

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



Trabajo de Diploma

Generación de trayectoria y control de rumbo para UAVs

Autor: Carlos Manuel Guevara Mayea

Tutores: MsC. Luis Mariano Pineda Bombino.
Dr.C. Luis Hernández Santana.

Santa Clara

2012

“Año 54 de la Revolución”

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



Trabajo de Diploma
Generación de trayectoria y Control de rumbo para
UAVs

Trabajo de Diploma presentado en opción al Título Académico de
Ingeniero en Automática

Autor: Carlos Manuel Guevara Mayea
email: cguevara@uclv.edu.cu

Tutores: MsC. Luis Mariano Pineda Bombino
email: luis.mariano@uclv.edu.cu
Dr.C. Luis Hernández Santana
email: luishs@uclv.edu.cu

Santa Clara

2012

“Año 54 de la Revolución”



Hago constar que el presente Trabajo de Diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Carlos Manuel Guevara Mayea
Autor

Fecha

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Carlos Manuel Guevara Mayea
Autor

Fecha

Boris Luis Martínez Jiménez, Dr.C.
Jefe del Departamento

Fecha

Responsable ICT o J` de Carrera (Dr.C, Msc. o Ing.)
Responsable de Información Científico-Técnica

Fecha

*“No son los títulos, sino las acciones las que hacen
nobles a los hombres.....”*

José de Frisarri.

A mi abuelita Ofelia, que me cuida desde el cielo
por darme su cariño incondicional.

A mis mamita Mariela
por ser la luz e inspiración en la vida.

A mi Papa Carlos
por su apoyo y por lograr lo mejor de mi persona.

A mis primos Migue y Miliadys
por ser los hermanos que nunca tuve.

A mis tíos Miguel, Marlenys y Maribel
por consentirme en todos mis caprichos.

A mi novia Ana Ivis
por esperar siempre lo mejor de mí. Sin ti, mi amor, no termino esta tesis.

A mis abuelos Nereida, Miguel y Ernesto
porque la familia es el mejor tesoro del universo.

RESUMEN

Los vehículos autónomos aéreos de pequeño porte son muy utilizados e investigados a nivel mundial, debido a sus variadas aplicaciones tanto civiles, como militares. Instituciones de nuestro país han mostrado también interés en los mismos, como el GARP (Grupo de Automatización Robótica y Percepción) en la Universidad Central de las Villas, a pesar de que no cuenta con un método definido para el diseño de software de navegación. En el presente trabajo se diseña un esquema de control de seguimiento de puntos en el espacio para un Vehículo Aéreo no Tripulado.

El método de generación de camino empleado fue el basado en puntos deseados. Para el guiado del vehículo y el control de seguimiento de puntos se implementó un lazo de control de rumbo. El software de navegación se probó mediante simulación y se validó a través de la comparación con datos de vuelos reales, arrojando buenos resultados.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	VI
TABLA DE CONTENIDOS	VII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: REFERENTES TEÓRICOS.....	5
1.1 Importancia y desarrollo de los Vehículos Aéreos no Tripulados (UAVs)	5
1.1.1 Definición.....	6
1.2 Aplicaciones.....	6
1.3 Arquitectura General del Sistema.....	7
1.4 Modelación del UAVs.....	10
1.4.1 Partes del UAVs.....	11
1.4.2 Fuerzas que actúan sobre el UAVs.....	12
1.5 Generación de trayectorias.....	14
1.6 Control de trayectoria.....	16
1.7 Conclusiones parciales del capítulo.....	19
CAPÍTULO 2: PLANIFICACIÓN Y CONTROL DE TRAYECTORIA.....	20
2.1 Introducción.....	20
2.2 Navegación Inercial.....	20
2.2.1 Sistemas de Referencia.....	20
2.2.2 Relación entre sistemas de referencia.....	22
2.3 Transformación de coordenadas.....	23
2.3.1 Coordenadas geográficas a cartesianas	25
2.3.2 Coordenadas cartesianas a geográficas.....	26

2.4	Modelo dinámico del UAV.....	28
2.4.1	Movimiento Longitudinal.....	28
2.4.2	Movimiento Lateral.....	29
2.5	Lazo de Control de Rumbo.....	31
2.6	Guiado del vehículo.....	34
2.6.1	Seguimiento de puntos (<i>waypoints</i>).....	34
2.6.2	Guiado del vehículo.....	35
2.7	Simulación.....	35
2.8	Análisis de los resultados.....	37
2.9	Conclusiones parciales del capítulo.....	38
CAPÍTULO 3: ALGORITMO PROPUESTO		40
3.1	Introducción.....	40
3.2	Trayectorias propuestas.....	40
3.2.1	Planificación de la trayectoria.....	43
3.2.2	Ley de Guiado.....	45
3.3	Análisis de resultados.....	46
3.4	Análisis económico.....	48
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		52

INTRODUCCIÓN

El vertiginoso desarrollo alcanzado en el campo de los vehículos aéreos ha condicionado la vida del hombre, pues la masificación de éste como medio de transporte o entretenimiento, arma de combate y plataforma de investigación, ha sido crucial en el desarrollo histórico y científico de la sociedad.

Entre las tendencias de desarrollo más actuales en este campo, se encuentran los vehículos aéreos no tripulados (UAV, *Unmanned Aerial Vehicles*) que gozan de gran popularidad y aceptación a nivel mundial debido a las ventajas que brindan para el cumplimiento de misiones en lugares de difícil acceso, de reconocimiento, supervisión y vigilancia sin riesgos para la vida del piloto (Carmenate 2009).

Estos aviones de pequeño porte no tripulados (UAV) se destacan, particularmente por su estabilidad, menor complejidad y considerable ahorro en comparación con los vehículos convencionales en cuanto a costo de la aeronave, el no poner al piloto en peligro y el ahorro de combustible (Pineda 2011).

Poseen además una variada gama de aplicaciones que van desde la inspección de infraestructuras, líneas eléctricas, oleoductos y gaseoductos hasta el levantamiento topográfico para la elaboración de mapas y toma de fotografías aéreas, además de ser utilizados en supervisión de tráfico, vigilancia de fronteras y búsqueda de personas desaparecidas en fenómenos naturales.

Debido a la gran popularidad y ventaja que ofrecen los UAV, respetuosas universidades y grandes instituciones investigativas han invertido muchos de sus recursos en el desarrollo de estos vehículos aéreos no tripulados de pequeño porte (Hernández 2010). Estas plataformas han sido utilizadas para investigar fundamentalmente, en áreas que van desde el control no lineal, control multivariable, navegación y planificación de trayectorias hasta la detección y seguimiento visual de objetivos.

Cuba, específicamente, no se encuentra exenta de todo el avance y progreso que ha alcanzado el tema de los UAVs en la actualidad, y se ve marcada también por un incipiente desarrollo en instituciones como GEOCUBA, facultada para la elaboración de mapas de relieve; CEMPALAB, encargada de investigaciones en agricultura de precisión y CEDAI nacional, orientada a la automatización integral, instituciones que han desarrollado investigaciones en este campo, interesados en las ventajas que los pequeños aviones no tripulados pueden brindar.

En los últimos años el Grupo de Automatización Robótica y Percepción (GARP) de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas ha acumulado también un número importante de investigaciones dirigidas al diseño e implementación de vehículos autónomos (Pineda 2011).

Las investigaciones ocupan diferentes aéreas, que incluyen diseño de sistemas de navegación con “Sistema software de navegación y guiado en tiempo real para Vehículo Autónomo Sumergible” (Lemus 2011), diseños de autopilotos con “Control del vehículo aéreo autónomo basado en modelo dinámico” (Pineda 2011) y “Desarrollo de sistemas de control para autopiloto de avión de pequeño porte” (Carmenate 2009).

El Grupo de Automatización Robótica y Percepción (GARP), a partir de una solicitud del Centro de Investigaciones Mecatronics y en el marco del proyecto VLIR, y del proyecto ramal de la Tarea Triunfo, tiene como propósito el desarrollo de un autopiloto para un avión autónomo, centrando esta investigación en la generación y control de trayectoria para vehículos aéreos no tripulados.

