

Control Automático y Navegación de un VANT

DANIELA BERENICE HERNÁNDEZ DE VICENTE, ALEJANDRO ARMENTA ARELLANO,
DANA MARIAN RIVERA OROPEZA

¹Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Puebla, Puebla, México

*Autores correspondientes: a01735346@itesm.mx, a00830027@itesm.mx, a01734879@tec.mx

Publicado el 10/06/2023

En el reporte abordamos las principales características de los VANT de ala fija, concentrándose específicamente en sus características técnicas como los controladores involucrados en el vuelo de los VANTs, las ecuaciones que modelan el movimiento involucradas en los cálculos de las condiciones necesarias para efectuar el vuelo, de igual manera abordaremos diferentes ámbitos que se ven involucrados en el vuelo de este tipo de VANTs como la estabilización en el vuelo, técnicas de navegación y posicionamiento así como los elementos que influyen en el vuelo y las diferentes necesidades que deben de atender para tener un vuelo óptimo.

Profundizamos en los temas mencionados para ofrecer un mejor entendimiento al lector sobre los factores que se ven involucrados en el funcionamiento de los drones de ala fija.



Imagen 1.

1. Introducción.

A. El origen de los vehículos aéreos no tripulados .

Los vehículos aéreos no tripulados mejor conocidos como VANT, UAVS o RAPS, incluyen una amplia gama de dispositivos voladores que a lo largo de la historia han pasado por grandes funcionamientos como guiar bombas, drones como objetivo y señuelo, aeronaves de investigación, combate e incluso naves espaciales.

Ante esto el Departamento de Defensa de los Estados Unidos define a los VANT como vehículos aéreos motorizados los cuales no llevan a un operador humano, este usa fuerzas aerodinámicas para proveer levantamiento, con esto se refiere a

que pueda volar autónomamente o pueda ser pilotado remotamente.

Ahora bien, el primer VANT en realizar un vuelo exitoso fue el torpedo aéreo Curtiss-Sperry en 1918. Desde aquel primer vuelo de un VANT y hasta fechas recientes diversos avances tecnológicos han permitido mejorar las capacidades de dichos vehículos como el desarrollo de ciertos sistemas de radio comunicación, sistemas de navegación y sistemas de posicionamiento global. También se han tenido grandes avances con el entendimiento de la dinámica de estas aeronaves en conjunto con más sofisticadas y nuevas teorías del control, las cuales han permitido mejorar los sistemas de control de los VANTs.

Ahora bien, con el fin de la guerra fría el mercado de los VANTs ha mostrado un crecimiento acelerado en todos sus campos de aplicación ya que son empleados en áreas más diversas. [1]

Aunado a esto no solo se han logrado grandes avances tecnológicos sino también ha traído consigo nuevos retos como el desarrollo de materiales más ligeros y resistentes a ciertos cambios climáticos, también ha conllevado a tener mejoras en las comunicaciones, mejoras en sistemas de control y mayor autonomía.

Hoy en día este tipo de aeronaves se caracterizan por su diseño aerodinámico, el cual es similar al de un avión convencional, esto proporciona ciertas ventajas y capacidades únicas.

De igual manera gracias a su versatilidad y su vuelo autónomo, este tipo de VANTs se han convertido en herramientas indispensables para aplicaciones como la agricultura, la vigilancia y monitoreo de infraestructuras, la topografía, la investigación científica, entre muchas otras aplicaciones más.

Los VANTs de ala fija tienen ciertas características, a continuación enumeramos algunas de ellas, las cuales son fundamentales para entender las ecuaciones de movimiento de las mismas.

1. Diseño aerodinámico: Los Vant de ala fija como anteriormente ya se había mencionado, tienen una configuración similar a la de los aviones

convencionales, ya que cuentan con alas fijas que generan sustentación (término que explicaremos más adelante) lo cual permite un vuelo más estable y eficiente. Con esta forma aerodinámica se les proporciona mayor velocidad y autonomía en comparación con los drones de ala rotatoria. [2]

2. Vuelo de larga duración : Gracias a su increíble diseño y su propulsión eficiente, los VANT de ala fija pueden volar durante periodos prolongados. Cabe destacar que algunos modelos pueden alcanzar varias horas de vuelo continuo, esto los hace ideales para misiones que requieren una cobertura extensa o un monitoreo prolongado.
3. Cara útil versátil: Estos cuentan con una capacidad significativa de carga útil. Lo que les permite transportar diferentes tipos de sensores, cámaras, ciertos equipos de comunicación y algunos otros dispositivos, esto según las necesidades específicas de la misión. [2]
4. Vuelo autónomo: Están equipados con sistemas de navegación y control avanzados, los cuales les permite volar de manera autónoma, siguiendo rutas en ocasiones preprogramadas o utilizando técnicas mediante el piloto automático. Esto simplifica operaciones y reduce la necesidad constante de tener una intervención humana. [2]
5. Alcance y cobertura: Gracias a su diseño y eficiencia, estos pueden cubrir grandes áreas geográficas en un solo vuelo. Esto los hace especialmente adecuados para aplicaciones como la vigilancia de fronteras, la inspección de infraestructuras extensas o la cartografía de grandes terrenos, con esto se refiere a cualquier aplicación donde se requiera una amplia cobertura en un tiempo reducido.[2]
6. Estabilidad en condiciones adversas: Estos son menos susceptibles a las condiciones climáticas y a los vientos fuertes en comparación con los drones de ala rotatoria. Cabe mencionar que su diseño aerodinámico les proporciona una mayor estabilidad y resistencia, con esto se les permite operar de manera efectiva incluso en ciertos entornos desafiantes. [2]

De igual manera es importante mencionar que la gran documentación que existe está orientada mayormente a aviones o aeronaves militares, ya que como se había mencionado anteriormente se rigen ante el mismo principio de vuelo.

