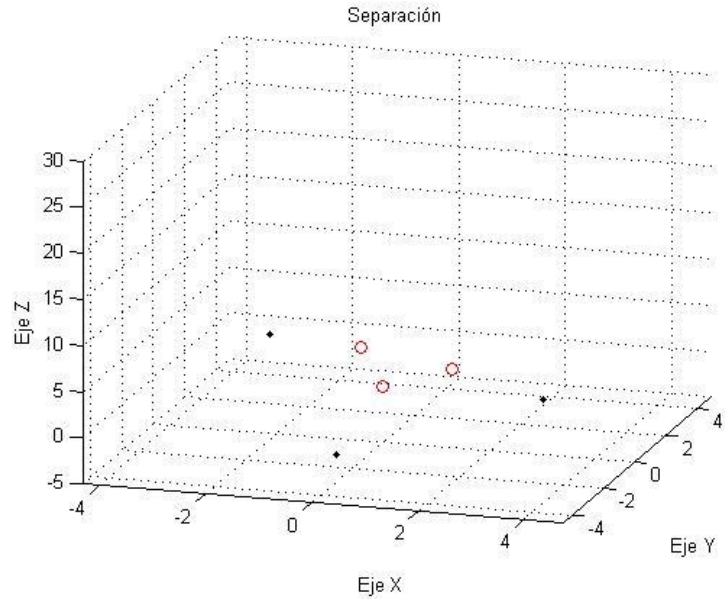


Fig.4.3. Regla de la Separación entre tres Cuatricópteros en el espacio virtual. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

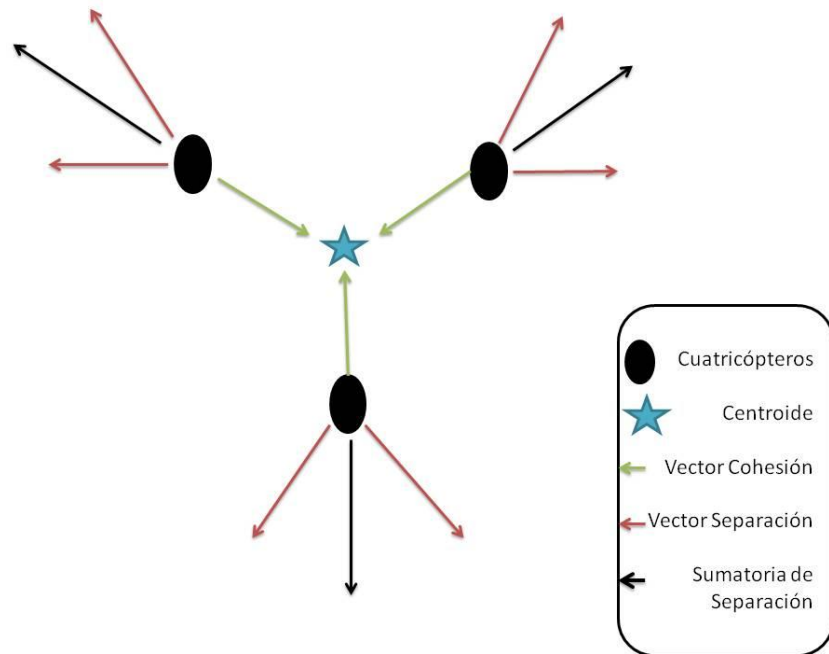


Fig.4.4. Diagrama de vectores de reglas cohesión y separación. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014).

En la fig.4.4. Se puede visualizar un diagrama vectorial de las reglas de separación y cohesión de cada integrante del enjambre y como interactúan con los demás miembros debido a las fuerza de atracción y repulsión que se generan, la regla de la cohesión como se mencionó anteriormente genera un efecto de atracción del centroide del grupo sobre cada Cuatricóptero y la regla de Separación genera un efecto de repulsión entre los integrantes del enjambre, luego se realiza la sumatoria de cada una de las fuerzas que intervienen en cada Cuatricóptero para calcular el valor de la separación total que tiene cada aeronave. Al sistema de control de referencia de posición es posible modificar el coeficiente de peso del vector cohesión y separación de cada integrante, para que los integrantes del enjambre navegue más unido o alejado, como se muestra en la fig(4.5.), pero para el desarrollo del algoritmo no se modifíco dichos valores ya el sistema cumplía eficientemente los objetivos planteados.

#### 4.1.1.3. Meta

Al obtener la regla de separación y cohesión se hace necesario calcular un vector meta o posición de llegada del enjambre, el cual tiene como función atraer al grupo a la posición final.

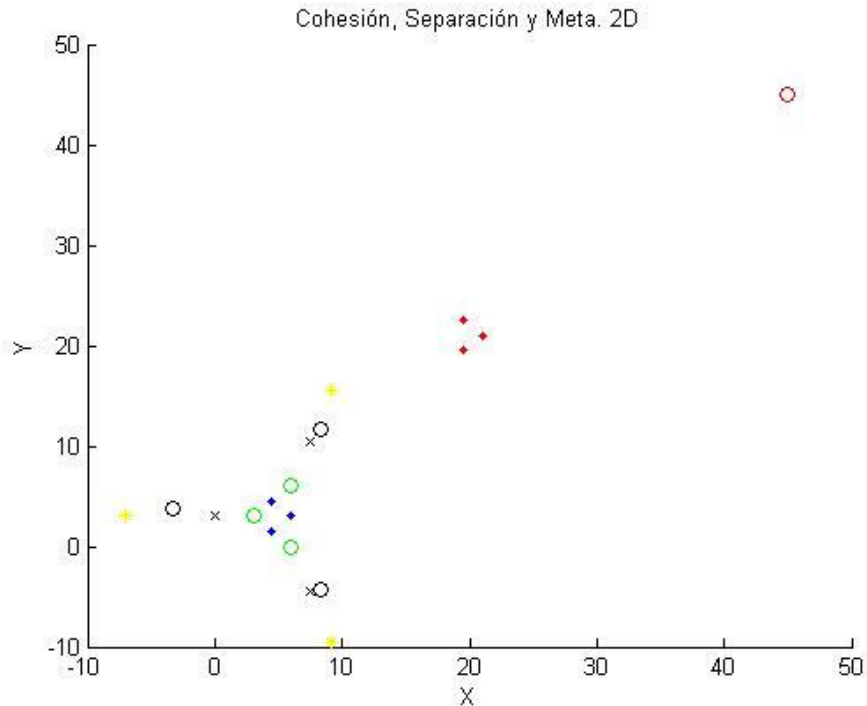


Fig.4.5. Representación de Reglas: (Cohesión, Separación y meta). [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

La figura 4.5. Representa las Reglas: (Cohesión, Separación y meta) en dos dimensiones, arroja los siguientes resultados:

- ✓ Los Cuatricópteros que están ubicados en las coordenadas (3 3),(6 0),(6 6) Son los círculos (o) de color verde.
- ✓ Los puntos (\*) azules, son los centroides (Cohesión).
- ✓ El círculo rojo (o), son las coordenadas (45 45) del vector final.
- ✓ Los puntos (\*) amarillos, representan las fuerzas que ejercen los demás Cuatricópteros a cada uno de ellos (Separación).
- ✓ Las (x) negras hacen referencia a la suma entre la cohesión y la separación.
- ✓ Los puntos rojos (.), hacen referencia al vector que genera la meta a cada punto, es un efecto de atracción hacia la meta.

- ✓ Los círculos negros(o), Es el resultado de la suma vectorial, entre el efecto de la separación, la cohesión y el vector meta.

Como se menciono anteriormente el círculo negro(o) hace referencia a cada uno de los centroides; Separación y vector meta, lo que indica la siguiente posición que debe dirigirse cada uno de los Cuatricópteros. A cada una de las reglas de los boids, se le fue diseñado un factor variable, en el cual se puede modificar condiciones del código; por ejemplo, en la regla de separación, modificando la variable se modifica la distancia de vuelo entre los miembros del enjambre, como lo muestra la siguiente figura (fig.4.6. (a y b)) y el algoritmo meta.

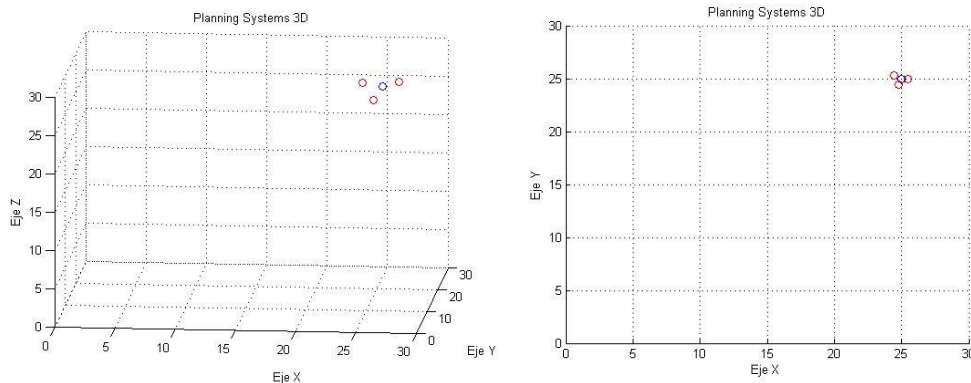


Fig.4.6.(a y b) Efectos de la Separación, con dos valores distintos de unión entre miembros del enjambre. El círculo de color azul es la coordenada de llegada y los círculos de color rojo son los Cuatricópteros. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

#### 4.1.1.4 Calcular obstáculos

Otro objetivo que debe cumplirse para lograr el algoritmo con los parámetros establecidos, es el de los obstáculos con los cuales se va a encontrar el enjambre y cómo los superará de la mejor manera para evitar colisiones. Los obstáculos son puntos en el espacio, son estáticos y serán diseñados siguiendo el principio de fuerza eléctrica, se

elaborarán siguiendo con la analogía mencionada como cargas del mismo signo de los Cuatricópteros, esto buscando que se repelan los puntos con los obstáculos, de igual forma se mantendrá en parte el principio ya mencionado, que entre menor distancia entre los mencionados, mayor será la fuerza ejercida entre si y por ende su movimiento será mayor a medida que la distancia entre ellos sea más lejana, así mismo será la fuerza ejercida entre sí.

$$F_e = \frac{k q_1 q_2}{d^2} \quad (4.2.)$$

Se eligió el siguiente valor de coeficiente, que cumple los requisitos necesarios en el momento de la suma vectorial para completar dicho algoritmo, ya que era necesario que el valor de dicha fuerza fuera un valor cercano a 0.81 cuando la distancia en cada una de las coordenadas fuera uno y descendiera rápidamente a medida que aumentara la distancia entre dichos puntos. La siguiente fue la ecuación en el eje X, que se utilizó para generar la distancia entre un obstáculo y un boid; se uso la misma ecuación para calcular dicha fuerza para las dos restantes coordenadas, esta se muestra a continuación:

$$F_{op}(x) = \frac{k}{(-obst(x)+punto(x))} \quad (4.3.)$$

#### 4.1.1.5. La suma vectorial (Separación, cohesión, vector meta y vectores obstáculo)

La suma vectorial que se mencionó anteriormente se define como  $V_f$ , fig. 4.6. es el movimiento de cada Cuatricóptero después de una interacción, es decir es la posición en el espacio a la cual debe llegar al cabo de cierto tiempo, para que nuevamente se haga todo el proceso anterior(Separación, cohesión, vector meta y vectores obstáculo) y se calcule un nuevo punto, para que después de un número de interacción u órdenes se cumpla el objetivo



final, lograr que el enjambre llegue a la posición deseada por el usuario, evitando colisiones entre los demás miembros del enjambre y posibles obstáculos en el camino.