En anteriores investigaciones como “Modelo matemático de un avión autónomo” (Pineda 2008), “Modelado y Control convencional de un UAV” (Socarrás 2011), se han desarrollado los temas de la modelación y control de vehículos aéreos no tripulados, permitiendo así el diseño de autopilotos, sin embargo, el GARP no tiene identificada una estrategia de control que permita el cumplimiento de misiones no tripuladas, así como el seguimiento de una trayectoria predeterminada, manteniendo una altura deseada.

Teniendo en cuenta todo lo antes mencionado, con la presente investigación se pretende desarrollar una estrategia de control que posibilite el seguimiento de puntos deseados en el espacio, para UAVs. Para el cumplimiento de esta tarea el avión será guiado por GPS (*Global Positioning System*) y recorrerá un camino indicado mediante puntos en el espacio.

Para llevar a cabo la investigación se originó la siguiente **situación problémica**:

¿Cómo generar y controlar la trayectoria de vuelo para un Vehículo Aéreo no Tripulado?

Por tanto, el **objetivo general** propuesto para la presente investigación es:

- Diseñar el esquema de control de seguimiento de puntos en el espacio para un Vehículo Aéreo no Tripulado.

Estableciendo como **objetivos específicos**:

- Efectuar un análisis bibliográfico sobre estrategias de control de camino implementadas a nivel mundial.
- Seleccionar el método de control adecuado en correspondencias con la capacidad de cómputo instalada.
- Generar una trayectoria para el UAV.
- Implementar algoritmos de navegación para el seguimiento de puntos en el mapa.

Con la realización de este proyecto el GARP pretende contribuir al desarrollo de una trayectoria de vuelo para aviones autónomos, que ofrezca una buena respuesta a la necesidad de programación de trayectorias para este tipo de vehículos, con soluciones económicamente factibles, permitiendo además a los especialistas realizar estudios y análisis comparativos, que logren su mejor utilización y la continuidad del desarrollo de nuevas técnicas, teniendo en cuenta los resultados prácticos alcanzados.

El presente trabajo investigativo está organizado de la siguiente forma: Introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

En el capítulo 1 se efectúa un análisis bibliográfico que incluye fundamentalmente, las principales estrategias de generación y control de caminos para UAVs, lo que permite definir la estrategia de control que se utilizará para el seguimiento de la misma, orientada por GPS.

En el segundo capítulo se realiza la implementación del esquema de navegación, teniendo en cuenta la generación de puntos deseados, así como la estrategia de guiado. Finalmente se realiza la simulación, apoyándonos en el Simulink (Matlab) y mediante comparaciones con datos obtenidos en vuelos reales del UAV, se evalúan los resultados alcanzados con el software.

En el tercer capítulo se aborda una nueva propuesta de generación y control de caminos así como la ley de guiado para su implementación.

Finalmente se presentarán las conclusiones y recomendaciones generales del trabajo

CAPÍTULO 1: REFERENTES TEÓRICOS

1.1 Importancia y desarrollo de los Vehículos Aéreos no Tripulados (UAVs)

El origen de los vehículos aéreos no tripulados UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*) se vincula al contexto histórico de la primera Guerra Mundial, pero no fue hasta el período de la Segunda Guerra Mundial que inició su desarrollo, empleándose fundamentalmente para entrenar a los operarios de cañones antiaéreos. No es hasta finales del siglo XX que comienzan a operar los UAVs mediante radio control, con todas las características de autonomía.

La primera versión de UAVs es específicamente el misil crucero V1 desarrollado por los alemanes durante el conflicto bélico antes mencionado. Éste era básicamente un avión no tripulado con una cabeza balística (Socarrás 2011). Su desarrollo ha evolucionado desde entonces considerablemente, principalmente por su importancia en el perfeccionamiento de la aeronavegación y las aplicaciones que brinda

Los UAVs han cambiado la historia de la aeronáutica mundial, brindando al hombre una eficaz herramienta tecnológica, cuyo objetivo ha sido siempre contar con aeronaves no tripuladas que lleguen más allá de nuestro alcance, sin que esto implique pérdida de vidas humanas.

Las investigaciones realizadas en este campo, por consiguiente, han propiciado el surgimiento de proyectos de colaboración entre varios países del mundo, sobre todo en el campo de investigación sobre aplicaciones de vigilancia. Su perfeccionamiento abarca desde pequeños aviones destinados a monitoreo de la calidad del aire, reconocimiento y vigilancia, hasta aviones de mediano y gran tamaño.

En nuestros días, con el desarrollo en el campo de la micro-electrónica, los sensores inerciales de estado sólido y el GPS, es posible fabricar estas máquinas a un precio

asequible, siendo un área importante de la investigación aeronáutica y aeroespacial en la última década (Pineda 2011).

La gama de aplicaciones de los UAVs es cada vez más amplia en misiones tanto militares como civiles, propiciado por las ventajas que presenta un vehículo sin piloto: tamaño reducido de la aeronave, disminución de los costos y preservación de la vida humana al no exponerse a tareas de riesgo.

El desarrollo de aeronaves no tripuladas como se mencionaba anteriormente es un tema que acapara, por consiguiente, la atención de varias instituciones de educación superior (privadas y públicas) y centros de investigación en todo el mundo, destacándose en áreas como la generación de trayectorias (Pajares, Ruz et al. 2008) control no lineal (ALSwailem 2004) y control inteligente (Abusleme 2000), entre otros.

1.1.1 Definición

Los estudios realizados en Vehículos Aéreos no Tripulados, como todo tema examinado y perfeccionado a través de investigaciones científicas, han sido interpretados y desarrollados a partir de diversos arquetipos que organizan el conocimiento científico. Por ello, como resultado del auge alcanzado en este sentido diversos autores e investigadores en el mundo como (Ben 2010), (Ollero and Merino 2004), (Mayorga 2009) han dedicado a este tema diversas definiciones.

En este sentido, a partir del análisis realizado a las investigaciones antes mencionadas, se puede concluir que, los UAVs son en sentido general, aeronaves autónomas equipadas con dispositivos de percepción que prescinden de operadores humanos a bordo. Son capaces de llevar a cabo tareas previamente programadas, aunque también pueden ser dirigidos desde estaciones remotas ubicadas para su monitoreo.

1.2 Aplicaciones.

El desarrollo de UAVs ha brindado al hombre con el paso del tiempo una poderosa herramienta tecnológica para explotar y dominar el medio aéreo más allá de su

alcance, contando actualmente con una amplia gama de aplicaciones, lo que se debe a su maniobrabilidad, seguridad y bajo costo. Los aviones, en particular, realizan cada vez más tareas en la vida cotidiana con buenos resultados, demostrando que son una solución viable para algunos problemas de la sociedad. A continuación se muestran algunos ejemplos de la aplicación práctica de estos aviones (Pineda 2008)

- Telecomunicaciones: pseudo-satélite de comunicaciones de emergencia o de uso puntual.
- Fotografía aérea: agrícola, inmobiliario.
- Filmación de video aéreo.
- Vigilancia forestal y prevención de incendios.
- Vigilancia fronteriza y costera.
- Vigilancia policial ciudadana: sobrevuelo a media altura con potentes cámaras motorizadas.
- Estudios atmosféricos, análisis y seguimiento de fenómenos meteorológicos, etc.
- Búsquedas de personas en desastres y emergencias.

Algunas de las aplicaciones antes mencionadas se realizan en nuestro país con vehículos convencionales de gran tamaño, lo que trae consigo grandes pérdidas económicas debido a un mayor gasto de combustible y a la necesidad de reparaciones, algunas de estas misiones implican un riesgo para la vida de los pilotos de las aeronaves convencionales, el cual sería eliminado con el uso de pequeños aviones no tripulados (Socarrás 2011).

1.3 Arquitectura General del Sistema.

Los vehículos aéreos no tripulados son controlados o manipulados por el sistemas de cómputo que se encuentran a bordo del avión, contando además con estaciones de monitoreo en tierra. El autopiloto que irá en el UAV necesita una unidad de cómputo, la cual fue sustituida por una arquitectura de hardware diseñada anteriormente por el GARP, con el fin de reducir el costo.