Posteriormente y con el desarrollo de nuevas tecnologías ya se vienen utilizando para aplicaciones civiles, dentro de las cuales se hace notar el uso logístico de aprovisionamiento, debido al gran aumento de los desastres naturales a nivel mundial.

En el 2008, el CONCYTEC y las Fuerzas armadas desarrollaron tres vehículos para el servicio en el VRAE: el “Eléctrico”, “Pegaso” y “Quinde”, siendo este un proyecto liderado por el Centro de Desarrollo e Investigación de Proyectos (CIDEP) de la fuerza aérea del Perú.

Por otra parte, en la revista DIALOGO, Silva, (2017) informa sobre los últimos VANTs desarrollados en el Perú por CIDEP: el RICUK y el AMARU, por lo que gracias a este proyecto aprobado por el CIDEP el AMARU tiene total autonomía en el despegue y el aterrizaje, se eleva hasta 1000 m, vuela hasta 5 hrs, alcanza los 50 km desde su base de despegue y posee cámaras infrarrojas para tareas de reconocimiento e inteligencia. Por último en este mismo artículo también se describen los primeros trabajos en el desarrollo del último VANT denominado PISCO, terminado en el 2018. [11]

2. MARCO TEÓRICO

A. Principio del Vuelo de un VANT de Ala Fija.

Este se basa en los mismos principios aerodinámicos que rigen el vuelo de cualquier aeronave de ala fija, como por ejemplo los aviones convencionales. [3]

El vuelo de este tipo de vehículos se logra mediante la generación de sustentación y el control de las fuerzas aerodinámicas.

El principio fundamental es que el ala fija del vehículo está diseñada para generar sustentación a medida que el aire fluye sobre la misma. Por lo que al moverse a través del aire, el ala produce una diferencia de presiones entre su parte superior e inferior, lo que crea una fuerza ascendente.

Por otro lado, para controlar el vuelo de este tipo de aeronaves, se utilizan superficies de control, como alerones, timones y elevadores, los cuales permiten ajustar y modificar las diferentes fuerzas aerodinámicas sobre el vehículo. Este tipo de superficies se controlan mediante sistemas de control automático, por lo que le permite al vehículo cambiar su actitud (orientación) en el aire, realizar maniobras y poder mantener su estabilidad.[3]

Para definir sus movimientos cuenta con tres ejes principales de referencia como se puede observar en la imagen 1.

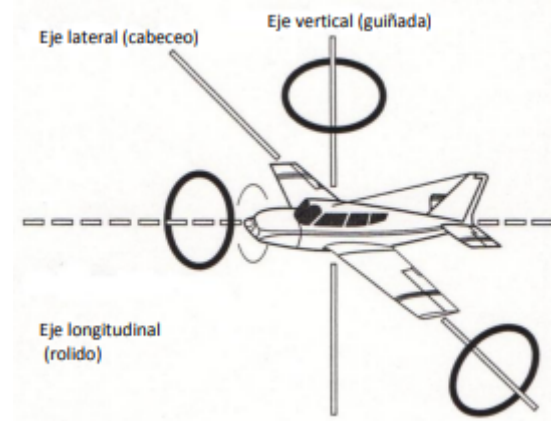


Imagen 1.

B. Eje Longitudinal (rolido).

Es una línea imaginaria que se extiende a través del fuselaje, desde la nariz a la cola. El movimiento alrededor del eje longitudinal se llama rolido o roll, y se produce por el movimiento de los alerones en los bordes de fuga de cada extremo del ala. (ver figura 2) [3]

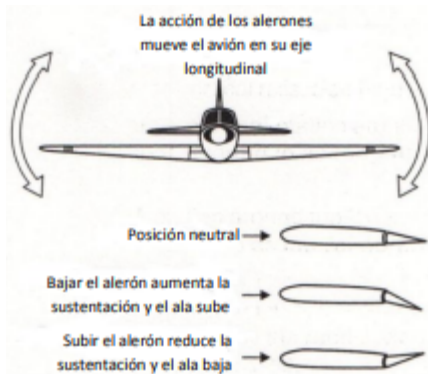


Imagen 2.

Aunado a esta descripción es importante destacar que para este eje también se cuenta con ecuaciones de momento, las cuales nos sirven para describir los momentos o torques que actúan sobre el vehículo durante su vuelo.

- **Ecuación de momento.**

Este es el resultado de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el ala del vehículo, por lo que se crea un giro alrededor del eje longitudinal del vehículo. Está sumamente relacionado con el coeficiente de alabeo (CI) y el área del ala (S).

Su ecuación básica se define como la siguiente.

$$L = 1/2 * p * V^2 * S * c * CI \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

- p es la densidad del aire.
- V la velocidad del vehículo.
- S el área del ala.
- c la cuerda media del ala.
- CI es el coeficiente de momento de alabeo, el cual depende del perfil del ala y el ángulo de ataque.