$$V_f = V_{Separación} + V_{Cohesión} + V_{Meta} + V_{Obstaculo} \quad (4.4.)$$

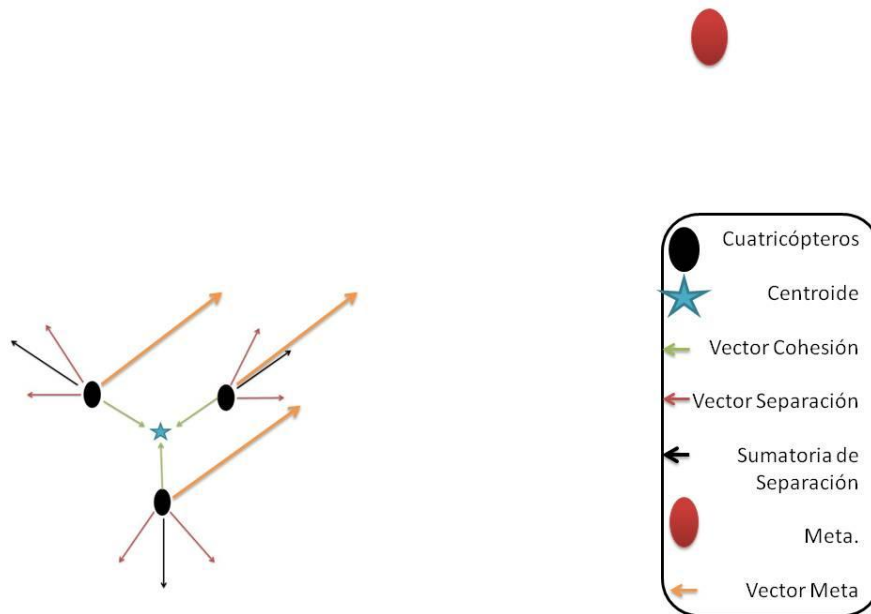


Fig.4.7. Diagrama de vectorial de Separación, Cohesión y Meta para tres Cuatricópteros. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014).

Es importante mencionar que dicho vector final  $V_f$  está calculado tres veces, para cada una de las coordenadas. ( $V_f(x)$ ,  $V_f(y)$  y  $V_f(z)$ ). A continuación se muestra una grafica (fig.4.8) en la cual se indica el vuelo del enjambre (puntos de color rojo), tratando de colisionar con obstáculos (x de color negro) y buscando llegar a la meta (circulo color azul).

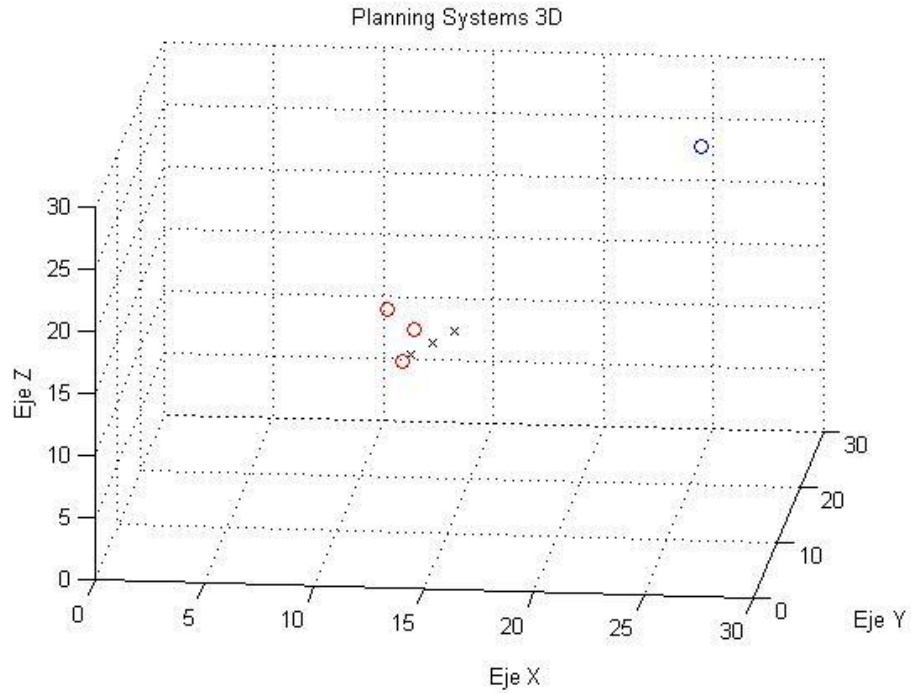


Fig.4.8. Algoritmo Planning Systems en 3D. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

La figura 4.9. Representa las reglas (Cohesión, Separación y meta) en tres dimensiones, dos obstáculos ubicados en las dimensiones (25, 25 ,25) y (26 26 27), la meta en las dimensiones (45, 45, 45) y la ruta que tomaron tres Cuatricópteros ubicados en las coordenadas (1 1 1), (2 2 2) y (3 3 3).

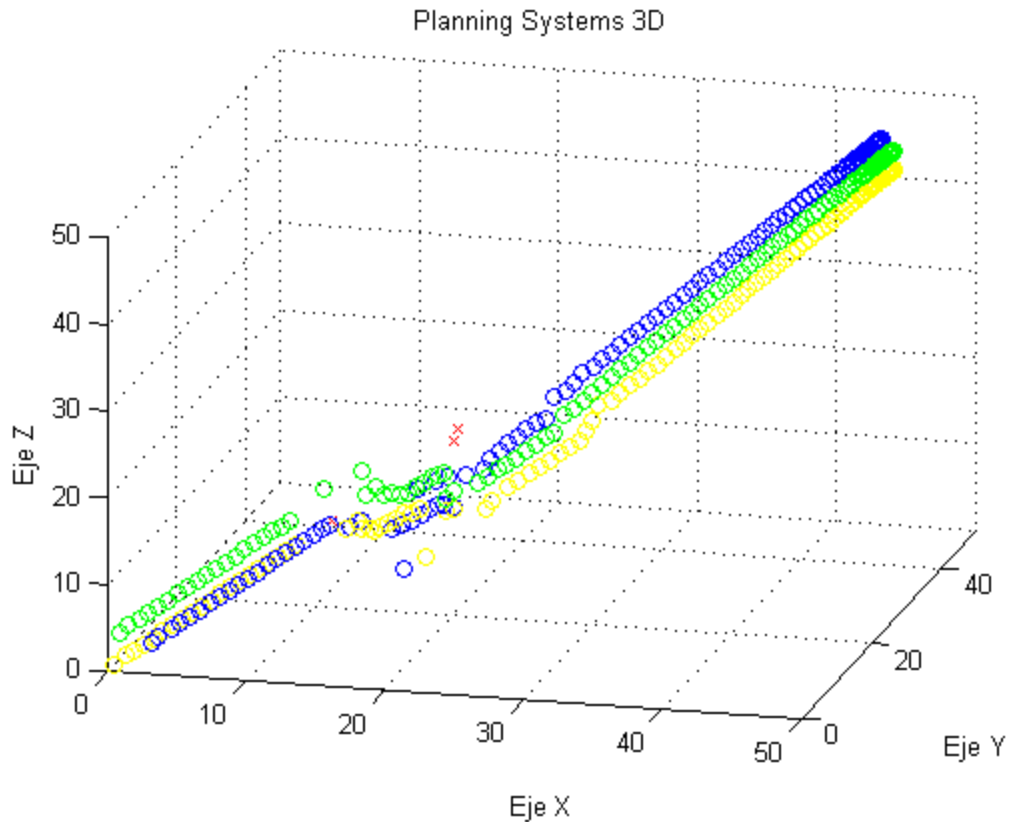
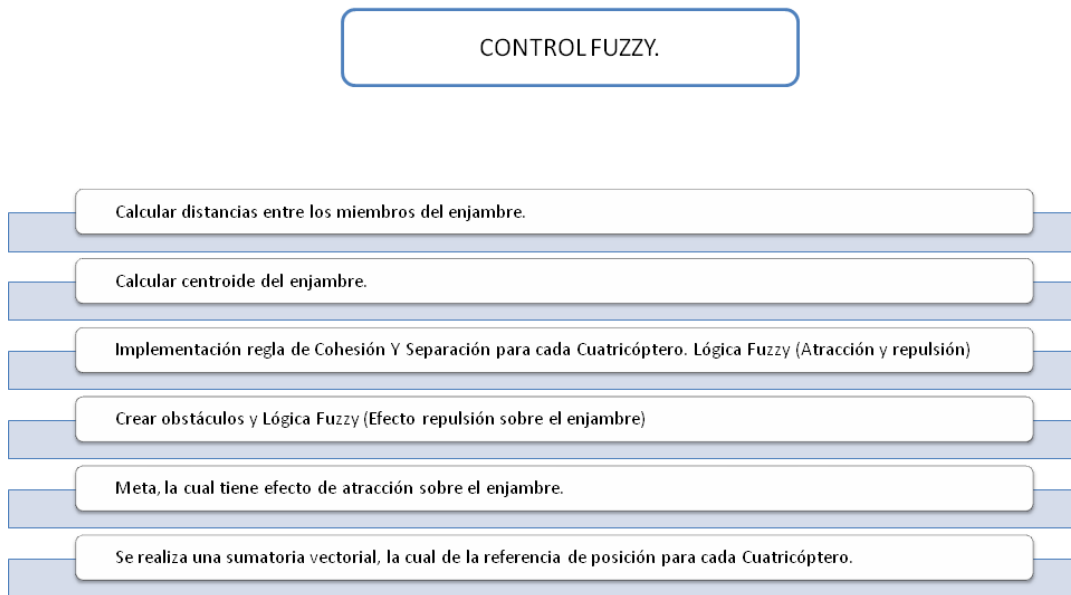


Fig.4.9.Navegación de tres Cuatricópteros Planning Systems en 3D. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

#### 4.1.2. Desarrollo algoritmo de Control Difuso.

El programa escogido para el desarrollo del algoritmo fue MATLAB, utilizando la herramienta Fuzzy Logic Toolbox, esta herramienta permite escoger el método de inferencia, el método de defusificación, los conjuntos de entrada y salida, que permiten establecer las reglas que controlan el sistema. Se utilizó la lógica difusa para calcular la Cohesión, separación y los obstáculos que puedan presentarse. El proceso para calcular la función meta fue el mismo que se implementó en el algoritmo anterior.

Esquema de desarrollo del algoritmo de Control Fuzzy:



#### 4.1.2.1. Calcular la distancia entre varios puntos (Cuatricoptores).

El proceso para calcular la distancia entre los Cuatricópteros es similar al que se implementó para calcular los valores en el algoritmo de Planning Systems. Cada Cuatricóptero es ubicado en el espacio cartesiano, allí se le asigna una posición en cada una de sus coordenadas (X, Y y Z). Es importante conocer la ubicación del Cuatricóptero y de los demás miembros del enjambre en el espacio, para ello se desarrolla un método simple para calcular la distancia de un punto con referencia a todos los miembros presentes en el ambiente virtual.