La estructura general del sistema tiene dos componentes claramente definidos: una estación a bordo del avión y una estación en tierra. Dicha estructura se presenta en la figura 1-1.

Estación en tierra: Está constituida por una laptop conectada a un radio modem que se encargará de la trayectoria del avión, así como el monitoreo y la supervisión durante el vuelo, ya que el aterrizaje, el despegue y situaciones de emergencia se harán con un control remoto destinado sólo para estos casos.

Estación a bordo: El avión tiene también un radio modem como el de la estación en tierra, para la comunicación con la misma. Lo compone además una unidad de cómputo DSPIC30F4013 (Figura1-2), la cual es la encargada de procesar los datos recibidos por los sensores y realizar el algoritmo de control.

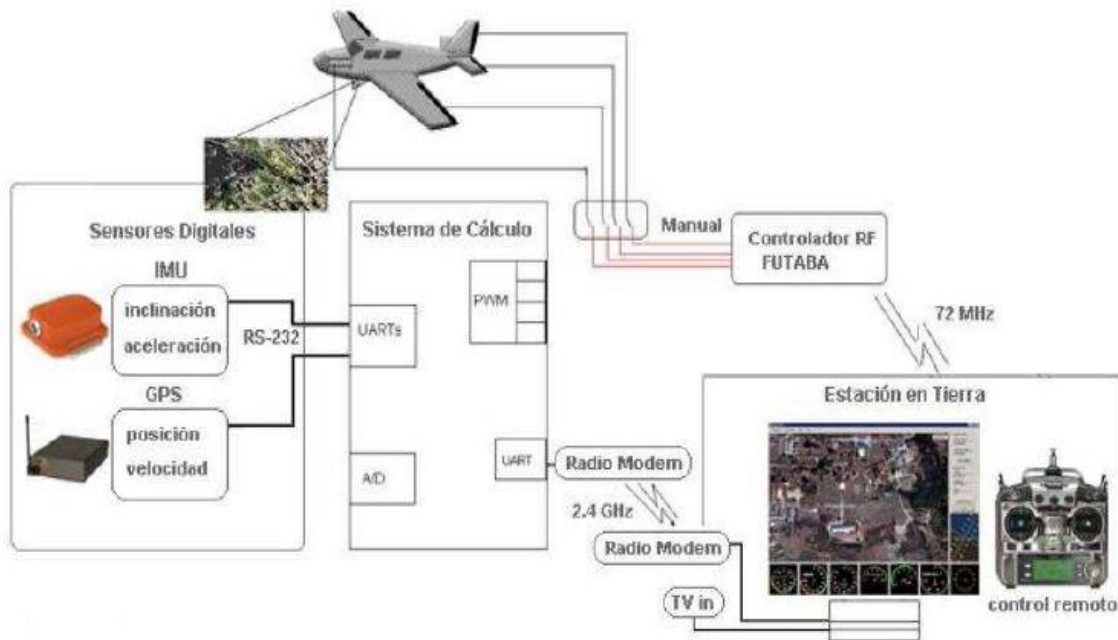


Figura 1-1: Esquema General.



Figura 1-2: Elementos de Hardware

La arquitectura del sistema del UAV cuenta además con dos sensores principales, encargados de la orientación del vehículo, que se mencionan a continuación:

Unidad de Medición Inercial (IMU): Tiene gran ancho de banda. Brinda velocidades y aceleraciones angulares en los ejes X, Y, Z. También mide la temperatura y la orientación magnética. En este trabajo se utilizará la IMU MTI-G de Xsens (Figura 1-3) que brinda velocidades y aceleraciones angulares a una frecuencia de 100 Hz. Además cuenta con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) que proporciona la posición del avión en coordenadas X, Y, Z.

Sistema de posicionamiento global (GPS): Este instrumento proporciona las coordenadas X, Y del avión. Es importante destacar que su papel es primordial en el sistema de navegación, a pesar de su bajo costo.



Figura 1-3: IMU MTI-G

1.4 Modelación del UAVs.

La generación y control de caminos para vehículos aéreos no tripulados es un tema que interesa a muchos centros de investigación a nivel mundial, como ya se ha explicado anteriormente, fundamentalmente porque el control de trayectoria es el elemento clave para el buen desempeño de cualquier aeronave autónoma que se encuentre inmersa en una misión. Este control se lleva a cabo utilizando el modelo matemático que describe el comportamiento de la aeronave.

El GARP ha llevado a cabo varias investigaciones relacionadas con este tema, tales como “Modelo matemático de un avión autónomo” (Pineda 2008) y “Modelo matemático del avión N606LS” (Hernández 2010) habiendo obtenido esta última el modelo matemático de la aeronave que se pretende controlar (Socarrás 2011).

El modelo matemático que describe la dinámica del UAV se realiza atendiendo, generalmente, a las características físicas y la interacción con la naturaleza, analizando en este sentido las partes principales del vehículo y las fuerzas que sobre él actúan.

1.4.1 Partes del UAVs.

Un avión se compone de varias partes principales (Figura 1-4) que serán abordadas a continuación, al igual que las superficies de control del mismo. Estas son:

- **Alas:** Forma aerodinámica que permite volar al avión generando sustentación, los alerones son parte de la misma.
- **Hélice:** Genera la fuerza de propulsión que mueve al avión hacia adelante.
- **Estabilizador Vertical:** Parte del avión que se ubica en su parte final donde está acoplado el timón de cola, su función principal es estabilizar el avión en el plano vertical (debe ser plano horizontal).
- **Estabilizador Horizontal:** También se le llama estabilidad lateral-direccional y se utiliza para dar estabilidad en el plano horizontal (debe ser vertical). El elevador está sujeto a él.
- **Fuselaje:** Es la parte principal del avión o cuerpo del avión. En un avión convencional alberga carga o pasajeros. En el caso del presente trabajo lleva sensores y hardware de control, entre otros.
- **Alerones:** Se usan para manipular el ángulo de alabeo y guiñada. Ambos alerones se encuentran siempre en sentido contrario.
- **Timón de cola:** En aviones comunes se usa para manipular el ángulo de guiñada y así proporcionar a los pasajeros un vuelo más estable. En aviones de pequeño porte no se utiliza mucho.
- **Elevador:** Se encuentra sujeto del estabilizador horizontal y se usa para manipular el ángulo de cabeceo.

Tanto los alerones como el timón de cola y el elevador (destacados en rojo en la Figura 1-4) constituyen las superficies de control de la aeronave.

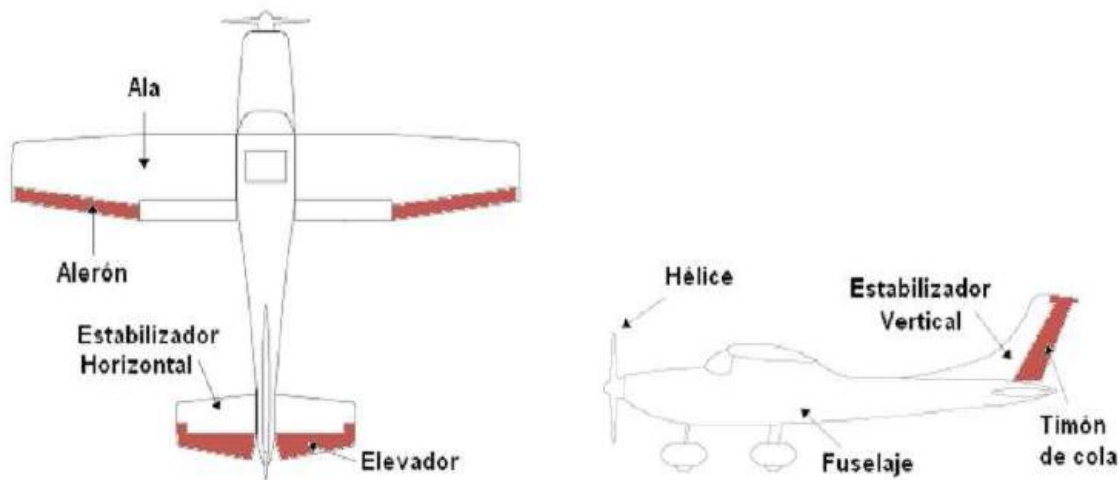


Figura 1-4: Partes del avión

1.4.2 Fuerzas que actúan sobre el UAVs.

En el movimiento de un avión operan cuatro fuerzas principales (Figura1-5) que interactúan de diferentes formas para dar lugar a cada una de las situaciones más comunes de vuelo, como lo son el despegue, el aterrizaje, el ascenso, el descenso y el vuelo a nivel (Socarrás 2011). Estas fuerzas son descritas a continuación y se muestran en la figura 1-5.