C. Eje Vertical (guiñada).

Es la línea imaginaria que pasa verticalmente a través del centro de gravedad. Este movimiento se llama guiñada o yaw, y se produce por el movimiento del timón en la parte trasera del conjunto vertical de cola. (ver la imagen 3) [3]

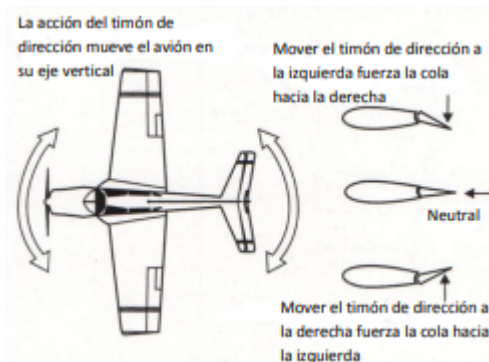


Imagen 3.

Aunado a esta descripción es importante destacar que para este eje también se cuenta con ecuaciones de momento, las cuales nos sirven para describir los momentos o torques que actúan sobre el vehículo durante su vuelo.

- **Ecuación de momento.**

Este es el resultado de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre la superficie vertical de control del VANT y que con este se crea un giro alrededor del eje vertical (eje z) del vehículo. Está relacionado con el coeficiente de momento de guiñada (Cn) y el área del timón (Sr).

Su ecuación básica se define como la siguiente.

$$N = 1/2 * p * V^2 * Sr * b * Cn \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

- p es la densidad del aire.
- V la velocidad del vehículo.
- Sr el área del timón.
- b es la envergadura del vehículo.
- Cn es el coeficiente de momento de guiñada, el cual depende del perfil del timón y el ángulo de deflexión.

D. Eje Lateral (cabeceo).

Es la línea imaginaria que se extiende en el sentido transversal de punta a punta del ala, este movimiento se llama cabeceo o pitch y se produce por el movimiento del elevador en la parte trasera del conjunto horizontal de cola. (ver imagen 4)[3]

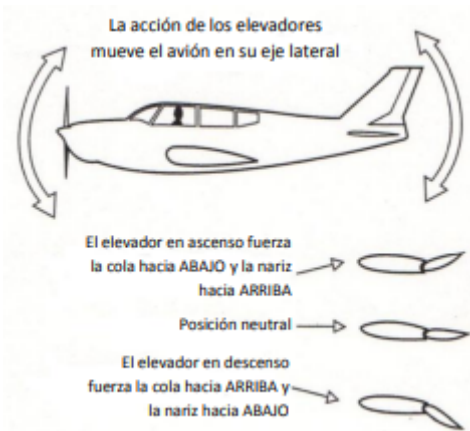


Imagen 4.

Aunado a esta descripción es importante destacar que para este eje también se cuenta con ecuaciones de momento, las cuales nos sirven para describir los momentos o torques que actúan sobre el vehículo durante su vuelo.

- **Ecuación de momento cabeceo.**

Este es el resultado de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre la superficie horizontal de control del VANT y con este crea un giro alrededor del eje lateral del vehículo. Por lo que está relacionado con el coeficiente de momento de cabeceo (Cm) y el área del elevador (Se).

Su ecuación básica se define como la siguiente.

$$M = 1/2 * p * V^2 * Se * c * Cm \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

- P es la densidad del aire.
- V es la velocidad del vehículo.
- Se es el área del elevador.
- c es la cuerda media del elevador
- Cm es el coeficiente de momento de cabeceo, el cual depende del perfil del elevador y el ángulo de deflexión.

E. Fuerzas Básicas.

Estas son fuerzas que interactúan entre sí durante todo el vuelo de un VANT, y son fundamentales para el control y estabilidad del mismo. (ver imagen 5)[3]



Imagen 5.

1. Sustentación.

Esta es la fuerza generada por el ala del vehículo la cual permite levantarlo en vuelo. Está directamente relacionada con la velocidad del aire que pasa sobre el ala y con el ángulo de ataque, el cual es el ángulo entre la dirección del flujo de aire relativo al ala y la línea de referencia del ala. [3]

Su ecuación básica es la siguiente.

$$L = 1/2 * p * V^2 * S * CL \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

- p es la densidad del aire.
- V es la velocidad del vehículo.
- S es la superficie alar del ala.
- CL es el coeficiente de sustentación, el cual depende del perfil del ala y el ángulo de ataque.

2. Fuerza de peso.

Esta es la fuerza gravitacional que actúa sobre el vehículo debido a la atracción de la Tierra. [3]

Su ecuación básica es la siguiente.

$$W = m * g \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

- m es la masa del vehículo.
- g es la aceleración debido a la gravedad.

3. Fuerza de tracción o empuje.

Esta es la fuerza generada por el motor o los propulsores del vehículo, los cuales impulsan al VANT hacia adelante.[3]

Su ecuación básica es la siguiente.

$$T = n * p * A * V * (1 - \exp(-b * V/n)) \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

- n es la eficiencia del motor.
- p es la densidad del aire.
- A es el área efectiva del flujo de aire a través de la toma de aire.
- V es la velocidad de salida del flujo de aire.
- b es la constante que describe las características del motor.

4. Resistencia

Es la fuerza opuesta al avance del vehículo y estopa relacionada con la fricción del aire sobre la superficie del vehículo.[3]

Su ecuación básica es la siguiente.

$$D = 1/2 * p * V^2 * S * CD \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

- p es la densidad del aire.
- V es la velocidad del vehículo.
- S es el área frontal expuesta al flujo de aire.
- CD es el coeficiente de resistencia, el cual depende de la forma y características aerodinámicas del vehículo.