#### 4.1.2.2. Calcular separación y cohesión inspirado en los Boids siguiendo la Lógica difusa.

Para ello se desarrolla un algoritmo el cual trata de emular el comportamiento de navegación de un grupo de boids, siguiendo las dos reglas básicas (separación y cohesión), entendiendo estas así:

### *Cohesión.*

En esta regla cada Boid debe moverse hacia el centro de gravedad del grupo, para esto se elaboró el siguiente algoritmo el cual se caracteriza por calcular el centroide del enjambre, luego se calcula la distancia entre el centroide y el Cuatricóptero tiene un valor grande la regla del Cohesión genera un movimiento del Cuatricóptero hacia el centro (atracción); si la distancia entre los puntos mencionados anteriormente es corta, el sistema de control hace que el movimiento del los Cuatricópteros sea de repulsión y por último si el sistema se encuentra en un punto intermedio entre el centroide y los Cuatricópteros, el sistema de control de movimiento es poco, más adelante en el apartado de resultados se mencionará el porqué se tomaron los cuantificadores de cualidad para nuestras inferencias.

La entrada del sistema para la cohesión es la distancia (Entre centroide y la posición de cada Cuatricóptero) y la salida es la posición que debe tomar cada miembro del enjambre.

Se muestra (fig. 4.10.), el sistema de control de referencia difuso implementado en el algoritmo mencionado, además la entrada y salida del sistema para cumplir la regla de Cohesión.

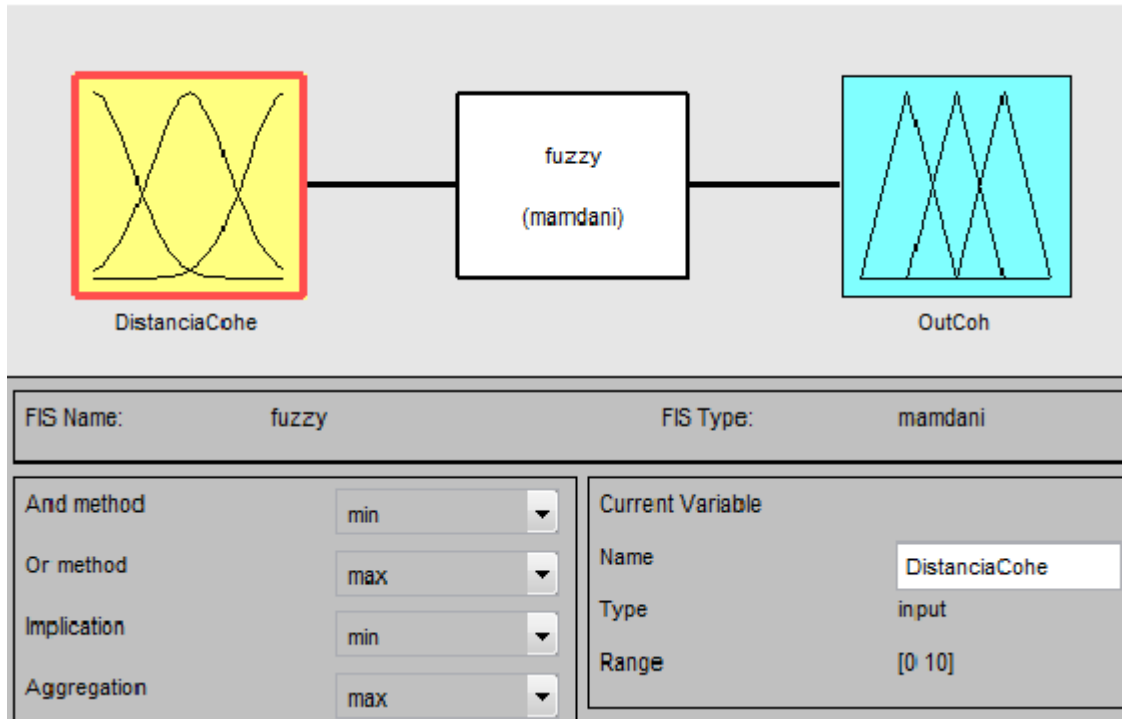


Fig.4.10. Entrada y salida del Sistema Fuzzy para la Cohesión. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

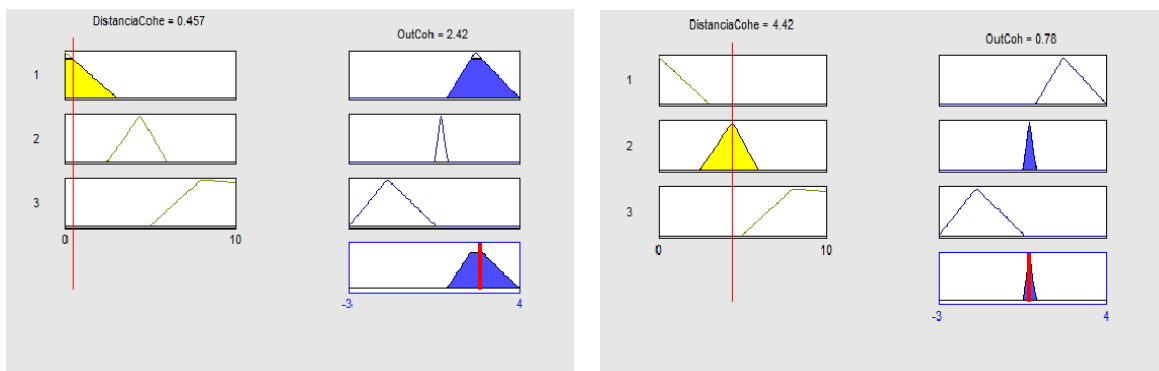


Fig 4.11 (a y b). Reglas del Sistema Fuzzy para la Cohesión. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

La figura 4.11 muestra las reglas de inferencia, así en la parte *a* se tiene una distancia de 0.457 y genera una salida de 2.42; en la fig. 4.11 b, se obtiene entrada de 4.42 y la salida es de posición del sistema es de 0.75. Lo cual verifica el buen funcionamiento del sistema, cumpliendo con lo requerido, como anteriormente se mencionó, con una distancia pequeña

se espera que el sistema de control genere una salida en la posición grande cumpliendo con el efecto de repulsión.

Se analizarán los aspectos por los cuales se eligieron entradas, salidas, reglas, inferencias, fuzzyficación, para calcular las reglas de los boids y funciones utilizando lógica difusa:

Para esto, se iniciara mencionando la regla de separación y cohesión la cual se caracteriza por tener una entrada que es la variable de distancia, este valor corresponde a la longitud entre los miembros del enjambre y la salida es la variable de posición que expresa la ubicación en el espacio que deberá tomar cada uno de los Cuatricópteros. Se tomaron los valores de pertenencia tanto de entrada como de salida, teniendo en cuenta los valores arrojados en el algoritmo anterior ya que con valores levemente semejantes el sistema funcionaba sin complicaciones, de igual forma es importante mencionar que dichos valores se fueron calibrando, buscando un mejor cumplimiento de cada una de las reglas. Para dicho proceso se utilizó el método de Mamdani, ya que es más intuitivo y eficiente y cumple con las exigencias de cada regla.

Funciones de pertenencias:

<b>Entradas</b>	<b>Salidas</b>
Pocadistancia	Bajo
Mediadistancia	Medio
Grandedistancia	Alto

Tabla.4.1. Pertenencias elegidas para Control Fuzzy de la regla de Separación y Cohesión.

Luego se establecen cada una de las reglas:

Se implementaron tres reglas las cuales serán descritas a continuación:

*SI poca distancia ENTONCES medio.*

Es decir si la distancia entre dos miembros del enjambre es poca, se genera en efecto de repulsión.

*SI media distancia ENTONCES bajo.*

Es decir si la distancia entre dos miembros del enjambre es media, es decir se encuentran en una posición ideal ya que no se encuentra ni muy cerca ni muy lejos del enjambre, entonces el movimiento de cada Cuatricóptero será poco; en la figura 4.12. Se observa que la distancia entre dos miembros es de 4.42 y se espera que la salida de posición tenga una salida relativamente pequeña, cercana a cero, dicho valor es de 0.70

*SI grande distancia ENTONCES alto.*

Es decir si la distancia entre dos miembros del enjambre es grande, se genera en efecto de atracción buscando unir al enjambre, pero teniendo en cuenta un valor intermedio para que no colisionen entre sí. Se espera un movimiento de posición negativo para que se cumpla dicho efecto.

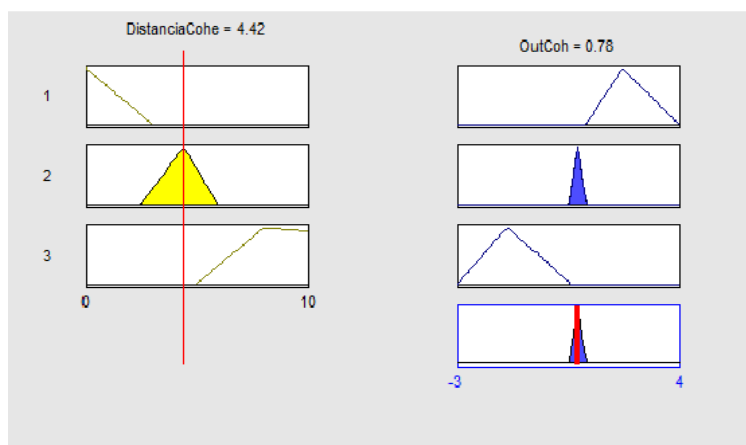


Fig. 4.12. Regla Fuzzy para separación y cohesión. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.



Se usó la función de pertenencia triangular por su simplicidad y además la función obstáculo que también fue implementada con Control Fuzzy, es similar al sistema implementado para la regla anterior, pero se diferencia en que tiene solamente un efecto de repulsión del obstáculo hacia un Cuatricóptero. Se utilizó una entrada (Distancia entra obstáculo y Cuatricoptero) con tres pertenencias y una salida (referencia a la nueva posición de un miembro del enjambre) con la misma cantidad de pertenecías, se implementaron tres reglas las cuales se caracterizan por:

SI pocadistancia ENTONCES alto.

SI mediadistancia ENTONCES medio.

SI altadistancia ENTONCES bajo.

Es decir si un miembro del enjambre está demasiado cerca un obstáculo, se repele con una magnitud de posición grande (fig.4.13.), si está medianamente cerca el movimiento no va ser muy grande (fig. 4.14.), pero si el Cuatricóptero está considerablemente lejos del objetivo, no ocurrirá ningún efecto en la posición de este (fig.4.15.).