- **Sustentación:** Esta fuerza de origen aerodinámico es provocada principalmente por las alas del avión y permite que éste se eleve.
- **Arrastre:** Esta también tiene su origen en la aerodinámica del avión y se opone a su movimiento. Lo ideal es que esta fuerza sea pequeña.
- **Propulsión:** Es la fuerza que produce el motor del avión para impulsarlo. Esta fuerza se opone al arrastre y cuando ambas son iguales el avión mantiene su velocidad.
- **Gravedad:** Es provocada por el campo gravitacional de la Tierra y se mantiene relativamente constante en vuelos dentro de la atmósfera.



Figura 1-5: Fuerzas que actúan en el avión.

Además de las fuerzas básicas descritas anteriormente, existen los momentos (torques) del avión, que se producen por la acción de las fuerzas en torno a un punto. Estos momentos se generan en torno a los tres ejes del avión y dan lugar a los tres tipos de giro que pueden producirse: cabeceo, balanceo y guiñada (Figura1-6) (Carmenate 2009)

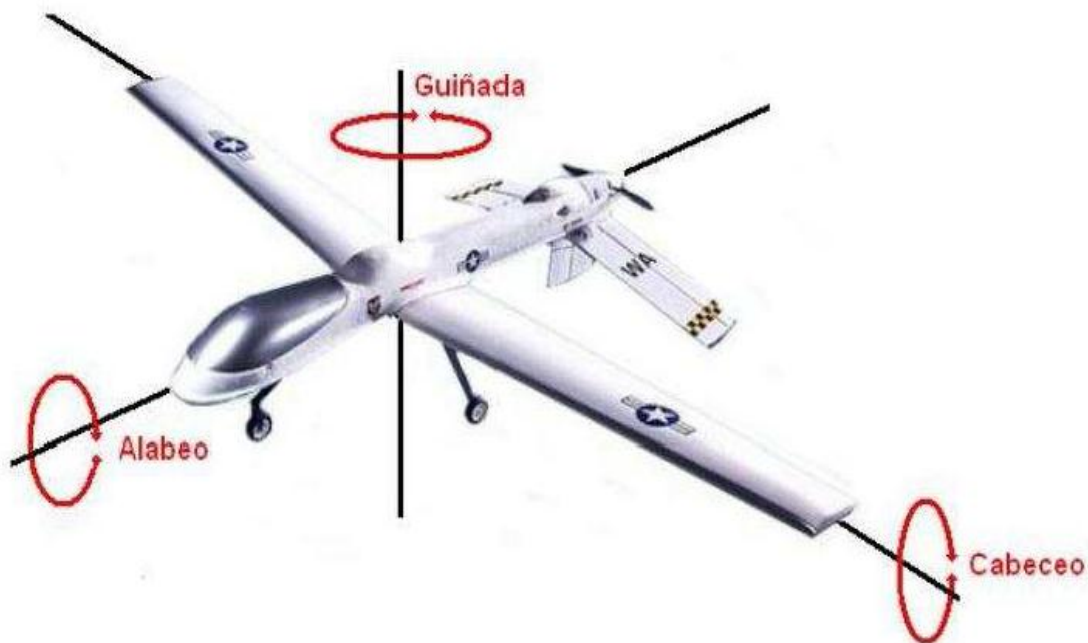


Figura 1-6: Movimientos angulares del avión.

Las fuerzas más importantes son generadas en el ala y la cola. Esta última es la encargada de balancear las cargas y de dar estabilidad longitudinal al avión. El

balanceo se refiere a la generación de una fuerza de sustentación, que produce un momento respecto al centro de gravedad del avión, para equilibrar los momentos generados por el resto de la aeronave. La estabilidad se refiere a la capacidad del avión de volver a su estado inicial después de producida una perturbación. El avión debe ser longitudinal, direccional y lateralmente estable para que cumpla con los requerimientos internacionales y minimice las cargas sobre el piloto (Pineda 2008).

1.5 Generación de trayectorias.

Actualmente existen varias estrategias de control que son utilizadas en la creación de autopilotos para aviones de pequeño porte, debido a la gran popularidad que éstos han ido alcanzando. Por consiguiente, a nivel mundial se han realizado sistemas de control de pequeños aviones utilizando control difuso, observador de estado, redes neuronales, y algoritmos PID. El principal objetivo es garantizar la estabilidad del vehículo para su mejor desempeño y además controlar el seguimiento de una trayectoria deseada (Carmenate 2009). El presente trabajo aborda el tema de generación de trayectoria y control de rumbo para un UAV, sin profundizar en el control de estabilidad.

Con el paulatino desarrollo alcanzado en este campo, uno de los objetivos de la robótica móvil específicamente, ha estado enfocado en la determinación de caminos que lleven el robot desde un punto inicial a un punto final, por lo cual la generación de trayectorias para vehículos autónomos es un tema ampliamente tratado en la literatura, a continuación se explican los métodos más utilizados:

1.5.1 Redes Neuronales Artificiales.

Una de las técnicas más aplicadas para implementar estrategias de navegación son las redes neuronales artificiales, estas se utilizan para la generación de trayectorias y esquemas de navegación inteligente. Con este método el vehículo debe seguir la trayectoria reaccionando de manera inteligente ante la incertidumbre de los sensores, el medio ambiente y los cambios dinámicos del entorno. Estas se basan en la creación de una base de datos con las trayectorias generadas por la Red Neuronal, en la que

existen varias trayectorias a seguir para alcanzar el objetivo. Este método tiene como gran inconveniente que se necesita contar con medios computacionales avanzados para generar la base de datos que le permite trazar la trayectoria a seguir (Rios 2008).

1.5.2 Generación Óptima de Trayectoria.

Consiste en un método sistemático que incluye las restricciones estáticas y dinámicas del vehículo. La implementación de estos métodos se realizan a través de algoritmos de programación que incluyen programación lineal y cuadrática, también son usados métodos no lineales para el desarrollo de trayectorias (Fossen 2011).

1.5.3 Generación de Trayectoria basada en puntos deseados (*waypoints*)

La generación de trayectorias, basada en puntos deseados, es una de las más usadas en robótica móvil. Este método se basa en la introducción de los puntos deseados por parte de un operador, estos son almacenados en una base de datos, los cuales son usados posteriormente para generar la trayectoria (Fossen 2002).

Los puntos deseados son definidos utilizando las coordenadas de los ejes cartesianos (x, y, z). Las bases de datos consisten de varios puntos que incluyen el punto inicial, puntos intermedios y el punto final u objetivo. Además en la definición de los puntos deseados se les pueden añadir propiedades como la velocidad y el rumbo del vehículo.

1.5.4 Generación de trayectoria basada en rectas y arcos de circunferencias.

Debido a que generalmente la trayectoria deseada se genera a partir de los puntos hacia los cuales el avión debe dirigirse, un método muy usado para su desarrollo es la unión mediante líneas rectas y arcos de circunferencia que unen los puntos a seguir como se muestra en la figura 1-7 (Fossen 2011).

Este método propone la aproximación de la trayectoria deseada como el conjunto de líneas rectas que unen dos puntos consecutivos, inscribiendo una circunferencia entre dos de estas líneas. El punto donde el arco de circunferencia intercepta la línea recta es el punto donde comienza el estado de giro del vehículo para seguir hacia el próximo

punto deseado. Este arco de circunferencia debe tener un radio máximo tal que, el mismo, sea mayor que el radio de curvatura mínimo del avión.