De igual manera la resistencia puede ser clasificada en dos tipos, parásita e inducida. [3]

1. **Parásita:** Producida por aquellas partes de la aeronave que no contribuyen a la sustentación (tren de aterrizaje, antenas,etc). Se incrementa con el aumento de la velocidad.
2. **Inducida:** Consecuencia de la sustentación, la alta presión del aire debajo del ala tratando de fluir alrededor del borde marginal hacia el área de baja presión sobre el ala provoca vórtices detrás del borde marginal.

F. Grados de Libertad de un VANT de Ala Fija.

Los grados de libertad se refieren a los movimientos independientes que puede realizar la aeronave durante el vuelo. Por lo que cada grado de libertad representa una dirección o eje en el cual el vehículo puede desarrollarse.

En general los VANT de ala fija se distinguen por tres grados de libertad principales, claro es que algunas otras aplicaciones pueden requerir más grados de libertad, siendo hasta 6 los posibles. [4]

1. **Grado de libertad longitudinal:** Este se refiere al movimiento generado a lo largo del eje longitudinal, el cual va desde la parte delantera hasta la parte trasera. Está relacionado con los cambios de velocidad, altitud y ángulo de ataque.
2. **Grado de libertad lateral:** Este se refiere al movimiento generado a lo largo de una ala hasta la otra. Está relacionado con los cambios en la dirección y la inclinación lateral del vehículo.
3. **Grado de libertad vertical:** Este se refiere al movimiento generado a lo largo del eje vertical del vehículo, el cual se extiende desde la parte inferior hasta la parte superior de la aeronave. Está relacionado con los cambios de altitud y el ascenso o descenso del vehículo.

G. Ecuaciones de Movimiento.

Las ecuaciones de movimiento son fundamentales para comprender y predecir el comportamiento del VANT de ala fija durante todo el vuelo. Estas permiten analizar y modelar cómo pueden llegar a cambiar las variables de posición, velocidad y aceleración de un VANT en función del tiempo. Por lo que sus principales utilidades son las siguientes:

1. **Diseño y simulación:** Estas proporcionan una base matemática para el diseño y la simulación del VANT. Por lo que con estas ecuaciones los ingenieros pueden evaluar cómo diferentes configuraciones y parámetros

pueden llegar a afectar el rendimiento y la estabilidad de la misma aeronave durante su vuelo. Con esto se permite optimizar el diseño antes de la construcción física del vehículo.[5]

2. **Control y navegación:** Estas son esenciales para el desarrollo de algoritmos de control y navegación en los VANT. Por lo que con estas se puede modelar el comportamiento dinámico de la misma aeronave y con esto diseñar sistemas de control que permitan mantener la estabilidad, controlen la altitud, sigan una trayectoria específica, realicen maniobras y con esto cumplan con los objetivos de la misión.[5]
3. **Análisis de rendimiento:** Estas facilitan el análisis del rendimiento del VANT en términos de velocidad, alcance, autonomía, capacidad de carga, resistencia al viento, eficiencia energética y otros parámetros relevantes para este tipo de vehículos. Estos análisis son cruciales para evaluar la idoneidad del VANT para una determinada aplicación.[5]
4. **Evaluación de seguridad:** Estas son importantes para evaluar la seguridad y la estabilidad del VANT durante diversas condiciones de vuelo. Por lo que es importante destacar que permiten identificar situaciones críticas, como pérdida de control, condiciones de viento fuerte o maniobras extremas, para que con esto se puedan diseñar sistemas de seguridad que mitiguen los riesgos asociados a dichos problemas.[5]

En resumen, las ecuaciones de movimiento son herramientas fundamentales para el diseño, control, navegación, análisis de rendimiento y evaluación de seguridad de dichos vehículos. Por lo que proporcionan una base matemática para comprender y optimizar el comportamiento de la aeronave en vuelo, con esto se contribuye al desarrollo y la mejora de este tipo de tecnología en diversas aplicaciones como lo sería la vigilancia, la cartografía o la agricultura.

- **Ecuaciones de posición.**

Para estas ecuaciones contamos con dos variantes ya que la posición podría definirse como en dos dimensiones ya que con una de ellas se puede calcular la altitud.

Para posición horizontal tenemos la siguiente ecuación.

$$x(t) = x(0) + Vx(0) * t \quad \text{Ec. 1}$$

Mientras que para la posición vertical tenemos la siguiente ecuación.

$$y(t) = y(0) + Vy(0) * t - (1/2) * g * t^2 \quad \text{Ec. 2}$$

En este contexto la velocidad de un VANT se descompone en dos componentes horizontal (V_x) y vertical (V_y) debido al movimiento tridimensional en el espacio donde se desempeña.

Por lo que V_y es el componente vertical de la velocidad, igual conocida como velocidad vertical, donde está representa la tasa de cambio de la posición en dirección vertical a lo largo del tiempo. [6]

Esta es importante para calcular la altitud del VANT de ala fija, esto quiere decir que se utiliza para calcular la distancia vertical con respecto al punto de referencia, como el nivel del mar o un punto de referencia específico, por lo que está puede ser positiva si el VANT está ascendiendo, negativa si está descendiendo o cero si está manteniendo su altitud de manera constante.

Por lo que por ejemplo, si se desea que el VANT tenga una altitud constante, se puede emplear un controlador de retroalimentación para así poder ajustar la velocidad vertical en función de las lecturas de sensores de altitud y de esta forma poder mantenerla cercana a cero.

