



Tecnológico de Monterrey

Actividad R_7. Control automático y navegación de un VANT

Carlos Adrián Delgado Vázquez A01735818

Alfredo Díaz López A01737250

Juan Paulo Salgado Arvizu A01737223

Bruno Manuel Zamora García A01798275

07 de junio del 2025

Resumen

Este reporte presenta una descripción detallada de los principios físicos, ecuaciones de movimiento, sistemas de control, navegación y planificación de trayectorias en vehículos aéreos no tripulados multirrotor (VANTs). Se revisa su clasificación según la disposición de los brazos y se analizan las tecnologías modernas utilizadas para garantizar estabilidad, precisión y seguridad en su operación.

Introducción

Los VANT multirrotor, equipados con varios rotores alrededor de un chasis central, combinan estabilidad en vuelo estacionario y gran maniobrabilidad, lo que los hace ideales para tareas como inspección, agricultura de precisión y respuesta a emergencias. Para misiones cada vez más autónomas y complejas, es esencial contar con sistemas de control automático y navegación que integren modelos dinámicos, algoritmos de estabilización (PID, LQR, MPC) y técnicas de posicionamiento (GPS, SLAM, odometría visual). Además, la planificación de trayectorias y la evasión de obstáculos (A^* , RRT*, Pure Pursuit, VFH/DWA) permiten operar de forma segura en entornos variables. Este reporte desarrolla primero la definición y fundamentos de un VANT multirrotor, luego explora su dinámica, control y navegación, y finaliza con los principales algoritmos de planificación y tendencias futuras.

1. Que es un VANT multirrotor?

Un dron, en términos simples, es un tipo de aeronave que no precisa de un piloto humano a bordo para volar. También se conoce como vehículo aéreo no tripulado (VANT) (Ceupe, 2024).

Los drones multirrotor principalmente utilizan motores eléctricos para acelerar y desplazarse, evitando los gases contaminantes presentes en motores de combustión, gracias a las baterías de litio de alta eficiencia. Se ha de señalar que cuantos más rotores compongan al multicóptero más estable y controlable será su vuelo. Los multicópteros pueden categorizarse según su número de rotores, existiendo los cuadricópteros (4 rotores), hexacópteros (6 rotores), octocópteros (8 rotores) Ilustración 1, etc, (Embention, 2024).



Ilustración 1 Dron Octocóptero

El uso de drones o VANTs ha crecido de forma exponencial en sectores como vigilancia, agricultura, topografía, logística y entretenimiento. Dentro de los drones, los multirrotor destacan por su maniobrabilidad y capacidad de vuelo vertical. Estos dispositivos combinan mecánica, electrónica y algoritmos avanzados para lograr vuelos estables y autónomos. Este reporte aborda los fundamentos físicos y computacionales que permiten su funcionamiento, clasificación y aplicación en contextos profesionales.

1.1 Línea del tiempo de los VANT multirrotor

- **1907** – El 29 de septiembre, el Bréguet-Richet Gyroplane No. 1, primer quadricóptero experimental, se elevó a 0,6 m durante un vuelo tripulado, marcando el nacimiento del multicóptero
- **1922** – El 11 de noviembre, el quadricóptero Cehmichen No. 2 realizó su primer vuelo controlado, convirtiéndose en el primer multicóptero confiable; el 4 de mayo de 1924 completó el primer circuito cerrado de 1 km
- **1956** – Hacia mediados de la década, el Convertawings Model A Quadrotor voló con éxito numerosas veces, demostrando por primera vez un vuelo sostenido con cuatro rotores y capacidad de avance
- **1958** – En 1958, el Ejército de EE. UU. recibió dos prototipos Curtiss-Wright VZ-7, un VTOL de cuatro ventiladores “flying jeep” controlado mediante variación de empuje individual
- **1999** – Ese año se diseñó el Draganflyer Stabilized Aerial Video System, primer cuadricóptero comercial de uso generalizado equipado con cámara integrada
- **2010** – En enero, Parrot presentó en CES el AR.Drone, primer cuadricóptero de consumo controlado por smartphone con streaming de video en tiempo real (Schramm, 2010).