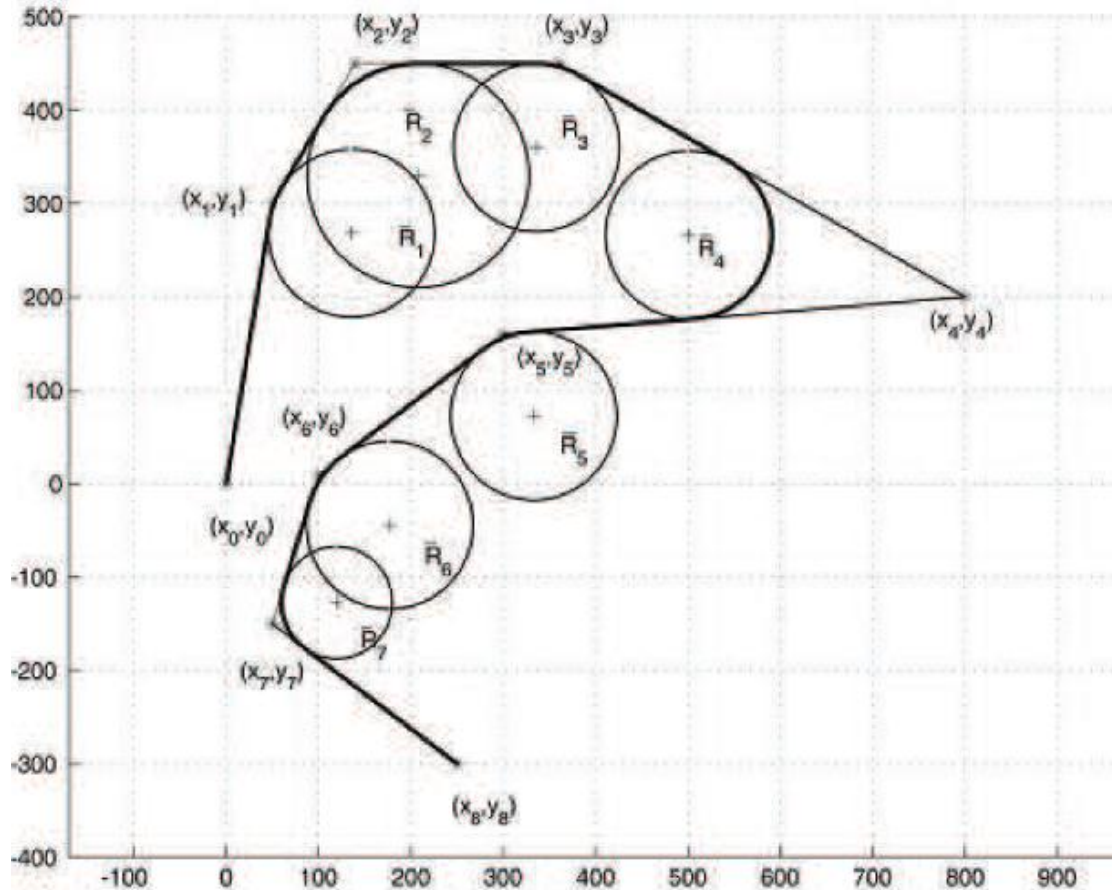


Figura 1-7: Trayectoria de líneas rectas y arcos de circunferencia.

Debido a la facilidad de su implementación y al tiempo tangible para el desarrollo de esta investigación, la generación de trayectoria estará basada en el método de localización de puntos deseados.

1.6 Control de trayectoria.

Tradicionalmente los sistemas de control de trayectoria para vehículos autónomos, son divididos en tres subsistemas que se implementan en la plataforma a bordo, estos son:

1) “Navegación”, que provee información sobre velocidad y posición (angulares y

lineales) del vehículo, 2) “Guiado”, para procesar la información de la navegación inercial de la trayectoria de referencia y los comandos de salida para la velocidad y la posición con el objetivo de guiarlo a lo largo de la trayectoria deseada, y 3) “Control”, para generar la señal actuadora requerida para manejar la velocidad y posición actual del vehículo a los valores deseados.

Indudablemente, el control de trayectorias se ha convertido en una tarea de primer orden para vehículos autónomos (Weifeng 2011), lo que se evidencia en trabajos como *“A UAV Route Tracking Algorithm Based on the Previewing Point and Fuzzy PID Control”* (Weifeng 2011), donde se realiza el seguimiento de una ruta programada utilizando una estrategia de “anticipación de puntos” (*previewing point*) y un control PID fuzzy.

En el trabajo de (Weifeng 2011) se manipula el timón vertical para ajustar la dirección del vuelo, y el análisis del movimiento es limitado a un plano de dos dimensiones, trabajando con una altura deseada que se mantiene invariante. La ruta a seguir para cumplir este propósito es una curva en dicho plano que se establece mediante un arreglo de puntos (*waypoints*) en el espacio, localizados por GPS. Para el control de dicha ruta se utiliza un lazo de control simple, centrándose solamente en el control de trayectoria sin profundizar en el control de estabilidad.

En investigaciones como “Análisis, Modelación y Construcción del Sistema de Control Embebido DSP/FPGA Fuzzy Logic de Vuelo Autónomo para una Aeronave no tripulada UAV Efigenia, basado en Matlab Simulink Aerospace and Real Time Workshop Toolbox” (Córdoba 2005), se realiza el diseño y desarrollo del sistema computacional digital adaptivo reconfigurable de guía y navegación, también un control de vuelo mediante la combinación de una red neuronal digital y un sistema *Fuzzy Logic* (Lógica Difusa). Este trabajo presenta gran exactitud en el seguimiento de la trayectoria, sin embargo, el uso de una red neuronal significaría un inconveniente en el desarrollo de la presente investigación porque no se cuenta con los medios para el desarrollo de la misma.

La Universidad de California en Berkeley por su parte, con su investigación “*A flight control system for aerial robots: algorithms and experiments*” (Kim and Shim 2003) presenta un sistema de control de vuelo por jerarquía para un helicóptero autónomo. El sistema consiste en un control multi-lazo que garantiza estabilidad y seguimiento de una trayectoria deseada, utilizando algoritmos PID como controladores. Su estructura de control es mostrada en la figura 1-8.

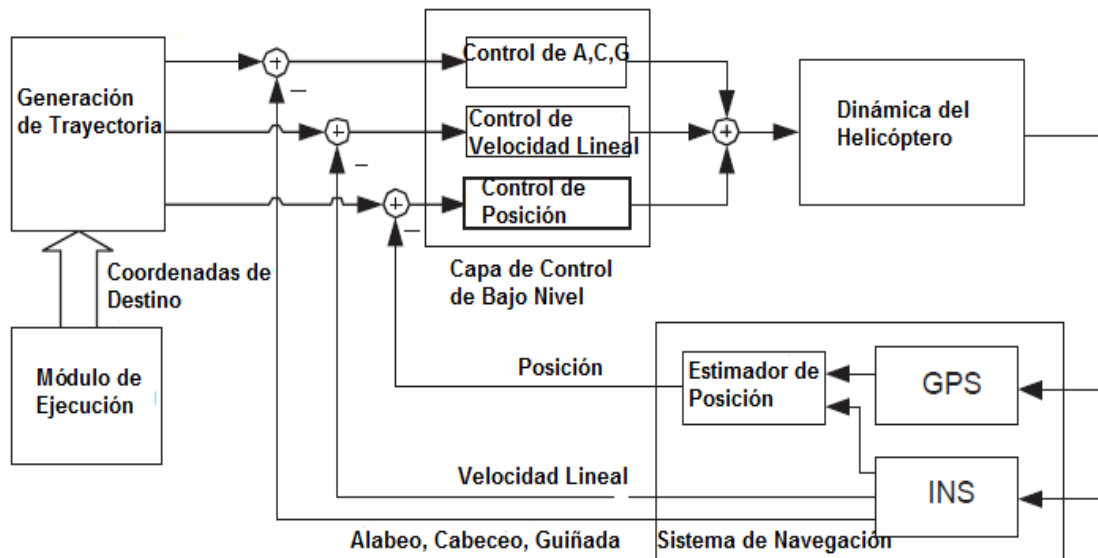


Figura 1-8: Esquema de control de Multi-Lazo.