Por otro lado en las ecuaciones de posición la V_x representa el componente horizontal de la velocidad, mejor conocida como velocidad horizontal. Aunado a esto y debido a su movimiento tridimensional en el espacio está representa la tasa de cambio de la posición en dirección horizontal a lo largo del tiempo. [6]

Por lo que la velocidad horizontal es fundamental para determinar la velocidad y la dirección del VANT en un plano horizontal. Está puede ser positiva siempre y cuando el VANT se mueva hacia adelante en su eje X, negativa si se mueve hacia atrás o cero si está en un estado de reposo o mantiene cierta velocidad constante.

Entonces una vez entendiendo este concepto podemos deducir lo siguiente, si se desea que el VANT vuele a una velocidad constante, se puede utilizar un controlador de retroalimentación para poder ajustar la velocidad horizontal en función de las lecturas de sensores de velocidad y así poder mantenerla cercano a su objetivo.

- **Ecuaciones de velocidad.**

Ahora bien, para las ecuaciones de velocidad contamos con dos variantes. [6]

Para velocidad horizontal tenemos la siguiente ecuación.

$$Vx(t) = Vx(0) \quad \text{Ec. 3}$$

Mientras que para la velocidad vertical contamos con la siguiente ecuación.

$$Vy(t) = Vy(0) - g * t \quad \text{Ec. 4}$$

Donde en este contexto la velocidad horizontal está influenciada principalmente por la potencia que es generada por los motores del VANT, así como las fuerzas de arrastre y sustentación generadas por el perfil del ala y la misma geometría del vehículo. Si se reportan condiciones normales de vuelo, la velocidad tiende a mantenerse constante o variar según sean las decisiones del piloto o los comandos de control.

Por otro lado, la velocidad en este contexto está influenciada por la relación entre la potencia de los motores y la resistencia aerodinámica, así como por el peso del mismo VANT. Por lo que en condiciones de vuelo nivelado, la velocidad vertical puede ser cero, lo que indicaría que el VANT mantiene una altitud constante. Aunque es importante destacar que cuando se aplica potencia adicional o se cambia el ángulo de ataque del ala, la misma velocidad vertical puede cambiar y el VANT puede ascender o descender.

Cabe destacar que estas ecuaciones de velocidad pueden variar dependiendo del modelo y las características específicas del VANT de ala fija empleado. Suelen estar integradas en los sistemas de control de vuelo y son utilizadas por los controladores automáticos para ajustar y mantener la velocidad deseada de cada uno de los componentes del VANT. [5]

- **Ecuaciones de aceleración.**

Ahora bien, para las ecuaciones de aceleración contamos con dos variantes. [6]

Para la aceleración horizontal tenemos la siguiente ecuación.

$$Ax(t) = 0 \quad \text{Ec. 5}$$

Mientras que para la velocidad vertical contamos con la siguiente ecuación.

$$Ay(t) = -g \quad \text{Ec. 6}$$

Las ecuaciones de aceleración describen cómo cambia la velocidad del VANT en función de los factores que afectan su movimiento, como por ejemplo la fuerza de empuje, las fuerzas aerodinámicas y la masa del VANT.

Al igual que las ecuaciones de velocidad estas se descomponen en dos componentes A_x siendo el componente horizontal y A_y siendo el componente vertical.

La ecuación de aceleración horizontal se influencia mayormente por la fuerza de empuje generada por los motores del VANT y la resistencia aerodinámica la cual se opone al movimiento.

Por lo que si la fuerza de empuje llegará a superar la resistencia aerodinámica, el VANT acelera en la dirección horizontal, en caso contrario siendo la resistencia mayor que la fuerza de empuje, el VANT experimentará un frenado.

La ecuación de aceleración vertical se influencia por la diferencia entre la fuerza de sustentación y el peso del VANT. Por lo que la fuerza de sustentación es generada por el perfil del ala y la misma geometría del vehículo, entonces están actuando en sentido contrario al peso. Una vez mencionado lo anterior podemos asumir que si la fuerza de sustentación es mayor que el peso, el VANT experimenta una aceleración ascendente, es decir, positiva, más sin embargo en un caso contrario donde la fuerza de sustentación fuera menor que el peso, el VANT experimenta una aceleración descendente, es decir, negativa.

B. Sistemas de control automático.

El control automático en un VANT de ala fija se refiere al uso de sistemas y algoritmos electrónicos para mantener y controlar la estabilidad y el vuelo del vehículo sin una intervención directa del piloto.

Por lo que estos sistemas automatizados se encargan de ajustar y controlar los movimientos de la aeronave en tiempo real, todo esto utilizando información proporcionada por diversos sensores y actuadores.

El control automático, mejor conocido como piloto automático en un dron de ala fija se basa en la retroalimentación constante, donde los diferentes sensores monitorean continuamente los diferentes estados de la aeronave, como su actitud, velocidad, altitud y posición. Posteriormente esta información se envía a un sistema de control el cual procesa los datos y genera comandos de control para los actuadores, como los servomotores que controlan las superficies de control, como los alerones, elevadores y timones. [7]

Este puede incluir diferentes modos de vuelo, como el vuelo en línea recta y nivelada, el mantener una altura constante o el seguimiento de una trayectoria predefinida. Estos modos de vuelo se programan en el sistema de control automático, el cual se encarga de realizar los ajustes necesarios en los actuadores

para mantener a la aeronave dentro de los parámetros deseados por el usuario.

Cabe mencionar que el sistema de control automático ofrece al usuario una gran cantidad de ventajas como lo sería una mayor precisión en el control de la aeronave, la capacidad de realizar vuelo autónomo y sin intervención humana. También permite la integración de sistemas de navegación, como se menciona en apartados posteriores.