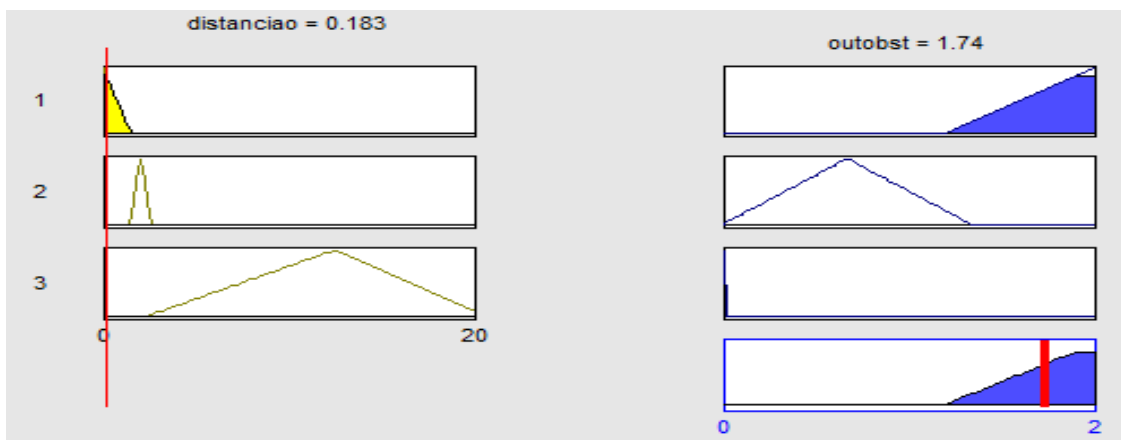


Fig.4.13. Regla número uno, Obstáculo. Efecto medio de repulsión sobre el Cuatricóptero.

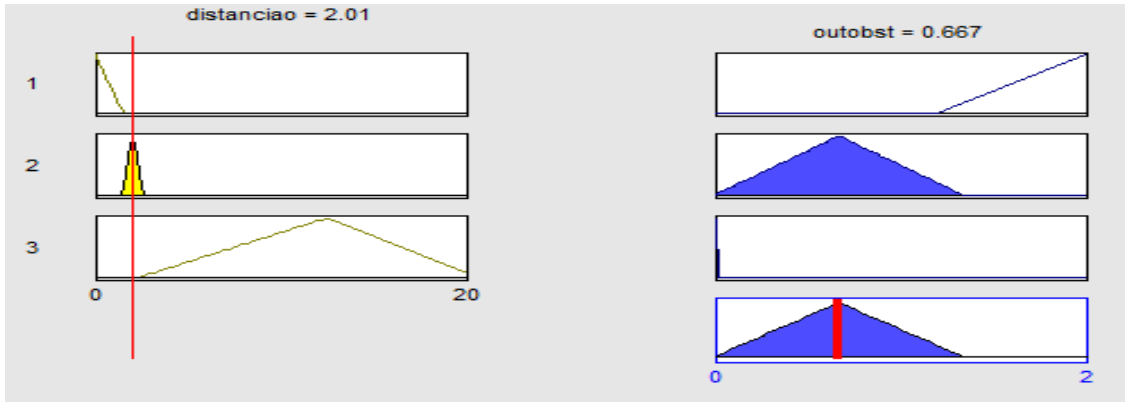


Fig.4.14. Regla número dos, Obstáculo. Efecto nulo de repulsión sobre el Cuatricóptero

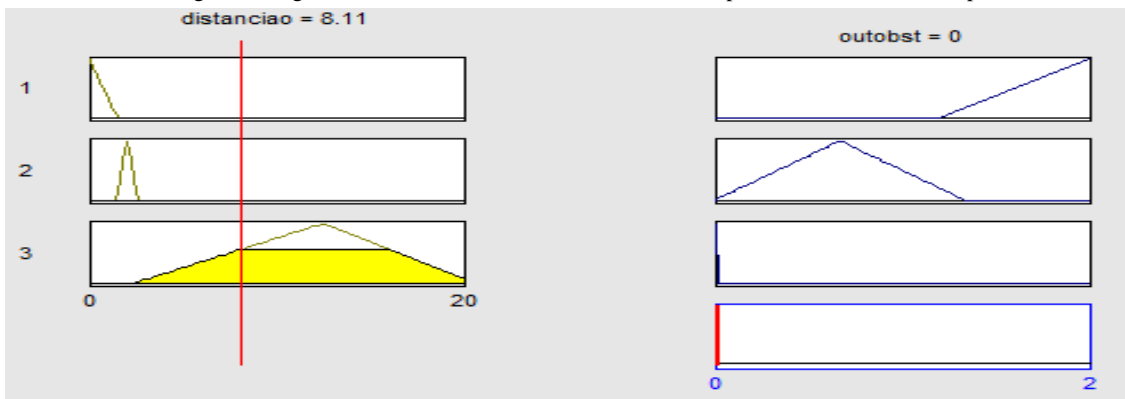


Fig.4.15. Regla número tres, Obstáculo. Efecto alto de repulsión sobre el Cuatricóptero

Como se muestra en la fig.4.16., se ubican tres miembros del enjambre en el espacio 2D para calcular la separación, se calcula el centroide del sistema para luego calcular las distancia de este a los demás Cuatricópteros, se escogió una distancia corta entre ellos para que se observe el fenómeno de la repulsión. El punto negro hace referencia al centroide del sistema, los tres círculos azules son los Cuatricópteros y los puntos rojos muestran la posición a la cual se deben dirigir los miembros del enjambre. En la fig.4.17. se ubican tres miembros del enjambre en el espacio 3D para calcular la separación, se calcula el centroide del sistema, se eligió una distancia grande entre ellos para que se observe el fenómeno de la atracción, el punto negro hace referencia al centroide del sistema, los tres círculos azules

son los Cuatricópteros y los círculos verdes muestran la posición a la cual se deben dirigir los miembros del enjambre.

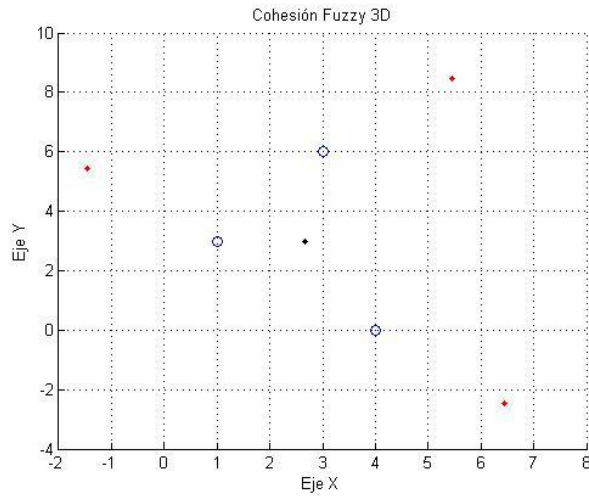


Fig. 4.16. Regla de la Separación entre tres Cuatricópteros en el espacio virtual. (Repulsión). [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

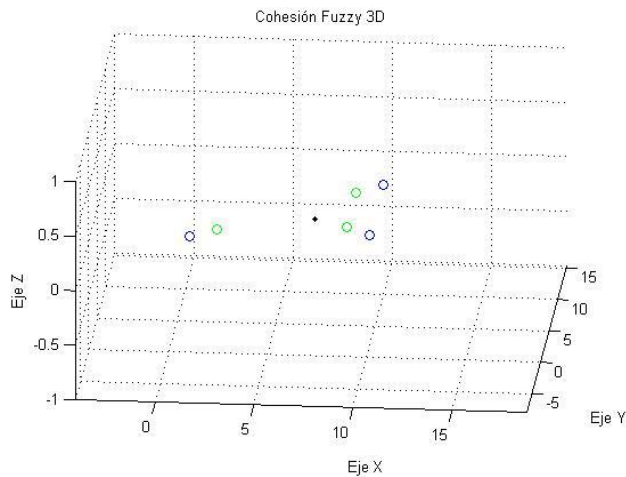


Fig.4.17. Regla de la Separación entre tres Cuatricópteros en el espacio virtual. (Atracción). [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

#### 4.1.2.3. Calcular meta.

Al obtener la regla de separación y cohesión se hace necesario calcular un vector meta o posición de llegada del enjambre, el cual tiene como función atraer al grupo a la

posición final. El punto de llegada del enjambre, se calculó de la misma forma que en algoritmo anterior.

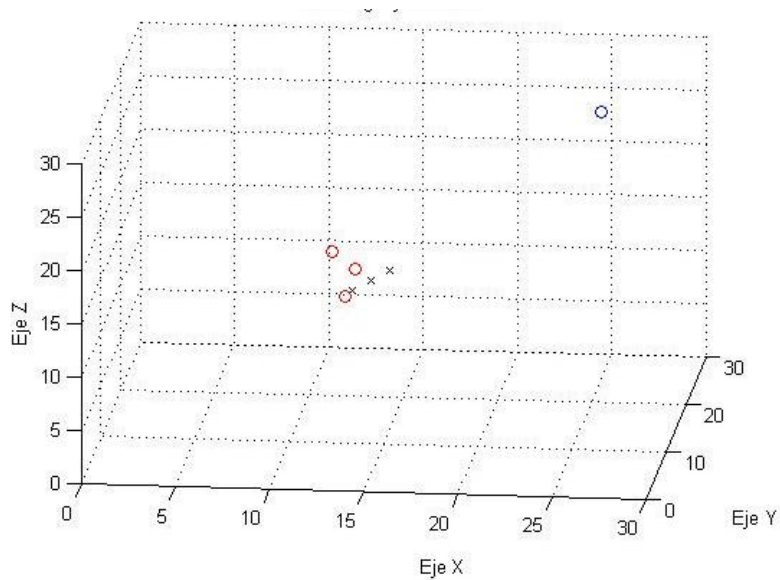


Fig.4.18. Efecto de atracción meta a Cuatricópteros. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

#### 4.1.2.4. Calcular Obstáculos

Se diseñó el control Fuzzy para el proceso de repulsión de los Cuatricópteros, teniendo en cuenta los posibles obstáculos del sistema y como los superará de la mejor manera para evitar colisiones. Los obstáculos son puntos en el espacio, son estáticos y serán diseñados siguiendo el principio de fuerza eléctrica, se elaborarán siguiendo la analogía mencionada como cargas del mismo signo de los Cuatricópteros, esto buscando que se repelen los puntos con los obstáculos, de igual forma se mantendrá en parte el principio ya mencionado, que entre menor distancia entre los mencionados, mayor será la fuerza ejercida entre si y por ende su movimiento será mayor a medida que la distancia

entre ellos sea más lejana, así mismo será la fuerza ejercida entre sí. Para ello se calculan las distancia del los miembros del enjambre con el obstáculo.

En la fig. 4.19., se observa el proceso de repulsión entre un obstáculo y tres Cuatricópteros, el círculo rojo indica la ubicación en el espacio 3D del obstáculo los tres círculos negros hacen referencia a los Cuatricópteros y el punto verde ilustra la posición a la cual se deben dirigir los miembros del enjambre producido por el efecto que se genera por el obstáculo.

Cómo se pudo observar, el mayor efecto de repulsión se da cuando un boid está cerca al obstáculo, pero cuando dicha distancia es grande un Cuatricóptero no se afecta su posición ya que no es necesario, como lo se muestra en la figura el punto ubicado en las coordenada 9.7 en x y 12 en y.