El tema de seguimiento de caminos, como se ha podido apreciar, ha sido abordado con anterioridad en la literatura. A continuación se presenta un resumen de la clasificación de diferentes métodos de seguimiento de trayectorias abordados por Thor I Fossen (Fossen 2011):

- **Regulación del punto de referencia:** Es el sistema más básico de guiado y consiste en una entrada constante (*set-point*), manteniendo constantes la velocidad, la altura y el rumbo.
- **Control de Rastreo de trayectoria (*Trajectory Tracking*):** La salida del sistema es forzada a seguir una trayectoria deseada la cual puede tener restricciones

espaciales y temporales, la posición y la velocidad de la vehículo pueden cambiar durante la trayectoria siguiendo señales de referencia de velocidad y posición variantes en el tiempo.

- **Control de seguimiento de Trayectoria (*Path Planning*):** Este consiste en seguir una trayectoria predefinida sin restricciones temporales a lo largo del camino. Este método puede tener restricciones espaciales con el objetivo de evitar colisiones o de alcanzar determinados objetivos.
- **Seguimiento de objetivos:** En este método el objetivo de control es seguir un objetivo, el cual puede encontrarse en movimiento y donde sólo se conoce su movimiento instantáneo, por lo que no se pueden tener restricciones temporales y espaciales. El caso más simple es cuando el objetivo se encuentra estacionario.

1.7 Conclusiones parciales del capítulo.

En el presente capítulo se ha realizado un análisis introductorio al tema de los UAVs, sus orígenes, desarrollo, principales conceptos y aplicaciones, evidenciando así el auge alcanzado por esta tecnología a nivel mundial, en función del cumplimiento de diversas tareas.

Se ha revisado de forma crítica la bibliografía y se concluye que el GARP no cuenta con los recursos necesarios para implementar algoritmos que incluyan métodos avanzados como las redes neuronales o la generación óptima de trayectoria pues los mismos precisan mayor potencia de cómputo para su implementación. Por esta razón se aplicará la generación de trayectorias basada en puntos (*waypoints*), que estarán previamente almacenados en la estación a bordo y el UAV comenzará su seguimiento en el momento en que el mismo pase del modo manual a automático.

Utilizando como referencia un conjunto de puntos deseados, en esta investigación se pretende diseñar un algoritmo que controle el rumbo del UAV hacia el *waypoint* objeto, manteniéndolo fijo hasta alcanzar una distancia deseada para luego buscar el punto siguiente.

CAPÍTULO 2: PLANIFICACIÓN Y CONTROL DE TRAYECTORIA

2.1 Introducción.

En el presente capítulo se desarrolla la planificación de una trayectoria deseada para su seguimiento por parte del UAV. Se realiza la presentación de varios caminos que podrían ser utilizados y se escoge el más óptimo, atendiendo a su fácil implementación y a la exactitud en el seguimiento de un conjunto de puntos deseados.

2.2 Navegación Inercial.

Un sistema de navegación inercial, INS por sus siglas en inglés (*Inertial Navigation System*), es un sistema de ayuda a la navegación que usa un computador, sensores de movimiento y sensores de rotación giróscopos para calcular continuamente mediante estima la posición, orientación, y velocidad (dirección y rapidez de movimiento) de un objeto en movimiento sin necesidad de referencias externas.

Según (Lemus 2011) un sistema de navegación inercial consta de:

- Unidad de Medición Inercial (IMU): Conteniendo al menos tres acelerómetros y tres giróscopos, montados en una base común, manteniendo la ortogonalidad entre los ejes.
- Computadora de Navegación: Calcula el efecto de la gravedad y corrige los biases y drifts de los acelerómetros de la IMU. A su vez, debe integrar doblemente los valores de la aceleración para obtener la posición estimada.

2.2.1 Sistemas de Referencia.

Con el objetivo de mantener la orientación y desarrollar el sistema de navegación del UAV, se utilizan dos sistemas de referencia (n-Sist y b-Sist), como se muestra en la Figura 2-1:

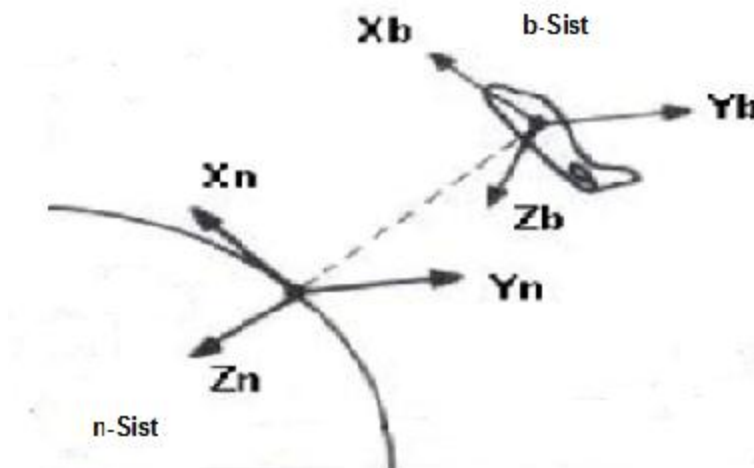


Figura 2-1: Sistema de Referencia

n-Sist: Es el origen del sistema de navegación, se sitúa en un punto cualquiera sobre la superficie de la tierra. El eje Z_n apunta al centro de la tierra, el eje X_n apunta al norte y por último el eje Y_n apunta al este.

b-Sist: Tiene su origen ubicado en el centro de masa del cuerpo (UAV). El eje X_b está en dirección de la línea central del avión, con su dirección positiva hacia la dirección del movimiento del avión. El Y_b es perpendicular a la línea central del fuselaje con dirección positiva hacia la parte derecha del ala, y Z_b es perpendicular al plano XY con dirección positiva hacia la parte de abajo del cuerpo.

Utilizando la notación anterior se pueden definir los ángulos que describen el movimiento en cada dirección. Para esto se utilizan los ángulos de Euler: Alabeo (ϕ), Cabeceo (θ) y Guiñada (ψ). Figura 2-2.

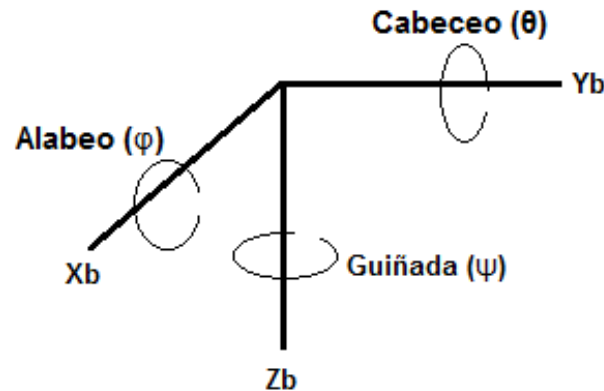


Figura 2-2: Ángulos de Euler

2.2.2 Relación entre sistemas de referencia.

El empleo de los sistemas de referencia explicados anteriormente permite conocer la orientación de la aeronave en el espacio. Esto es posible mediante el uso de matrices de transformación, que permiten orientar un vector que se encuentra en el sistema de referencia b-Sist en su equivalente en n-Sist y viceversa. Para construir dichas matrices se presentan en el capítulo 3 del libro “Fundamentos de Robótica” (Barrientos, Peñín et al. 1998) cuatro métodos principales: matrices de rotación, ángulos de Euler, par de rotación y cuaternios.