Es importante destacar que aunque el sistema de control autónomo siempre brinda una mayor autonomía y precisión en el vuelo del vehículo, se requiere la supervisión humana para garantizar la seguridad y tomar decisiones en situaciones que no se tienen previstas. [7]

Por lo que a continuación se mencionan algunos elementos fundamentales que pueden garantizar un vuelo seguro y estable.

1. **Diseño aerodinámico:** Este debe garantizar una estabilidad inherente, adecuada a la distribución de peso y su buen rendimiento. La forma y el tamaño de las alas, la colocación del centro de gravedad y otros aspectos relacionados con el diseño estructural son cruciales para lograr un vuelo estable.
2. **Control de vuelo:** Este es esencial para mantener la estabilidad y el control del vehículo durante el vuelo. Lo que implica el uso de superficies de control, como alerones, elevadores y timones, los cuales permiten ajustar y controlar los movimientos del VANT en los tres ejes antes mencionados. Aunado a esto los sistemas de control pueden ser manuales o automáticos, todo depende de la configuración del VANT.
3. **Sistemas de estabilización:** Estos ayudan a contrarrestar las fuerzas externas que pueden afectar a la estabilidad del vuelo del VANT, como por ejemplo turbulencias. Este tipo de sistemas pueden incluir diferentes tipos de sensores. (como se puede observar en el apartado de "Estabilización de vuelo")
4. **Redundancia y sistemas de respaldo:** Para poder garantizar un vuelo seguro, es fundamental contar siempre con un sistema de respaldo. Lo que implica tener duplicidad en componentes críticos, como ciertos sistemas de energía, sistemas de control y de comunicación, todo esto con el fin de asegurar que, en caso de falla de un componente, exista otro que pueda asumir la función del averiado y así poder mantener la seguridad del vuelo.
5. **Sistemas de navegación y control:** Este tipo de VANT suelen estar equipados con sistemas de navegación y control avanzados- Los cuales permiten determinar la posición entre otros factores como se podrá observar en el apartado de "Técnicas de navegación"

Estos son solo algunos elementos fundamentales para garantizar el vuelo seguro y estable de un VANT, puesto que siguen en constante evolución. [7]

H. Estabilización de vuelo.

Se refiere a la capacidad de la aeronave para mantener una actitud constante y controlada durante todo su vuelo, esto sin la necesidad de una intervención constante del operador o sistema de control. [3]

Por lo que se busca que el VANT pueda mantener una posición estable en el aire, mantenga su propio camino y altitud de manera precisa y resistiendo a las perturbaciones extremas y sin oscilaciones excesivas.

Es importante destacar que la estabilidad de un VANT es fundamental para su operación segura y eficiente, ya que permite un control preciso y predecible de la aeronave, lo que facilita la realización de tareas específicas. Aunado a esto es importante mencionar que una aeronave estable minimiza los riesgos de pérdida de control, colisiones y errores en la recopilación de información, lo que contribuye a que el VANT tenga un vuelo exitoso y seguro.

Para ello existen varios tipos de estabilidad, aunque para este reporte solo se han explorado dos tipos, los cuales se presentan a continuación.

- **Estabilidad Estática Positiva:** Tendencia de una aeronave para retornar o no a su posición original. (ver imagen 6 y 7)

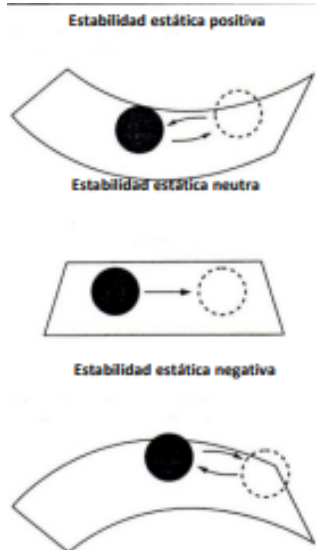


Imagen 6.

- **Estabilidad Dinámica Positiva:** Tendencia de la aeronave a oscilar (con estabilidad estática positiva) para retornar a su posición original en un tiempo relativo. (ver imagen 7)

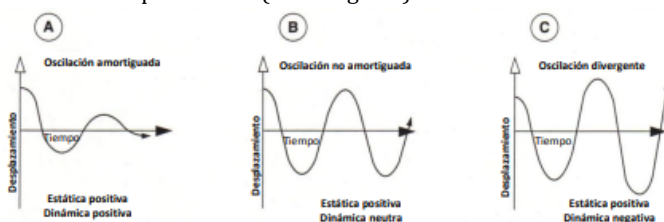


Imagen 7.

De igual manera es capaz de manejar ciertas perturbaciones, no linealidades, variaciones, entre otros factores en las condiciones de operación, los cuales podrían afectar el comportamiento del sistema controlado y que en algunas ocasiones puedan pasar desapercibidos.

I. Controlador de un VANT de Ala Fija.

El controlador puede emplear diferentes técnicas de control, como el control PID, el control por retroalimentación lineal, o el control adaptativo, este dependerá de la complejidad del VANT y los requisitos para su vuelo. [8]

Además, el controlador puede incluir sistemas de navegación y posicionamiento, todo con el fin de obtener información precisa sobre la ubicación y orientación de la aeronave y así poder ajustar sus comandos en consecuencia.

Por lo que en resumen el controlador de un VANT se basa en algoritmos y lógica programada para procesar la información sensorial y con esto poder tomar decisiones en tiempo real. [8]

J. Técnicas de Navegación y Posicionamiento.

Este tipo de vehículos aéreos utilizan diversas técnicas de navegación y posicionamiento para poder determinar su orientación, posición y ruta durante toda su trayectoria.