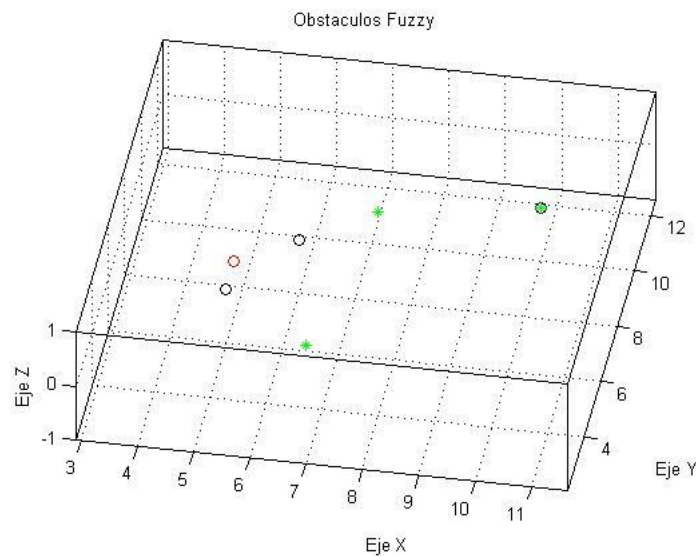


Fig.4.19. Repulsión entre Obstáculo y tres Cuatricópteros en el espacio virtual 3D. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

#### 4.1.2.5. Suma vectorial de Cohesión, Separación, obstáculo y meta.

La suma vectorial que se mencionó anteriormente se define como  $V_f$ , es el movimiento de cada Cuatricóptero después de una interacción, es decir es la posición en el espacio a la cual debe llegar al cabo de cierto tiempo, para que nuevamente se haga todo el proceso anterior, ecuación 4.4. (Sumatoria de Separación y cohesión, vector meta y vectores obstáculo) y se calcule un nuevo punto, para que después de un número de iteraciones u órdenes se cumpla el objetivo final, lograr que el enjambre llegue a la posición deseada por el usuario, evitando colisiones entre los demás miembros del enjambre y posibles obstáculos en el camino.

Es importante mencionar que dicho vector final  $V_f$  está calculado tres veces, para cada una de las coordenadas. ( $V_f(x)$ ,  $V_f(y)$  y  $V_f(z)$ ). En la figura 4.20., se observa la navegación de tres Cuatricópteros implementando la técnica de Control Fuzzy en un ambiente virtual en el cual se ubican 6 obstáculos, los cuales son \* de color azul

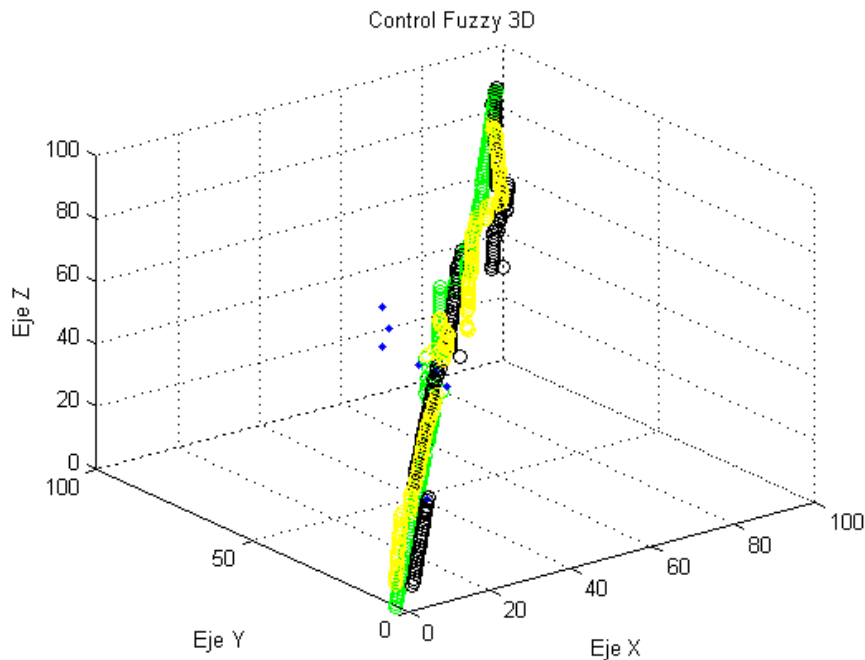


Fig.4.20. Navegación de tres Cuatricópteros utilizando Control Fuzzy. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

#### 4.2. Desarrollo plataforma de visualización y simulación

El programa elegido para el desarrollo de la plataforma de visualización y simulación fue MATLAB, utilizando el entorno de programación gráfica Guide, en el cual se puede realizar y ejecutar programas de simulación. En él se desarrollo dicho entorno fig.4.21.,el cual tiene las siguientes características, se puede elegir entre los dos tipo de control posición desarrollados (Planning Systems o Control Fuzzy), también es posible dar las coordenadas (X, Y y Z) de partidas de los Cuatricópteros en el espacio, además posición de partido de los obstáculos y posición de llegada del enjambre, también se podrá optar por tres casos de prueba del sistema y por último el ambiente virtual en el que se podrá visualizar el vuelo en 3D de los Cuatricópteros, buscando alcanzar los objetivos planteados.

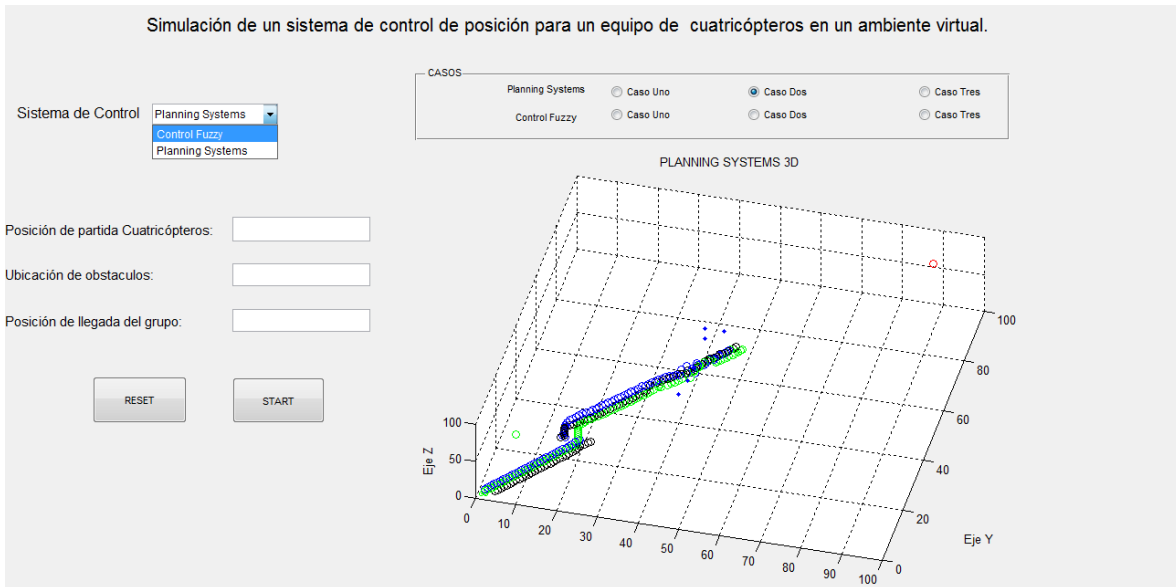


Fig.4.21. Plataforma de visualización y simulación para los algoritmos. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab, herramienta GUIDE.

---

### 5. Análisis y resultados

---

#### 5.1 Planning Systems

La elaboración del algoritmo de Planning Systems se desarrolló en las siguientes fases. Se calculó la distancia entre los diferentes miembros del enjambre, con este valor se obtuvo la primera regla de los Boids implementada en el trabajo que es la cohesión la cual se caracteriza por el centro de gravedad al cual debe tender el movimiento de los Cuatricópteros, luego se calculó la regla de la separación la cual se caracteriza por tener una distancia considerable de los miembros del enjambre, luego de esto se calculó la función la cual buscaba atraer al grupo a la meta o llegada deseada, esta tenía un efecto de atracción sobre el enjambre y por último se desarrolló la función la cual ubicaba obstáculos en el espacio los cuales son generados un fenómeno de repulsión con el grupo de Cuatricópteros y dicho efecto se caracteriza por aumentar la repulsión a medida que el grupo se acerca a cada obstáculo y fue modelado haciendo una analogía al campo eléctrico. Por último se realizó una suma vectorial de las reglas y funciones mencionados anteriormente (Cohesión, Separación, función meta y obstáculo) las cuales fueron realizadas de forma vectorial, lo cual da la referencia del control de posición que deben tomar cada miembro del enjambre, en cada iteración.

#### 5.2. Control Fuzzy

El algoritmo implementado con Lógica Difusa, sigue los mismos lineamientos de desarrollo del algoritmo anterior, solo que se hace de forma relativa observando el funcionamiento de la técnica de control anterior. Ya que como se mencionó en el apartado de resultados se ajustan los valores de forma empírica para considerar cada regla y darle su



valor de pertenencia. De igual forma se calcularon las reglas de Separación y Cohesión inspirado en el modelo matemático de los Boids, enseguida se uso la lógica difusa para realizar la función de obstáculos, la cual se caracteriza por realizar un efecto de repulsión al enjambre cuando el sistema tiende a acercarse a estos, por último la función meta la cual se caracteriza nuevamente por atraer al grupo a esta coordenadas. Al final se realiza una sumatoria de dichas reglas y funciones para cumplir con el objetivo planteado en el algoritmo.

### 5.3.1. Funcionamiento técnicas sin obstáculos.

En la siguiente sección se realizará una muestra, análisis y comparación entre los dos algoritmos propuestos, de igual forma se verificará el funcionamiento de los mismos:

#### *Planning Systems sin obstaculos*

Sistema de navegación sin obstáculos, se ubican cuatro Cuatricópteros en las siguientes coordenadas:

Coordenadas Cuatricópteros= [0 0 90; 2 0 92; 0 2 92; 2 2 90]

Se observa una matriz 4x3, la cantidad de filas hace referencia a la cantidad de Cuatricópteros del sistema y el número de columnas siempre será tres e indican la posición en cada coordenada(X, Y y Z, respectivamente)

Y la meta a llegar se ubica en la coordenada:

Llegada del enjambre =[80 90 5]

La primera trayectoria a visualizar es la del sistema Planning Systems, (fig.5.1.). Las trayectorias de los Cuatricópteros están referenciadas con los colores rojo,verde,amarillo y azul y la posición de llegada con un círculo de color azul.

Total de iteraciones necesarias para la navegación del enjambre: 160 iteraciones.