En el presente trabajo se utilizan los ángulos de Euler: alabeo (ϕ), cabeceo (θ) y guiñada (ψ), para representar la orientación del vehículo en el espacio. La matriz de transformación se construye atendiendo al orden de las rotaciones. Cada rotación se realiza sobre a un solo eje de referencia (X, Yo Z), (Barrientos, Peñín et al. 1998). En la figura 2-3 se muestra la rotación respecto al eje Zb que corresponde al ángulo de guiñada (ψ).

$$R_{(z,\psi)} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \text{sen}(\psi) & 0 \\ -\text{sen}(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

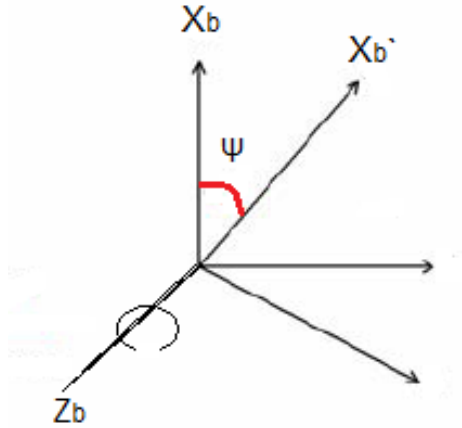


Figura 2-3: Rotación respecto al eje Z

Finalmente se construye la matriz de transformación mediante la multiplicación de las matrices de rotación, atendiendo a que la multiplicación matricial no es conmutativa, el orden en que se realicen las rotaciones influye en la transformación. A continuación se presenta la matriz de transformación para la rotación sobre los tres ejes del cuerpo del avión (b-Sist) respecto a n-Sist.

$$T_b^n = R_{(z,\psi)} R_{(y,\theta)} R_{(x,\varphi)}$$

$$T_b^n = \begin{bmatrix} \cos(\theta)\cos(\psi) & \cos(\psi)\sin(\theta)\sin(\varphi) - \cos(\varphi)\sin(\psi) & c(\psi)c(\varphi)s(\theta) + s(\psi)s(\varphi) \\ \sin(\psi)\cos(\theta) & \sin(\varphi)\sin(\theta)\sin(\psi) + \cos(\psi)\cos(\varphi) & s(\theta)s(\psi)c(\varphi) - c(\psi)s(\varphi) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta)\sin(\varphi) & \cos(\theta)\cos(\varphi) \end{bmatrix}$$

Donde: $c(*)=\cos(*)$, $s(*)=\sin(*)$.

2.3 Transformación de coordenadas.

Generalmente se asume que la Tierra posee forma esférica, lo cual es incorrecto pues su forma es muy parecida a la de un esferoide oblato (esfera achatada por los polos), resultando en un abultamiento alrededor del ecuador. Este abultamiento está causado por la rotación de la Tierra, y ocasiona que el diámetro en el ecuador sea 43 km más largo que el diámetro de un polo a otro (Francois 2000).

Si se decide situar un punto en el espacio, es necesario indefectiblemente, utilizar un sistema de coordenadas basado en tres ejes perpendiculares entre sí. Para ello se ubica el origen en el centro de la tierra, luego el eje Z se colocará de manera que coincida con el eje de rotación del planeta y el plano definido por OXZ con un meridiano de origen, Greenwich. De esta forma queda definido un sistema geodésico de referencia en el cual cualquier punto M puede ser situado con exactitud gracias a tres valores (X, Y, Z). A este tipo de coordenadas se les llama Coordenadas tridimensionales cartesianas, y los valores X, Y, Z se miden generalmente en metros (Francois 2000).

La utilización del sistema de coordenadas antes mencionado brinda exactitud cuando se está en presencia de una esfera perfecta, pero dada la forma de geoide (esferoide oblato) de la Tierra dicho sistema de coordenadas no es útil a la hora de ubicar un móvil en el espacio.

Para resolver este inconveniente los científicos decidieron asumir la forma de la Tierra como un elipsoide (superficie curva cerrada cuyas tres secciones ortogonales principales son elípticas, es decir, son originadas por planos que contienen dos ejes cartesianos). Ahora para situar un cuerpo en el espacio se cuenta con tres coordenadas: Latitud (Lat), Longitud (Lon) y altura (h). Este sistema de referencia es conocido como: Sistema de Coordenadas Geográficas (Francois 2000), figura 2-4.

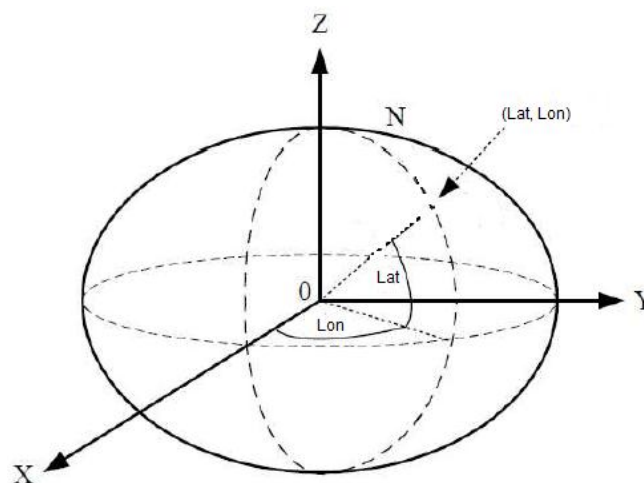


Figura 2-4: Sistema de coordenadas geográficas

Es preciso aclarar que existen varios geofísicos de referencia mundial que han presentado diferentes modelos de elipsoides. Estos modelos se denominan elipsoides de referencia y se diferencian atendiendo al valor asignado a sus parámetros más importantes (a y b), figura 2-5.

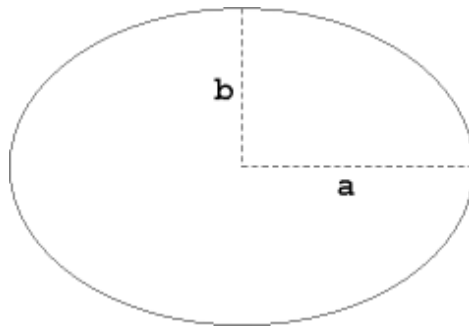


Figura 2-5: Ejes de un elipsoide de revolución

Donde: a = Radio Mayor y b = Radio Menor

Otros parámetros de interés son el factor de achatamiento (medida la diferencia que presentan los semiejes a y b entre sí), representado por la letra f y la excentricidad, representada por la letra e .

Los parámetros antes mencionados varían de un modelo de referencia a otro, entre ellos se destacan: Bessel 1841, Clarke 1880, GRS 1980, WGS 84, entre otros. Para el algoritmo presentado se escoge el modelo de elipsoide WGS 84 (*World Geodetic System 84*) por ser el de mayor referencia, siendo utilizado por el Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

Como el presente trabajo es realizado en el plano utilizando coordenadas cartesianas, y el vehículo aéreo se desplaza utilizando coordenadas geográficas, se necesita un algoritmo que realice la conversión entre sistemas de coordenadas.

2.3.1 Coordenadas geográficas a cartesianas

Para pasar de coordenadas geográficas a coordenadas cartesianas es necesario resolver el problema planteado por el hecho de que, la latitud es el ángulo formado por

la perpendicular al elipsoide con el plano ecuatorial. Para calcular las coordenadas cartesianas, es preciso calcular primero la gran normal (N).

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 * (\text{sen}(\text{lat}))^2}}$$

Para realizar la conversión se deben conocer los parámetros (a, b, f, e) los cuales se muestran a continuación:

$$a = 6378137.0 \quad \text{y} \quad e = \sqrt{f * (2 - f)}$$

$$f = \frac{(a-b)}{a} \quad \text{y} \quad b = 6356752.3142$$

Ahora existen las condiciones para calcular las coordenadas cartesianas conociendo la latitud (Lat), longitud (Lon) y altura (h).

$$X = (N + h) * \cos(\text{Lat}) * \cos(\text{Lon})$$

$$Y = (N + h) * \cos(\text{Lat}) * \text{sen}(\text{Lon})$$

$$Z = [N * (1 - e^2) + h] * \text{sen}(\text{Lat})$$

2.3.2 Coordenadas cartesianas a geográficas.

El mecanismo inverso al precedente es más complicado. El cálculo de la longitud se hace gracias a una fórmula simple, pero para calcular la latitud, no existe fórmula simple, y es necesario un cálculo por iteraciones sucesivas (Francois 2000).

La revisión bibliográfica en (Francois 2000) dio a conocer que el procedimiento más utilizado para realizar esta conversión es el Método iterativo de Heiskanen-Moritz-Boucher. En la presente investigación se indicarán los pasos a seguir.