- **2013** – El 7 de enero, DJI lanzó el Phantom 1, primer cuadricóptero listo para volar con GPS integrado, que impulsó el auge del mercado de drones de consumo
- **2016** – En marzo, DJI presentó el Phantom 4, incorporando sistemas de evitación de obstáculos y funciones autónomas avanzadas que elevaron el nivel de autonomía y seguridad (Drone, 2024).

2.Estado del arte de los VANTs multirrotor

Actualmente, los VANTs multirrotor son los más extendidos en aplicaciones civiles. Su ventaja radica en la facilidad de despegue/aterrizaje vertical (VTOL) y la precisión de vuelo estacionario. A nivel profesional, se integran sensores de alta precisión, sistemas GPS RTK y software de navegación inteligente con planificación en tiempo real y detección de obstáculos. Existen iniciativas formativas especializadas en su operación, como las de CEUPE y FreeDrone.

3.Clasificación de drones multirrotor por disposición de brazos (FreeDrone.ORG, 2025).

- Tricóptero: 3 brazos, 3 motores. Uso de servomotor trasero para estabilidad.
- Cuadricóptero (Ilustración 2): 4 brazos, 4 motores. Mas común en el mercado.
- Hexacópteros: 6 brazos, 6 motores. Alta estabilidad. Puede volar si falla un motor.
- Octocópteros: 8 brazos, 8 motores. Mayor potencia y redundancia.
- Coaxial: 4 brazos, 8 motores. Motores dobles por brazo. Resistente a cargas altas.

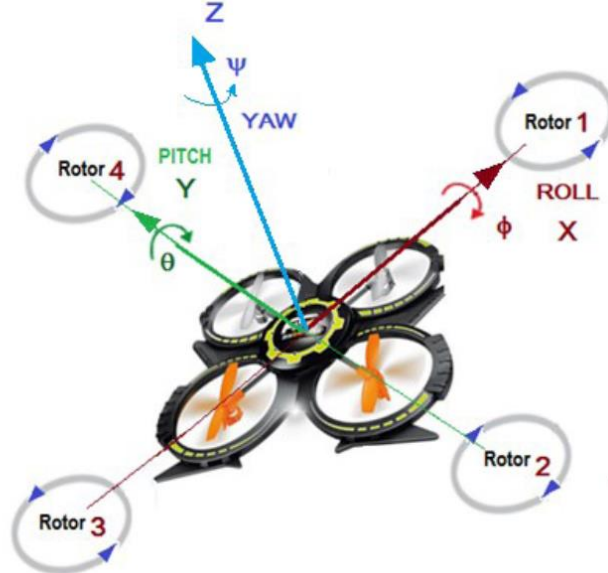


Ilustración 2 Esquema de cuadricóptero

4.Ecuaciones de movimiento y dinámica

En esta sección se establecen las leyes que describen el comportamiento dinámico de un VANT multirrotor. Primero se presentan las ecuaciones traslacionales que relacionan las fuerzas totales

generadas por los rotores con la aceleración del centro de masa en los ejes inercial. A continuación, se desarrollan las ecuaciones rotacionales, donde el momento de inercia y los torques individuales definen la evolución de las velocidades angulares alrededor de los ejes roll, pitch y yaw. Estos modelos serán la base para diseñar los controladores que garanticen estabilidad y seguimiento preciso de trayectorias.

4.1 Matrices de rotación

Las matrices de rotación son operadores lineales que describen la orientación de un cuerpo rígido al girar en torno a los ejes cartesianos. Se usan para transformar coordenadas de un sistema de referencia a otro sin alterar la longitud de los vectores (propiedad ortonormal).

3 grados rotacionales: Roll (phi), Pitch (theta), Yaw (psi) como se ve en la Ilustración 3.

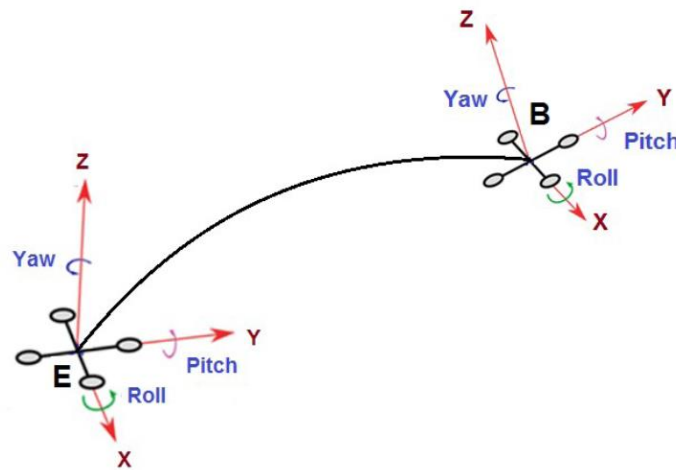


Ilustración 3 Marco de referencia de un dron Multirrotor

Ecuaciones:

Ecuación 1 Matriz de rotación ROLL

$$R(x, \phi) = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix}$$

Ecuación 2 Matriz de rotación PITCH

$$R(y, \theta) = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$$

Ecuación 3 Matriz de rotación en YAW

$$R(z, \psi) = \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix}$$

Ecuación 4 Matriz de rotación completa

$$R(\phi, \theta, \psi) = R(z, \psi) \cdot R(y, \theta) \cdot R(x, \phi) =$$

$$\begin{bmatrix} c\theta c\psi & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi & s\psi s\theta c\phi - s\phi c\psi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix}$$

La combinación sucesiva de estas rotaciones (Ecuación 4) (por ejemplo, $R=R_z(\psi) R_y(\theta) R_x(\phi)$) permite describir cualquier orientación en R^3 , dando origen a la matriz de rotación completa de un VANT multirrotor.

La relación entre las velocidades lineales en el sistema de cuerpo y las del sistema inercial viene dada por:

Ecuación 5 Modelo cinemático de un cuadricóptero

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_E \\ \dot{y}_E \\ \dot{z}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}$$

Mientras que la conversión de las velocidades angulares del cuerpo a las tasas de cambio de los ángulos de Euler se expresa como

Ecuación 6 Modelo cinemático general

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = W_{\eta}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & \frac{\sin\phi}{\cos\theta} & \frac{\cos\phi}{\cos\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

La primera matriz es una rotación pura alrededor de z por el ángulo de guiñada ψ y la segunda relaciona las componentes del vector de velocidades angulares con las derivadas de roll ϕ , pitch θ y yaw ψ usando funciones trigonométricas de ϕ y θ .

4.2 Dinámica Traslacional

En esta sección se analiza cómo las fuerzas generadas por los rotores de un VANT multirrotor interactúan con su masa y la gravedad para producir movimiento lineal en el espacio. Se estudiará el papel del empuje total resultante, su orientación respecto al eje vertical y la influencia de factores externos como la resistencia aerodinámica y la aceleración de la gravedad. Comprender estos principios es esencial para diseñar controladores que regulen con precisión la posición y trayectoria del vehículo en sus desplazamientos horizontales y verticales.

Dinámica traslacional: $m \cdot \ddot{r} = F_{\text{thrust}} + F_{\text{gravity}}$

Ecuación 7 Modelo de dinámica traslacional de un cuadricóptero

$$\ddot{\epsilon} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \frac{U_1}{m} \begin{bmatrix} (\cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\theta) \\ (\sin\psi \sin\theta \cos\phi + \cos\psi \sin\phi) \\ (\cos\theta \cos\phi) - mg \end{bmatrix}$$

4.3 Dinámica Rotacional

Dinámica rotacional: $I \cdot \dot{w}' + w \times (I \cdot w) = \tau$

Las aceleraciones angulares de los ángulos de Euler vienen dadas por los torques de control aplicados sobre cada eje, normalizados por los momentos de inercia I y los términos de acoplamiento giratorio que surgen de un tensor de inercia asimétrico:

Ecuación 8 Modelo dinámico completo

$$\ddot{x} = \frac{(\cos\varphi \sin\theta \cos\phi + \sin\varphi \sin\theta)U_1}{m}$$

$$\ddot{y} = \frac{(\sin\psi \sin\theta \cos\phi + \cos\psi \sin\theta)U_1}{m}$$

$$\ddot{z} = [(\cos\theta \cos\phi - mg)]U_1/m$$

$$\ddot{\phi} = \frac{[(I_{yy} - I_{zz})\dot{\psi}\dot{\phi} + \tau_{\phi}]}{I_{xx}} + \psi\dot{\theta}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{[(I_{zz} - I_{xx})\dot{\psi}\dot{\theta} + \tau_{\theta}]}{I_{yy}} - \psi\dot{\phi}$$

$$\ddot{\psi} = \frac{[(I_{xx} - I_{yy})\dot{\phi}\dot{\theta} + \tau_{\psi}]}{I_{zz}} + \phi\dot{\theta}$$