A continuación se mencionan algunas de las técnicas más comunes de navegación utilizadas para los VANT de ala fija. [9]

1. **GPS:** Esta es una técnica ampliamente utilizada, ya que utiliza señales de satélite para determinar la posición y la altitud del vehículo. Por lo que los receptores GPS a bordo del VANT reciben estas señales de múltiples satélites y con esto calcula la posición en función de las mediciones de tiempo y distancia. Con esto se proporciona una referencia precisa de la ubicación del VANT en tiempo real.
2. **Sistema de navegación inercial:** Este sistema de navegación utiliza sensores como acelerómetros y giroscopios para medir los cambios en la velocidad y la orientación del vehículo. Posteriormente estos datos se integran para estimar la posición y la orientación del mismo. Cabe destacar que este tipo de sistemas son útiles donde la señal GPS es débil o no está disponible.
3. **Odometría visual:** Algunos de estos vehículos están equipados con cámaras u otros dispositivos de visión, los cuales capturan imágenes del terreno durante el vuelo. Este tipo de imágenes se utilizan para estimar la posición y la velocidad relativa del vehículo mediante procesamiento de imágenes y algoritmos capaces de medir la odometría visual.
4. **Sensores de altitud:** En algunas ocasiones este tipo de vehículos igual utilizan sensores de altitud, como sensores barométricos, todo esto con la finalidad de medir la altitud con respecto a un punto de referencia. Por lo que con esta información se puede mantener una altitud constante y con esto evitar colisiones con el terreno.
5. **Telemetría:** Estos pueden enviar datos telemétricos en tiempo real a un centro de control físico. Este tipo de datos pueden incluir información sobre la posición, la altitud, la velocidad entre otros parámetros relevantes. Por lo que la telemetría proporciona una retroalimentación valiosa para el control y seguimiento del vuelo del VANT.

K. Pérdida de señal.

Ahora bien, qué sucede cuando el VANT pierde la señal, a continuación se proponen numerosos sistemas para evitar la dependencia al sistema de GPS. [9]

1. **Radio Tracking:** Seguimiento por radio. Este sistema es empleado cuando los VANT operan a distancias cortas: 80 - 100 km. Particularmente aplicable cuando se es posible mantener un contacto por radio en línea de vista entre la estación de control y el VANT.

2. **Way-Point Navigation:** Basada en puntos prefijados. Su controlador puede dirigirlo a cualquier punto ubicado dentro del radio de acción.
3. **Control Station:** Aquí se ubica el piloto, el operador de la carga de pago y cualquier otro miembro de la tripulación". Puede estar en tierra (GCS), en el mar a bordo de un navío (SCS) o incluso en otro avión (ACS).
4. **Modo de vuelo autónomo:** Los VANT suelen estar equipados con sistemas de vuelo que les permiten tomar decisiones y acciones predefinidas en caso de pérdida de señal.
5. **Altitud y posición de espera:** Si el VANT pierde la señal puede estar programado para mantener su altitud y posición GPS hasta que se restablezca la conexión. Con esto se evita que la aeronave realice ciertas maniobras peligrosas o se desvíe de la trayectoria prevista.

L. Planificación de trayectorias.

Este es un proceso crucial para garantizar vuelos seguros y eficientes. Por lo que implica determinar la ruta y los puntos de interés que seguirá el VANT durante su vuelo. A continuación, se presentan los pasos generales involucrados en la planificación de trayectorias. [10]

1. **Definir los objetivos del vuelo:** Es fundamental establecer claramente los objetivos y requisitos del vuelo. Por lo que esto puede incluir desde la recopilación de datos hasta la realización de tareas especializadas.
2. **Analizar el entorno:** Para este paso se debe realizar un análisis exhaustivo del entorno en el que volará el VANT. Por lo que incluye desde considerar restricciones y regulaciones locales hasta las condiciones meteorológicas o cualquier posible obstáculo.
3. **Establecer puntos de interés:** Esto se refiere a seleccionar los puntos de interés que el VANT debe cubrir durante su vuelo. Por lo que pueden ser desde ubicaciones específicas que requieren inspección hasta áreas de interés para la recopilación de datos.
4. **Determinar la ruta:** Esto utilizando herramientas de planificación de vuelo y ciertos softwares especializados, donde se determina la mejor ruta para el VANT. Lo que implica definir los way-points que el VANT debe seguir, así como los parámetros adecuados en cada segmento del vuelo.
5. **Considerar restricciones y obstáculos:** Ahora bien, durante la planificación de trayectorias, se debe tener en cuenta las restricciones y los posibles obstáculos con los cuales puede encontrarse durante su vuelo. Cabe destacar que es importante evitar estos obstáculos y garantizar la seguridad del vuelo.
6. **Optimizar la eficiencia:** En esta sección se pueden aplicar técnicas de optimización para minimizar las distancias recorridas, maximizar el tiempo de vuelo y reducir el consumo de energía. Por lo que con esto se consigue un vuelo más eficiente y rentable.
7. **Verificación y validación:** Momentos antes de iniciar el vuelo es importante revisar y verificar la trayectoria del mismo. con esto se asegura que se cumple con todos los requisitos y restricciones establecidos. Esto puede incluir desde realizar simulaciones o pruebas en entornos virtuales con el fin de evaluar la viabilidad de la ruta.