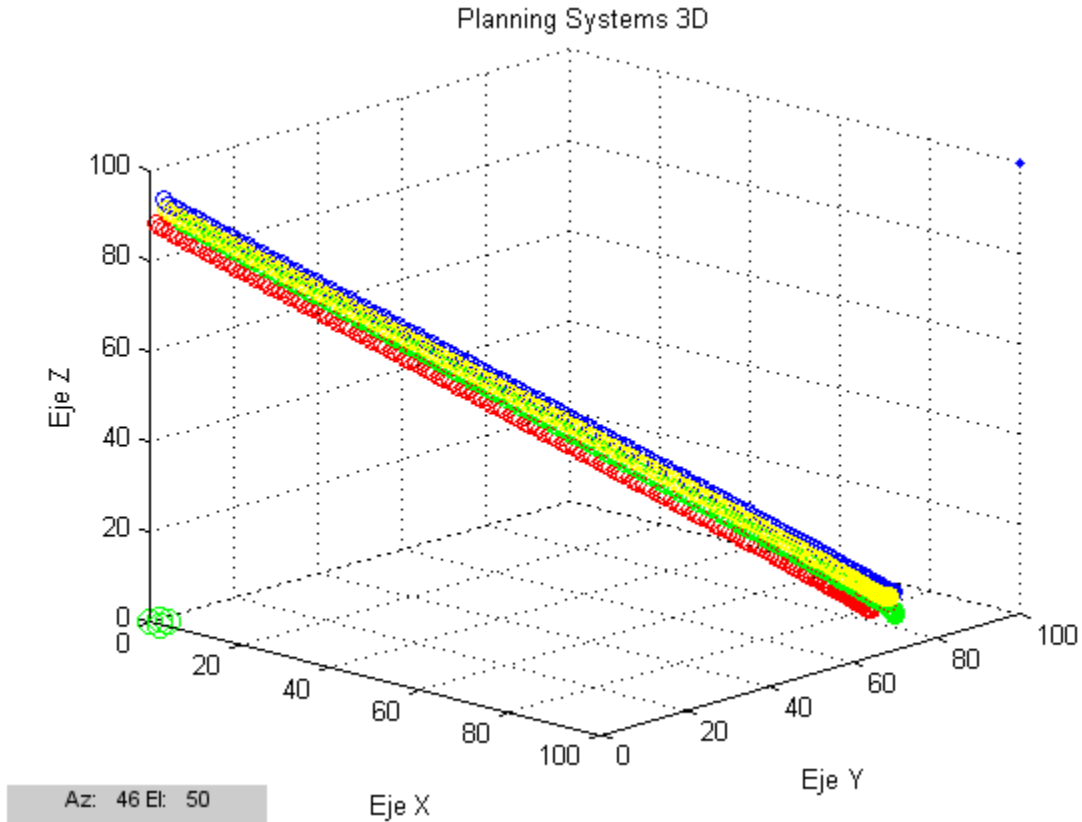


Fig. 5.1. Trayectoria Planning Systems de cuatro Cuatricópteros, sin obstáculos. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

En la tabla 5.1., se visualiza las coordenadas de navegación de cuatro Cuatricópteros en el entorno virtual, dichos grupo de valores fue obtenidos de forma aleatoria y sirven para calcular la distancia de vuelo entre los miembros del enjambre, para confirmar que efectivamente no se chocan entre ellos, la matriz dist arroja las distancia entre todos los integrantes del enjambre, para calcular dicha distancia se recurrió a utilizar la siguiente fórmula:

$$\text{dist} = \sqrt{(X_{\text{Cuatri } 1} - X_{\text{Cuatri } 2})^2 + (Y_{\text{Cuatri } 1} - Y_{\text{Cuatri } 2})^2 + (Z_{\text{Cuatri } 1} - Z_{\text{Cuatri } 2})^2}$$

Cuatricóptero/ Coordenadas	X	Y	Z
Cuatricóptero uno	75,3267	84,6763	2,6418
Cuatricóptero dos	78,184	84,8877	6,066
Cuatricóptero tres	75,8686	88,6532	5,7397
Cuatricóptero cuatro	782.516	879.719	20.060

Tabla.5.1. Coordenadas de cuatro Cuatricópteros mientras navegan en el entorno virtual.

dist = [4.4648 5.0701 4.4520 4.4324 5.0991 4.4814]

### *Control Fuzzy sin obstaculos*

Se utilizaron las mismas coordenadas de meta, de partida y cantidad de Cuatricópteros implementadas con la técnica anterior, para verificar el funcionamiento con Control Difuso, (fig.5.2.). Las trayectorias de los Cuatricópteros están referenciados con los colores azul, verde y negro y la posición de llegada círculo de color rojo. El total de iteraciones para la llegada del enjambre al punto de referencia es aproximadamente 160 iteraciones, utilizando la técnica control Difuso.

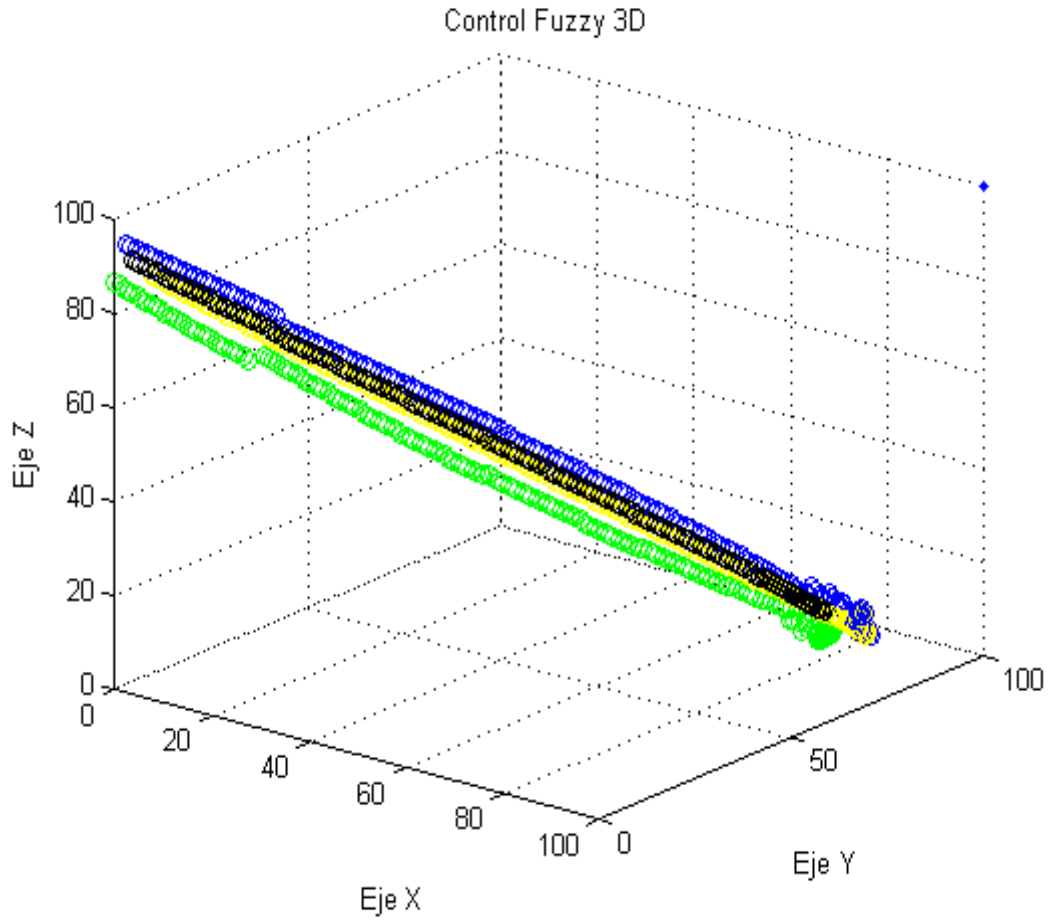


Fig. 5.2. Trayectoria Control Fuzzy de cuatro Cuatricópteros, sin obstáculos. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

Coordenadas de navegación de los miembros del enjambre.

Cuatricóptero/ Coordenadas	X	Y	Z
Cuatricóptero uno	76,5416	85,6566	4,042
Cuatricóptero dos	76,3266	84,7298	9,8227
Cuatricóptero tres	77,1257	90,6861	8,428
Cuatricóptero cuatro	80,2375	90,7336	4,1839

Tabla.5.2. Coordenadas de Cuatricópteros, Control fuzzy sin obstáculos.

Distancia de navegación de los Cuatricópteros.

dist = 5.8585 6.6988 6.2814 6.1694 9.1179 5.2629

### 5.3.2. Funcionamiento de técnicas con obstáculos.

Ahora, se verifica el funcionamiento de la técnica de control incluyendo algunos obstáculos, las coordenadas utilizadas son:

```
Coordenadas Cuatricópteros =[1 2 1 ; 2 2 3;1 2 5]
meta=[90 90 90];
Coordenadas Obstáculos =
[20 20 20; 40 40 40;41 45 42;41 50 42;41 62 55;41 62 42; 45 65 45;]
```

#### *Planning Systems con Obstáculos.*

Total de iteraciones necesarias para la navegación del enjambre: 170 iteraciones. Se observa fig.5.3. El funcionamiento de la técnica Planning Systems en 3D, en la cual están presentes algunos obstáculos, se visualiza la trayectoria de los tres miembros del enjambre color verde, azul y negro, los obstáculos son \* de color azul.

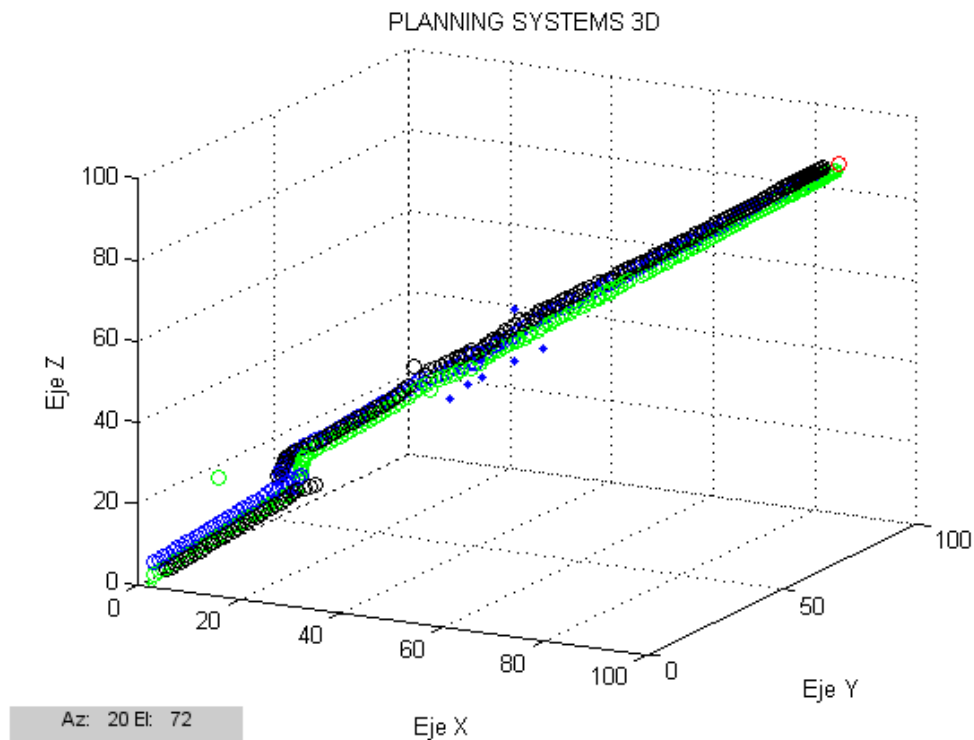


Fig. 5.3. Trayectoria Planning Systems de tres Cuatricópteros, con obstáculos. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

Coordenadas de navegación de los miembros del enjambre.

Cuatricóptero/ Coordenadas	X	Y	Z
Cuatricóptero uno	89,1003	89,2332	88,1350
Cuatricóptero dos	88,0321	87,1258	89,5885
Cuatricóptero tres	86,8021	87,9461	87,2359

Tabla.5.3. Coordenadas de Cuatricópteros, Planning Systems con obstáculos.

Distancia de navegación de los miembros del enjambre.

$$\text{dist} = 2.7740 \quad 2.7833 \quad 2.7786$$

#### *Control Fuzzy con Obstáculos.*

Se usaron las mismas coordenadas de meta, de partida y cantidad de Cuatricópteros implementadas con la técnica anterior, para verificar el funcionamiento con Control Difuso, (fig.5.4.). Las trayectorias de los Cuatricópteros están referenciados con los colores amarillo, verde y negro, ubicación de obstáculos y la posición de llegada círculo de color rojo. El total de iteraciones para la llegada del enjambre al punto de referencia es aproximadamente 170 iteraciones, utilizando la técnica control Difuso.