5. Control automático y estabilización de vuelo

El vuelo de un dron multirrotor es inestable por naturaleza, por lo que necesita estabilización automática. Se logra mediante sensores (IMU, barómetro, GPS, magnetómetro) y controladores como PID, LQR o MPC. Estos sistemas ajustan constantemente la velocidad de los motores para corregir inclinaciones, altitud o rumbo (*Vista De Desarrollo De Un Modelo Matemático, Cinemático Y Dinámico Con La Aplicación De Software, Para Modificar El Funcionamiento De Un Dron, Para Que Este Realice Monitoreo Automático*, n.d.).

Flujo típico: Referencia -> Error -> Controlador PID -> Ajuste de motores ESCs y motores sin escobillas ejecutan las órdenes calculadas para mantener el equilibrio y el movimiento deseado

Ilustración 4

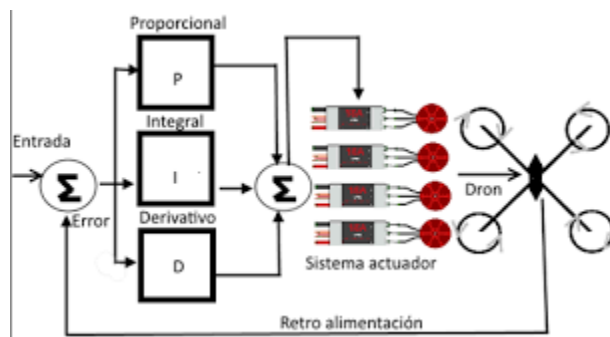


Ilustración 4 PID en un dron con sistema de actuadores

5.1 Algoritmos de control en VANT

-PID (Control Proporcional–Integral–Derivativo)

- **Proporcional (P):** ajusta la salida en proporción al error actual.
- **Integral (I):** corrige errores acumulados en el tiempo, eliminando sesgos permanentes.

- **Derivativo (D):** predice la tendencia del error, mejorando la respuesta y reduciendo sobreimpulsos.
- **Ventajas:** fácil de entender e implementar; bajo costo computacional.
- **Desventajas:** no gestiona restricciones ni dinámica multivariable; ajuste manual puede ser laborioso Ilustración 5.

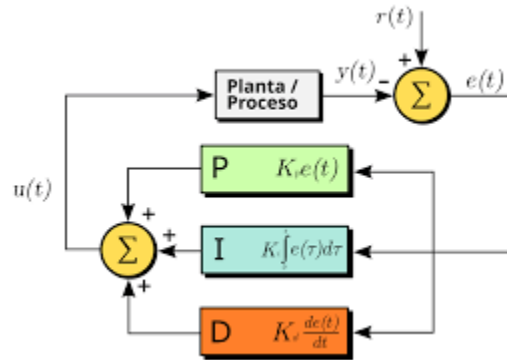


Ilustración 5 PID funcionamiento

-LQR (Regulador Cuadrático Lineal)

- **Modelo lineal:** requiere un modelo de estado $\dot{x} = Ax + Bu$.
- **Función de costo:** minimiza $J = \int (x^T Q x + u^T R u) dt$, penalizando estados y esfuerzos de control.
- **Ganancia óptima:** se calcula resolviendo la ecuación de Riccati, $u = -Kx$ **Ventajas:** ofrece compromiso óptimo entre precisión y energía de control; robusto ante ruidos gaussianos pequeños.
- **Desventajas:** solo para sistemas lineales o linealizados; no maneja explícitamente restricciones Ilustración 6.