M. Evasión de obstáculos.

Ahora bien, para la detección y evasión de obstáculos existen diversos métodos y técnicas, las cuales se emplean durante el vuelo del VANT. Algunos de los métodos más comunes se explicarán a continuación. [10]

1. **Sensores de proximidad:** Los VANT pueden estar equipados con sensores de proximidad, como lo son los sensores ultrasónicos, infrarrojos o láser (LIDAR), los cuales proporcionan información en tiempo real sobre la distancia y la posición de los obstáculos, permitiendo al vehículo tomar acciones evasivas.
2. **Sensores de visión:** En ocasiones pueden utilizar cámaras y sistemas de visión por computadora para detectar y reconocer imágenes y videos en tiempo real, con esta información lo que se busca es analizar la geometría y la forma de los objetos para determinar si representan un peligro real para la trayectoria. Una vez que el VANT conozca esta información, este puede ajustar su trayectoria o tomar medidas para evitar la colisión.
3. **Planificación de trayectorias:** Durante la planificación de la trayectoria se pueden generar algoritmos y softwares especializados para generar recorridos que eviten de manera automática los obstáculos de los cuales ya se tiene conocimiento. Estos algoritmos toman en cuenta la ubicación y las dimensiones de los obstáculos, así como las capacidades y limitaciones del vehículo, todo con la finalidad de calcular una ruta segura y libre de colisiones.
4. **Algoritmos de evasión de obstáculos en tiempo real:** Durante la trayectoria el vehículo puede utilizar algoritmos de evasión de obstáculos en tiempo real, con la finalidad de reaccionar a situaciones imprevistas. Lo que realizan estos algoritmos es una evaluación constante de los datos que almacenan los sensores y con esto calculan las acciones necesarias para evitar los obstáculos detectados.
5. **Comunicación con estaciones de control:** En algunos casos, los VANT pueden recibir cierta información en tiempo real de estaciones de control, ya sea terrestres o marinas. Con esto se permite una supervisión adicional y una advertencia anticipada sobre posibles obstáculos durante el vuelo del VANT.

3. Conclusión.

Los drones de ala fija si bien para uso civil aún no se encuentran desarrollados, aún es posible entenderlos y comprender como funciona, esto gracias a que su principio de vuelo es similar al de un avión convencional.

Durante la recolección de información sin duda alguna el mayor problema fue el desabasto de información referente a este tipo de vehículos, más sin embargo al tener el mismo funcionamiento que un avión convencional, se ha podido entender de manera adecuada su funcionamiento.

Consideramos que sin duda alguna el siguiente paso en este tipo de vehículos es que realmente sean totalmente autónomos, sabemos que esta implementación representa un reto enorme, puesto que no solo deben ser capaces de reconocer su entorno sino que también deben poder tomar las mejores decisiones para la realización con éxito de su trayectoria, aunado a esto se debe buscar un diseño más aerodinámico pero que a su vez soporte cargamentos pesados, claro que dependiendo de su función será el peso a soportar.

Sin duda alguna esperamos que cuando este tipo de vehículos está mejor desarrollado pueda incluso ser más accesible tanto en manera física como por ejemplo tener el tuyo en tu casa, hasta poder obtener información más adecuada.

4. Referencias.

1. Manjarrez Muñoz, L. H. (2018). Sistema de despegue y aterrizaje autónomo para una aeronave de ala fija". CENTRO DE INVESTIGACION Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, 1-2.
2. Adeva, R. (2022, 10 febrero). Drones de ala fija: qué son, para qué sirven y qué modelo comprar. Topes de Gama. <https://topesdegama.com/listas/gadgets/drones-ala-fija>
3. Piloto Privado Avión. (s. f.). Teoría y análisis de respuestas, 1-21.
4. Jaimes, L. E. G. (2019). CONTROL PREDICTIVO DEL MOVIMIENTO LONGITUDINAL Y LATERO-DIRECCIONAL DE UNA AERONAVE NO TRIPULADA. <https://www.redalyc.org/journal/6078/607866916004/html/L>
5. Guerrero Vélez, F. (2015). Diseño de Sistema de Navegación y Guiado para Vehículo Aéreo. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
6. Ortiz Valencia, P. A., & Gutiérrez Zea, L. B. (2009). Modelo matemático para un vehículo aéreo no tripulado de ala fija, usando un estimador de parámetros "filtro de kalman". Tecnológicas, (22), 75-98.
7. Cienfuegos, C. (2020). Parrot Disco, el dron de ala fija y piloto automático. Drones Baratos Ya! <https://www.dronesbaratosya.com/parrot-disco-el-dron-de-ala-fija-y-piloto-automatico/>
8. Control de vuelo para UAVs de ala fija | UAV Navigation. (s. f.). <https://www.uavnavigation.com/es/soluciones/control-de-vuelo-para-uavs-de-ala-fija>
9. Admin. (2020). En qué consiste el elemento de mando y control de un RPAS. RPAS Drones. <https://www.rpas-drones.com/en-que-consiste-el-elemento-de-mando-y-control-de-un-rpas/>
10. Aviles Correa, C. L., & Garzón Bernal, J. D. (2021). Implementación de un sistema de detección y evasión de obstáculos de bajo costo para drones de ala fija. Fundación Universitaria Los Libertadores, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Programa de Ingeniería Aeronáutica, 1.
11. Silva, G. (10 de Agosto de 2017). Fuerza Aérea del Perú desarrolla dos drones. DIÁLOGO. Obtenido de <https://dialogo-americas.com/es/articles/peruvian-air-force-develops-two-new-drones>