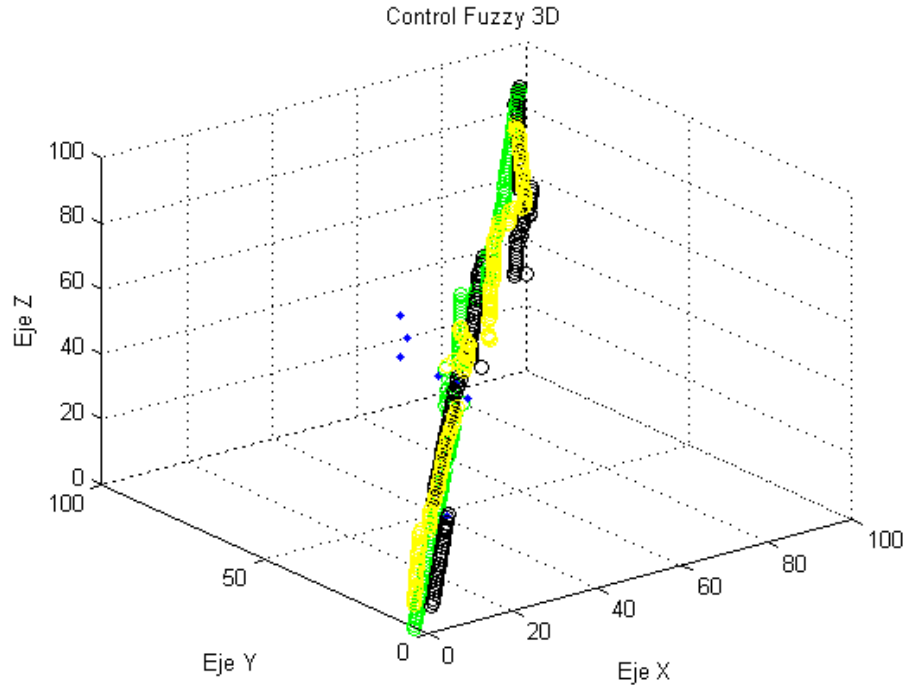


Fig. 5.4. Trayectoria Control Fuzzy de tres Cuatricópteros, con obstáculos. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

Coordenadas de navegación de los miembros del enjambre.

Cuatricóptero/ Coordenadas	X	Y	Z
Cuatricóptero uno	91,5374	91,5338	91,5371
Cuatricóptero dos	91,9305	91,9188	91,9290
Cuatricóptero tres	85,2767	84,6931	85,4204

Tabla.5.4. Coordenadas de Cuatricópteros, Control fuzzy con obstáculos.

Distancias de navegación de los miembros del enjambre.

$$\text{dist} = 0.6755 \quad 11.1088 \quad 11.7833$$

Se realizó otra simulación para contrastar las dos técnicas de control inteligente y estos son los resultados de trayectorias, distancias entre miembros e iteración necesarias para cumplir el objetivo planteado e iteraciones.

*Planning Systems con obstáculos.*

Coordenadas Cuatricópteros =[1 2 1 ; 2 2 3; 1 2 5]  
meta=[120 120 120];

Coordenadas Obstáculos =  
[20 20 20; 30 30 30; 51 51 51; 42 42 42; 63 63 63]

Total de iteraciones necesarias para la navegación del enjambre: 200 iteraciones.

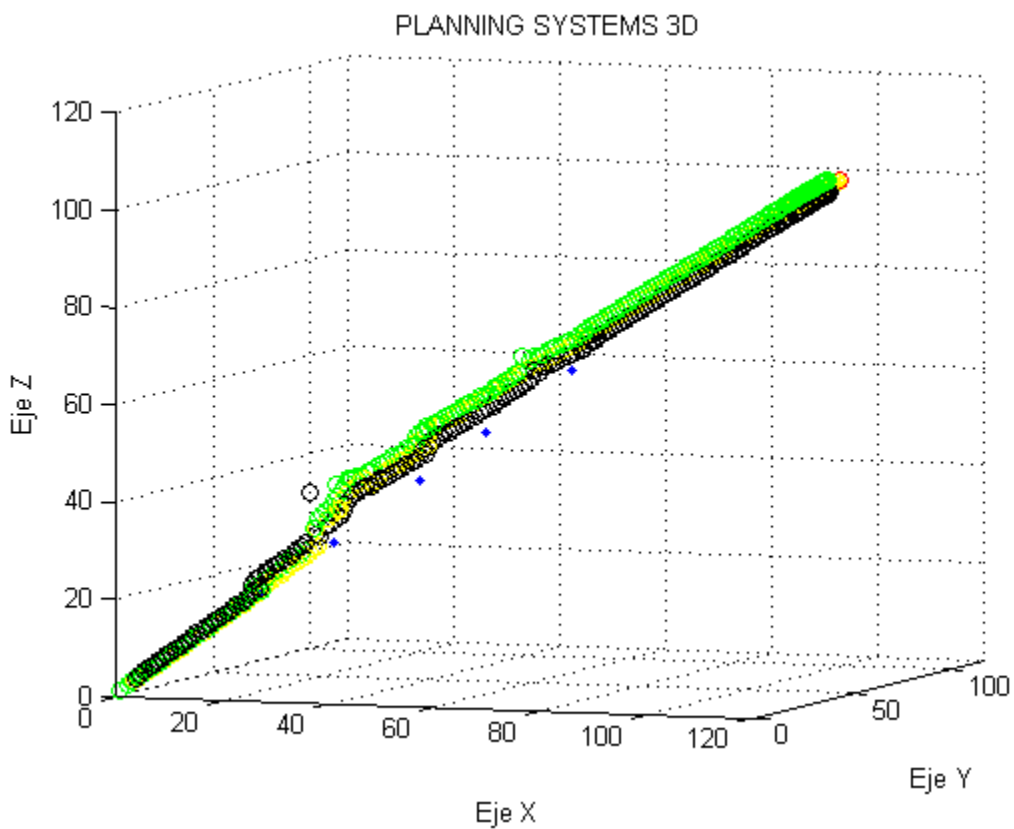


Fig. 5.5. Trayectoria Planning Systems de tres Cuatricópteros con obstáculos. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá, 2014). Tomada software Matlab.



Cuadróptero/ Coordenadas	X	Y	Z
Cuadróptero uno	95,9863	95,4649	97,9454
Cuadróptero dos	96,1468	96,3560	95,3131
Cuadróptero tres	97,0108	98,0008	97,4077

Tabla.5.5. Coordenadas de Cuadrópteros, Planning Systems con obstaculos.

$$\text{dist} = 2.7837 \quad 2.7874 \quad 2.7999$$

*Control Fuzzy con obstáculos.*

Coordenadas Cuadrópteros =[1 2 1 ; 2 2 3;1 2 5]

Meta=[120 120 120];

Coordenadas Obstáculos =

[20 20 20;30 30 30; 51 51 51; 42 42 42; 63 63 63;]

Total de iteraciones necesarias para la navegación del enjambre: 210 iteraciones.

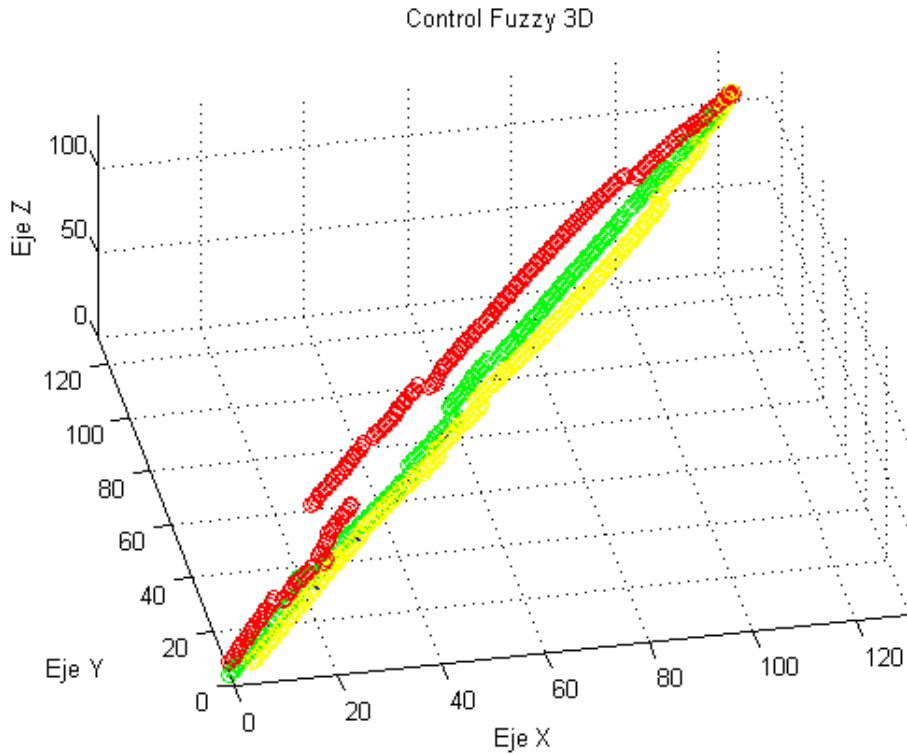


Fig. 5.6. Trayectoria Control Fuzzy de tres Cuadrópteros, con obstáculos. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

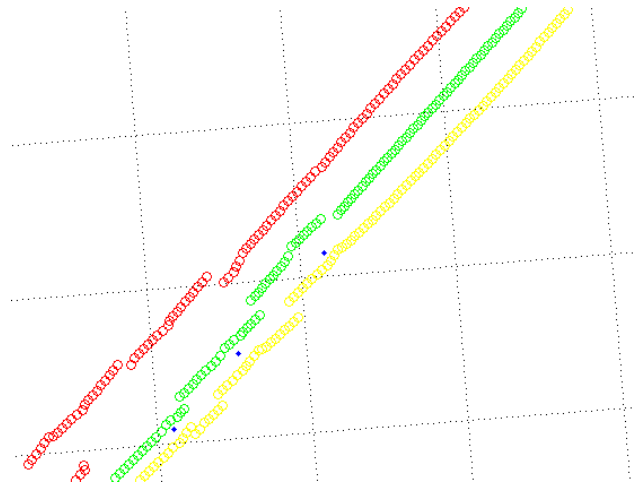


Fig. 5.7. Zoom trayectoria Control Fuzzy de tres Cuatricópteros, con obstáculos. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

Coordenadas de navegación de los miembros del enjambre.

Cuatricóptero/ Coordenadas	X	Y	Z
Cuatricóptero uno	110,8996	110,8446	110,5221
Cuatricóptero dos	115,3138	113,6789	113,7913
Cuatricóptero tres	116,6014	116,9511	117,1515

Tabla.5.6. Coordenadas de Cuatricópteros, Control Fuzzy con obstaculos.