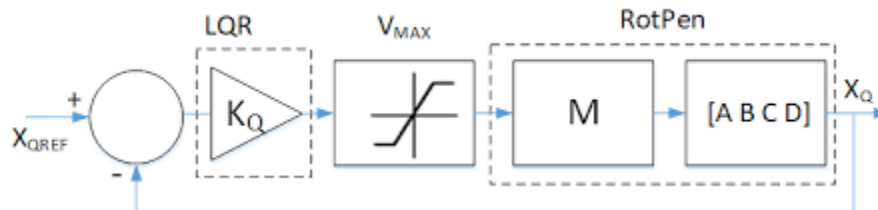


Ilustración 6 Regulador Cuadrático Lineal

-MPC (Control Predictivo Basado en Modelo)

- **Predicción:** usa un modelo dinámico para simular el comportamiento futuro durante un horizonte finito.
- **Optimización receding-horizon:** en cada paso resuelve un problema cuadrático (o no lineal) sujeto a restricciones (entrada, salida, estados).
- **Feedback implícito:** aplica solo la primera acción óptima y repite el proceso en el siguiente instante.
- **Ventajas:** maneja restricciones de forma nativa; óptimo y multivariable.

- **Desventajas:** exige mayor potencia de cálculo y desarrollo de un modelo preciso; latencia en tiempos reales Ilustración 7.

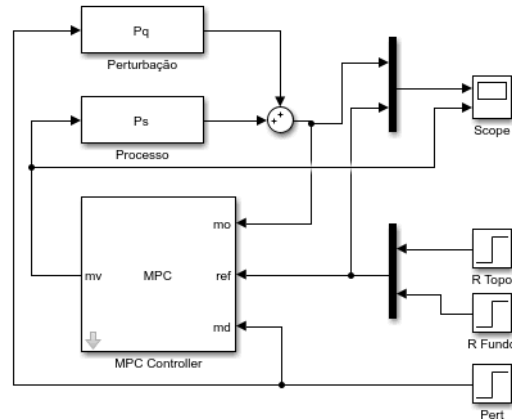


Ilustración 7 Control Predictivo Basado en Modelo

5.2 Técnicas de navegación y posicionamiento

La navegación permite que el dron conozca su ubicación, velocidad y rumbo.

- GPS: uso general, precisión de 2 metros
- RTK-GPS: precisión centimétrica, ideal para agricultura y topografía Ilustración 8.



Ilustración 8 RTK-GPS

- SLAM: navegación en interiores sin GPS, mediante cámaras o LiDAR Ilustración 9.

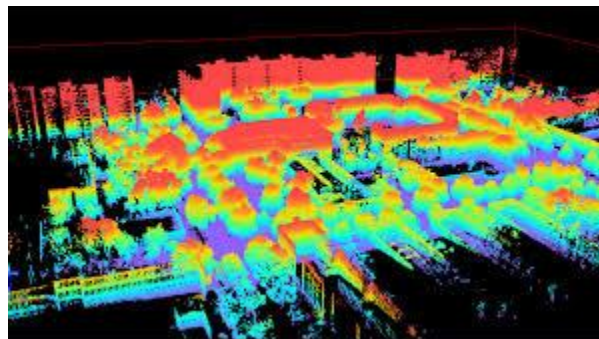


Ilustración 9 Mapeo SLAM

- Fusión sensorial: combina IMU, GPS, barómetro, etc. para aumentar precisión y confiabilidad-
- Odometría visual: analiza movimiento relativo con visión computacional.

6. Planificación de trayectorias y evasión de obstáculos

La planificación define cómo moverse del punto A al B evitando colisiones.

- Algoritmos como A* o RRT* generan rutas óptimas, como en la Ilustración 10.

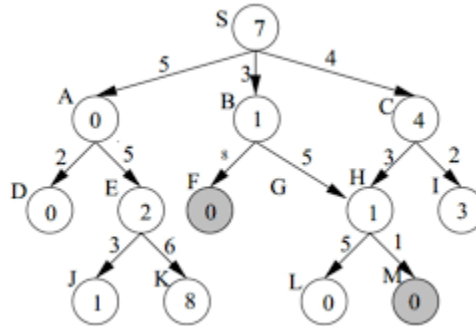


Ilustración 10 Algoritmo de árbol

- Pure Pursuit y MPC se usan para seguir esas rutas de forma suave.

6.1 Evasión reactiva de obstáculos (VFH, DWA)

- **Procesamiento en tiempo real**

Ambos métodos reciben datos de sensores (LIDAR, ultrasonido, cámaras) a alta frecuencia, construyen una representación local del entorno y deciden inmediatamente cómo desviar el rumbo sin interrumpir el vuelo.

- **Viscous Flow Histogram (VFH)**

- Construye un histograma polar de densidad de obstáculos alrededor del dron.
- Detecta “valleys” libres de obstáculos y elige la dirección más cercana al objetivo.
- Incorpora restricciones cinemáticas para asegurar que el giro o la inclinación requerida sean factibles Ilustración 11.

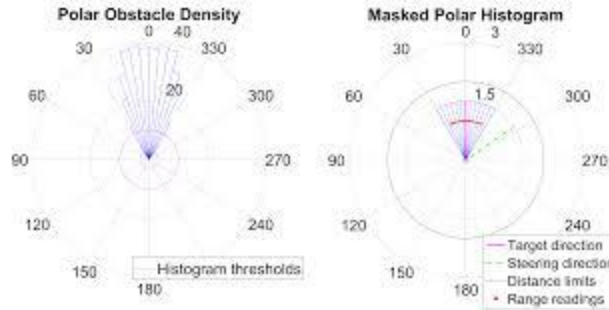


Ilustración 11 Vector Field Histogram

- **Dynamic Window Approach (DWA)**

- Define un rango dinámico de velocidades lineales y angulares factibles según la inercia y los límites de aceleración.
- Simula trayectorias a corto plazo para cada par de velocidades y evalúa seguridad (distancia mínima a obstáculos) y progreso hacia la meta.
- Selecciona la acción que maximiza un criterio combinado de seguridad, eficiencia y avance Ilustración 12.

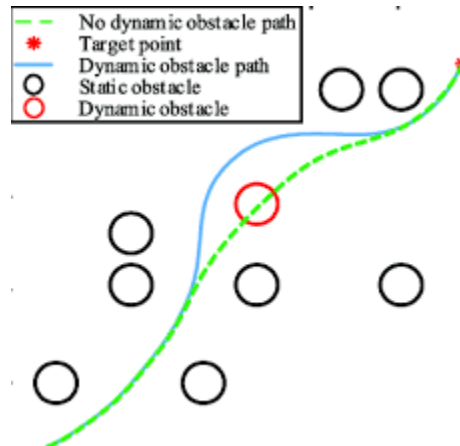


Ilustración 12 Dynamic Window Approach ejemplo

- **Evitar zonas de no vuelo**

Las áreas restringidas (por ejemplo, corredores aéreos, infraestructuras críticas) se modelan como obstáculos estáticos en el histograma o como restricciones en la ventana dinámica, garantizando que el dron no las atraviese.

- **Ventajas y retos**

- **Ventajas:** rápida respuesta sin dependencia de mapas globales; fácil integración en sistemas embebidos.

- **Retos:** sensibilidad al ruido de sensores; puede generar trayectorias subóptimas en entornos muy congestionados.

7. Seguimiento de ruta: pure pursuit y MPC

- **Pure Pursuit**

- **Principio geométrico:** el controlador elige un “punto de seguimiento” a una distancia fija (look-ahead) sobre la trayectoria deseada y calcula la curvatura necesaria para alcanzarlo.
- **Implementación simple:** basta con medir la posición actual, buscar el objetivo en la trayectoria y ajustar la velocidad angular basada en la geometría del polígono formado.
- **Ventajas:** fácil de implementar, baja carga computacional, buena respuesta en curvas suaves.
- **Limitaciones:** sensibilidad al parámetro look-ahead (demasiado corto produce oscilaciones, muy largo sub-viraje) y no considera dinámicas ni límites de aceleración del vehículo Ilustración 13.

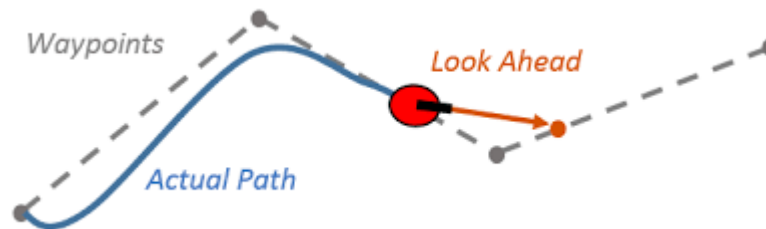


Ilustración 13 Seguimiento por Pure Pursuit

- **Model Predictive Control (MPC)**

- **Optimización receding-horizon:** en cada instante, el controlador predice futuros estados del vehículo usando un modelo dinámico y resuelve un problema de optimización para minimizar el error de seguimiento y el esfuerzo de control.
- **Manejo de restricciones:** incorpora directamente límites físicos (velocidad máxima, aceleraciones) y evita salirse de la ruta o chocar con obstáculos al incluirlos como restricciones en el problema.
- **Ventajas:** robustez en entornos complejos, mejor comportamiento ante cambios bruscos y capacidad de anticiparse a dinámicas del vehículo.
- **Limitaciones:** alto costo computacional (requiere resolver QP o NLP en tiempo real), depende de la fidelidad del modelo y puede introducir latencia si no se optimiza adecuadamente Ilustración 14.