Distancias de navegación de los miembros del enjambre.

$$\text{dist} = \quad 6.1811 \quad 10.6653 \quad 4.8638$$

Por último se ubicaron tres Cuatricópteros y la meta en las siguientes Coordenadas:

$$\begin{aligned} \text{Coordenadas Cuatricópteros} &= [0 \ 0 \ 0; 100 \ 0 \ 50; 50 \ 150 \ 50] \\ \text{Meta} &= [120 \ 120 \ 120]; \end{aligned}$$

En la figura 5.8. Se observan las trayectorias de la referencia de posición para los integrantes del enjambre, el cual parten de unas coordenadas significativamente distantes, en el primer caso con la técnica de Planning el resultado no es el esperado ya que el sistema prioriza la unión del enjambre, se esperaría que si están cerca a la meta deberían llegar a ella sin tener en cuenta los demás miembros; en el segundo caso con la técnica

Fuzzy se observa un rendimiento deseado puesto que cada trayectoria prioriza la meta y no los miembros del enjambre.

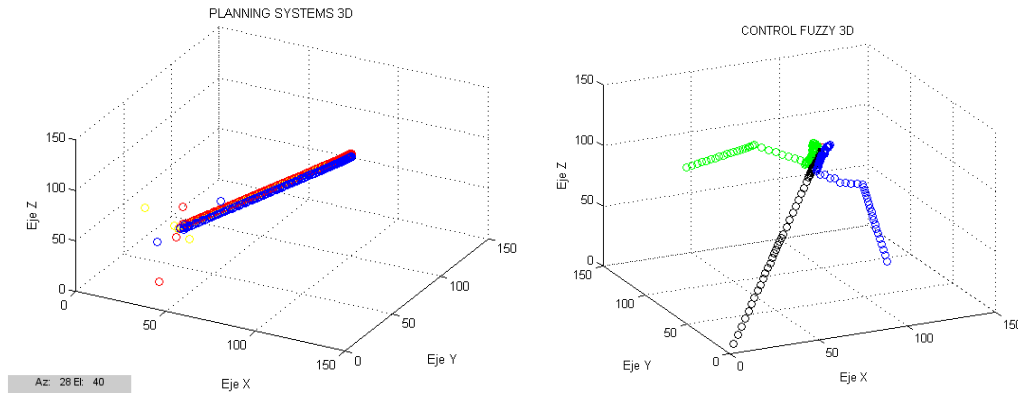


Fig. 5.8. Trayectoria Control Fuzzy y Planning de tres Cuatricópteros, posición de partida distante. [Imagen de Sergio Castiblanco]. (Bogotá. 2014). Tomada software Matlab.

#### 5.4 Conclusiones

- Este trabajo se ha dedicado a desarrollar dos algoritmos que entregan la referencia al control de posición para la navegación de grupo de Cuatricópteros en un ambiente en 3D, el cual pretende que el enjambre llegue a la posición deseada de forma autónoma. Por tanto, no se trata de analizar un Cuatricóptero en concreto, ni tipos de maniobra en particular, tampoco alteración de la estructura para la obtención de resultados, aún así fue pertinente el estudio de su modelamiento matemático y su comportamiento dinámico, basado en modelos existentes desarrollados en investigaciones a nivel mundial.
- Según los resultados obtenidos al verificar las dos técnicas con diferentes condiciones se puede afirmar que la técnica más efectiva es la de Planning Systems, ya que la referencia de posición para los Cuatricópteros es más estable, evade de la

mejor forma los obstáculos, además requiere de menos iteraciones para cumplir el objetivo.

- Con la técnica de Planning Systems es más fácil modificar algunos parámetros como la distancia de navegación de los miembros del enjambre, solo basta con modificar el coeficiente de las variables cohesión y separación, en cambio con la otra técnica se debe modificar las funciones de membresía del Control Fuzzy.
- Las dos técnicas sin la presencia de obstáculos tienen una característica de desempeño similar en cantidad de iteraciones necesarias para cumplir el objetivo, tiempo y referencias de posición de los Cuatricópteros.
- Las trayectorias de navegación del enjambre de Cuatricópteros cuando parte en coordenadas cercanas, tienen un mejor rendimiento con la técnica de Planning Systems. Pero el Control Fuzzy genera mejores trayectorias cuando el grupo de Cuatricópteros parten en una posición relativamente grande entre ellos.

## 5.5 Trabajos Futuros

Para culminar, se mencionan posibles proyectos que podrían darle continuidad a la investigación:

En el presente trabajo se identificó los Cuatricópteros como puntos en el espacio, sería pertinente un desarrollo de un modelamiento matemático implementado al control de referencia de posición de cada Cuatricóptero, de igual forma con los obstáculos.

Es importante mencionar que en la elaboración de los algoritmos se desarrolló en un ambiente ideal ya que no se tuvo en cuenta factores como la gravedad, el rozamiento,

tolerancia de los sensores implementados, magnitud y dirección del viento, entre otras, sería importante tener en cuenta estas variables.

Berna, F. A. (2010). *Desarrollo de una plataforma de tiempo real para la implementación de algoritmos de control multivariables: Ampliación al control de orientación de vehículos aéreos*. España: Universidad de Politécnica de Valencia. Máster de Automática e informática industrial. Recuperado el 14 de octubre de 2014, del sitio Web de la Biblioteca Universidad de Politécnica de Valencia:

Centes, C. y Saotome, O (2012). *Dynamic Swarm Formation with Potential Fields and A\* Path Planning in 3D environment*. Brasil: Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos, SP.

Espitia, H.E. y Sofrony J.I. *Algoritmo para planear trayectorias de robots móviles, empleando campos potenciales y enjambres de partículas activas brownianas*. Colombia: Ciencia e ingeniería neogranadina, vol 22-2, pp 75 - 96, issn 0124-8170

Gómez, J. (2007). *Fundamentos de la metodología RUP*. Universidad Tecnológica de Pereira.

Gutiérrez, W.G (2009). *Estudio de diferentes técnicas de inteligencia computacional para sintonía de acciones de control PID*. Colombia: Maestría Proyecto de grado, Grupo PSI., Universidad del Valle.

Lebar Bajec Iztok, Mraz Miha y Zimic Nikolaj (2003). *Boids with a fuzzy way of thinking*. University of Ljubljana (Eslovenia). Faculty of Computer and Information

Science. Recuperado el 14 de octubre de 2014, del sitio Web: [http://lrss.fri.uni-lj.si/people/ilbajec/papers/ilb\\_asc03.pdf](http://lrss.fri.uni-lj.si/people/ilbajec/papers/ilb_asc03.pdf)  
<http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/11281/Tesina.pdf?sequence=1>.

Costa D.O. (2011). *Modeling identification and control of a quadrotor, aircraft*.  
*Master's thesis*, Czech Technical University in Prague Czech Technical University in  
Prague Czech Technical University in Prague.

Passino, M. K. (2004). *Biomimicry for Optimization, Control, and Automation*.  
Capitulo 6, planning systems.

Peña, M. V. (2009). *Modelamiento, simulación y hallazgo de modelos linealizados a partir de técnicas de identificación de un cuatrirrotor*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Máster en Ingeniería Eléctrica: Automatización Industrial. Morata, F.(2008-2009). *Controlador Fuzzy de un Quadrotor*. España: Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Informática. Master en Investigación en Informática. Recuperado el 14 de octubre de 2014, del sitio Web: [http://eprints.ucm.es/9915/1/Controlador\\_Fuzzy\\_de\\_un\\_Cuadrorotor.pdf](http://eprints.ucm.es/9915/1/Controlador_Fuzzy_de_un_Cuadrorotor.pdf).

Reynolds, C. (1986). *Boids* .Recuperado el 15 de octubre de 2014, del sitio Web: <http://www.red3d.com/cwr/boids/>.

Reynolds, C. W. *Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model*.  
Recuperado el 14 de octubre de 2014, del sitio Web:  
<http://www.cs.toronto.edu/~dt/siggraph97-course/cwr87/>

Rich, E y Knight, K. (1994) *Inteligencia Artificial*. Madrid: McGraw-Hill, D.L.

Schermuk, D. M. (2012) *Diseño e Implementación de un controlador para la Orientación de un QuadRotor*. Tesis de Grado de Ingeniería Electrónica. Universidad de Buenos Aires.

Sanchez, M.A. y Ruiz, F. *modelización y simulación de un vehículo aéreo no tripulado*. Tesis de Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. 18 de abril de 2011

Woodman, O.W (2007). *An introduction to inertial navigation*. Technical report, University of Cambridge.



## ANEXOS

Los documentos a entregar como anexos son:

- Software. Algunas partes del código se pueden observar a continuación:

### PLANNING SYSTEMS

#### Calculo de distancias.

```
dist = pdist(puntos,'euclidean'); % distancias
matrizDist = squareform(dist); % en forma de matriz
```

#### Cohesión.

```
%Cohesion
```

```
for ki = 1:n
    X(1,ki)= (((sum(puntos(:,1))*alpha - puntos(ki,1))/(n-1)));
    Y(1,ki)= (((sum(puntos(:,2))*alpha - puntos(ki,2))/(n-1)));
    Z(1,ki)= (((sum(puntos(:,3))*alpha - puntos(ki,3))/(n-1)));
end
```

#### Separación

```
% Separacion
```

```
for kk=1:n
    for k = 1:n
        x(kk,k)= puntos(kk,1) - puntos(k,1);
        y(kk,k)= puntos(kk,2) - puntos(k,2);
        z(kk,k)= puntos(kk,3) - puntos(k,3);
    end
end
```

#### Meta

```
%Meta
```

```
for kt=1:n
    for t=1:n
```

```

xx(kt,1)= ((-puntos(kt,1)+meta(1,1))*wa)
yy(kt,1)= ((-puntos(kt,2)+meta(1,2))*wa)
zz(kt,1)= ((-puntos(kt,3)+meta(1,3))*wa)

end

end

```

## Obstáculos

```

%obstaculos

for kkt=1:nn
    for kw=1:n
        ox(kkt,kw)= ce/(-obst(kkt,1)+(puntos(kw,1)));
        oy(kkt,kw)= ce/(-obst(kkt,2)+(puntos(kw,2)));
        oz(kkt,kw)= ce/(-obst(kkt,3)+(puntos(kw,3)));
    end
end

end

```

## Calculo de nueva posición de referencia de cada Cuatricóptero.

```

puntos(:,1)=al*alpha*(sum(x'))./ (sqrt(ssx(1,:).^2+ssy(1,:).^2+ssz(1,:).^2
))+nx+oxx'

puntos(:,2)=al*alpha*(sum(y'))./ (sqrt(ssx(1,:).^2+ssy(1,:).^2+ssz(1,:).^2
))+ny+oyy'

puntos(:,3)=al*alpha*(sum(z'))./ (sqrt(ssx(1,:).^2+ssy(1,:).^2+ssz(1,:).^2
))+nz+ozz'

```

## CONTROL FUZZY

### Calculo centroide

```

X=sum(puntos(:,1))/n;
Y=sum(puntos(:,2))/n;

Z=sum(puntos(:,3))/n;

```

### Calculo Distancia entre Cuatricópteros.

```

dist= sqrt((X-puntos(:,1)).^2+(Y-puntos(:,2)).^2+(Z-puntos(:,3)).^2)

```

### Uso del Sistema Fuzzy.

```
fis = readfis('fuzzy1');  
for ko=1:n  
    ix=[dist(1,:)];  
    cx(ko,1)= evalfis(ix,fis);  
end
```

**Hallar cada una de las distancia de Obstaculo a Cuatricóptero.**

```
for k=1:nn  
for kk=1:n  
    disto(k, kk)=norm(obs(k,1)-puntos(kk,:))  
end  
end
```