Ilustración 14 Model Predictive Control funcionamiento

8. Futuro de los VANTs

El futuro de los VANT multirrotor estará marcado por el desarrollo de inteligencia artificial, comunicaciones de alta velocidad y fuentes de energía de mayor densidad. Por un lado, la integración de algoritmos de aprendizaje profundo permitirá un nivel de autonomía sin precedentes: detección y clasificación de objetos en tiempo real, toma de decisiones de ruta adaptativa y enfoques colaborativos de enjambre para misiones complejas. Por otro, el uso de redes 5G/6G y protocolos dedicados garantizará enlaces de baja latencia para operaciones beyond-visual-line-of-sight (BVLOS) seguras, facilitando aplicaciones de reparto express y monitoreo continuo en entornos urbanos.

En el ámbito energético, se espera la adopción de baterías de estado sólido e incluso celdas de hidrógeno que multipliquen la autonomía y aceleren los tiempos de recarga, abriendo la puerta a vuelos de larga distancia y misiones prolongadas. A nivel regulatorio, avanzarán esquemas de certificación basados en estándares de seguridad funcional y “geo-vallas” digitales que delimiten zonas de vuelo permitidas, promoviendo un tráfico aéreo integrado con sistemas tripulados.

Finalmente, la miniaturización de sensores y la evolución de plataformas híbridas (dron + autonomías terrestres) ampliarán el alcance de los VANTs hacia aplicaciones cotidianas, desde inspección de infraestructuras y agricultura de precisión hasta emergencias médicas y logística urbana, consolidándolos como un pilar de la nueva economía inteligente.

Conclusión

Los VANTs multirrotor destacan por su versatilidad, estabilidad y precisión, lo que los convierte en herramientas clave para aplicaciones que requieren maniobras controladas en espacios reducidos y vuelos estacionarios. Su diseño compacto, combinado con sensores avanzados y algoritmos de control automático, les permite adaptarse a condiciones cambiantes del entorno y ejecutar misiones con alta eficiencia.

Tecnologías como la navegación GPS, SLAM y la planificación de trayectorias en tiempo real, junto con la clasificación estructural según su número de brazos y motores, permiten personalizar su uso según la tarea: desde agricultura de precisión hasta inspecciones industriales.

En conjunto, los drones multirrotor representan una solución aérea inteligente, adaptable y en constante evolución, con un papel cada vez más relevante en la automatización y la robótica aplicada.

Referencias

- Embention. (2024, August 30). *Drones multirrotor, del hobby al uso profesional*. <https://www.embention.com/es/noticias/drones-multirrotor-profesionales/>
- Ceupe, A. (2024, April 24). Ceupe. *Ceupe*. <https://www.ceupe.com/blog/dron.html>
- Vista de Desarrollo de un modelo matemático, cinemático y dinámico con la aplicación de software, para modificar el funcionamiento de un dron, para que este realice monitoreo automático*. (n.d.). <https://recimundo.com/index.php/es/article/view/814/1291>
- FreeDrone.ORG. (2025, April 1). *Drones Multirrotor: Clasificación por peso y disposición de rotores*. <https://freedrone.org/formacion/drones/uas-drones-aereos/multirrotor/>
- Drone. (2024, June 4). *Timeline of DJI drones: From the Phantom 1 to the Mavic Air*. DrDrone.ca. <https://drdrone.com/blogs/drone-news-drone-help-blog/timeline-of-dji-drones?utm>
- Schramm, M. (2010, February 11). *Macworld 2010: Hands-on with the Parrot AR.Drone*. Engadget. <https://www.engadget.com/2010-02-10-macworld-2010-hands-on-with-the-parrot-ar-drone.html?utm>