Método iterativo de Heiskanen-Moritz-Boucher

Primeramente se calculan los valores preliminares, para ello se tiene:

- Cálculo de P:

$$P = \sqrt{X^2 + Y^2}$$

- Cálculo de la longitud (Lon):

$$Lon = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right)$$

- Cálculo de latitud (Lat) y altura (h) por iteración:

Paso #1

$$Lat_0 = \tan^{-1} \left[\frac{Z}{P} \frac{1}{1 - \frac{ae^2}{\sqrt{P^2 + Z^2}}} \right] \quad Lat_i = Lat_0$$

Paso #2

$$N_1 = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 * (\text{sen}(Lat_1))^2}}$$

$$h_1 = \frac{P}{\cos(Lat_1)} - N_1$$

$$Lat_{i+1} = \tan^{-1} \left[\frac{Z}{P} \frac{1}{1 - e^2 \frac{N_1}{N_1 + h_1}} \right]$$

La iteración tiene fin si: $Lat_{i+1} - Lat_i < \varepsilon$

De no ser así: $Lat_i = Lat_{i+1}$ y continuar desde el paso #2.

Si $Lat_i = Lat_{i+1}$ la iteración tiene fin.

2.4 Modelo dinámico del UAV.

El modelo dinámico del avión es obtenido analíticamente en (Pineda 2011), este modelo se calcula asumiendo que el movimiento lateral y el longitudinal se encuentran desacoplados.

2.4.1 Movimiento Longitudinal.

La ecuación que describe el movimiento longitudinal, escrita en espacio de estado queda:

$$\dot{X}_{lon} = A_{lon}X_{lon} + B_{lon}U_{lon}$$

Definiendo el estado y el vector de entrada

$$X_{lon} = \begin{bmatrix} u \\ \Delta\alpha \\ q \\ \Delta\theta \end{bmatrix} \quad U_{lon} = \begin{bmatrix} \Delta\delta_e \\ \Delta\delta_t \end{bmatrix}$$

Donde el vector X_{lon} está representado por los estados longitudinales, con

u Velocidad frontal

$\Delta\alpha$ Ángulo de Ataque

q Velocidad angular de cabeceo

$\Delta\theta$ Ángulo de cabeceo

La entrada de control está definida por U_{lon} , donde:

δ_e Deflexión en el elevador.

δ_t Control en el motor.

Los parámetros A_{lon} y B_{lon} del modelo, para el caso del UAV N606LS ya han sido calculados en (Pineda 2011):

$$A_{lon} = \begin{bmatrix} -0.1670 & -0.3630 & 0 & -0.4910 \\ -0.9609 & -4.7809 & 0.9531 & 0 \\ 2.6001 & -4.7809 & -7.9741 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{lon} = \begin{bmatrix} 0 & 0.0159 \\ -0.4160 & 0 \\ -30.0860 & 0.1449 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.4.2 Movimiento Lateral.

La ecuación que describe el movimiento lateral, escrita en espacio de estado queda:

$$\dot{X}_{lat} = A_{lat}X_{lat} + B_{lat}U_{lat}$$

Definición del estado y del vector de entrada:

$$X_{lat} = \begin{bmatrix} \Delta\beta \\ \Delta\phi \\ p \\ \Delta\psi \\ r \end{bmatrix} \quad U_{lat} = \begin{bmatrix} \Delta\delta_a \\ \Delta\delta_r \end{bmatrix}$$

El vector $\mathbf{X}_{lat}$ representa los estados laterales, donde:

$\Delta\beta$ Ángulo de Deriva

$\Delta\emptyset$ Ángulo de Alabeo

p Velocidad angular en el Alabeo

$\Delta\psi$ Ángulo de Guiñado

r Velocidad angular en el Guiñado

La entrada de control está definida en $\mathbf{U}_{lat}$, donde:

δ_a Deflexión en el alerón

δ_r Deflexión en el timón

Los parámetros $\mathbf{A}_{lat}$ y $\mathbf{B}_{lat}$ del modelo, para el caso del UAV N606LS ya han sido calculados en (Pineda 2011):

$$\mathbf{A}_{lat} = \begin{bmatrix} -0.00487 & 0.2905 & -0.0039 & 0 & -0.9999 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.13262 & 0.012168 & -19.874 & 0 & 1.3526 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 3.2813 & -0.0057 & -0.01912 & 0 & -0.0349 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{lat} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 237.16 \\ 0 \\ -2.7968 \end{bmatrix}$$

Finalmente la figura 2-4 muestra el diagrama en bloques del sistema longitudinal y lateral.

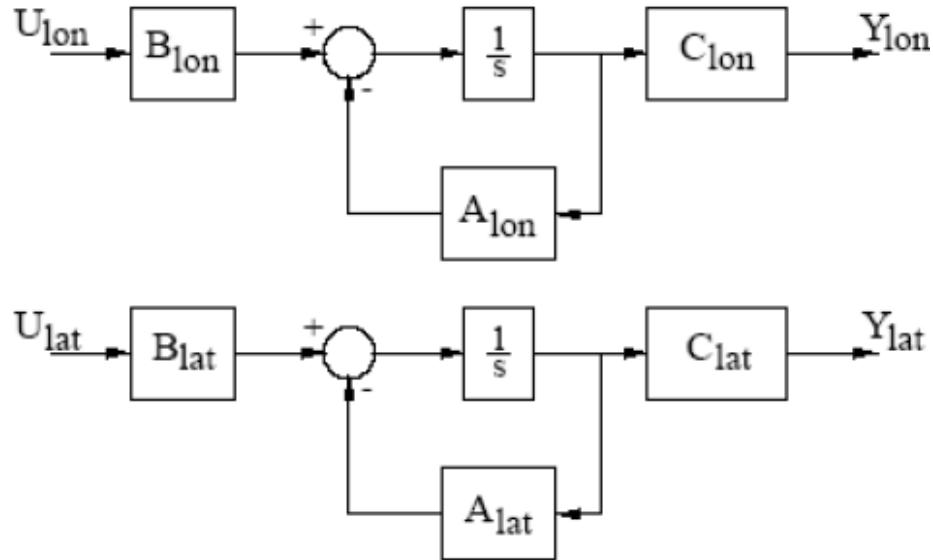


Figura 2-4: Diagrama de bloque del modelo completo, incluyendo los movimientos longitudinal y lateral.

Al inicio del epígrafe se expuso que la dinámica del avión se describe mediante los modelos mostrados en la figura 2-4, donde los movimientos longitudinal y lateral se encuentran desacoplados. Utilizando estos modelos es posible desarrollar un sistema de control que permita controlar estabilidad y rumbo.

Control de estabilidad: Equivale a controlar el ángulo de cabeceo (θ) para el movimiento longitudinal y el ángulo de alabeo (ϕ) para el movimiento lateral.

Control de rumbo: Consiste en controlar el ángulo de guiñada (ψ) para el movimiento lateral.

El presente trabajo tiene como objetivo controlar el seguimiento de puntos en el espacio de un UAV, por lo cual el lazo de control de estabilidad es irrelevante en el mismo, por esta razón se centra la atención en el control de rumbo.

2.5 Lazo de Control de Rumbo.

Garantizar que el avión vuele siguiendo una trayectoria predeterminada, a una altura deseada, es fundamental para el éxito de las misiones que éste llevará a cabo. El

control de navegación consiste en mantener regulados la altura y la trayectoria o rumbo del vehículo, centrando la atención en el control de rumbo.

Como se mencionó anteriormente es posible mantener un rumbo deseado controlando el ángulo de guiñada (ψ). El modelo dinámico planteado en el sub-epígrafe 2.4.2 para el movimiento lateral, permite controlar el ángulo de guiñada manipulando tanto los alerones como el timón de cola. En este trabajo se controla el ángulo de guiñada manipulando los alerones.

En el trabajo de diploma “Modelado y Control convencional de un UAV” (Socarrás 2011) se presenta un lazo de control de rumbo (Figura 2-5) en el cual se sintonizó un control proporcional (P). Además se colocó un pre-filtro a la entrada, para evitar cambios bruscos en el *setpoint* del sistema, también, por razones de diseño, se situó una saturación al *setpoint* del lazo interno para limitar el ángulo de alabeo evitando desestabilizar el sistema. Por último se saturó el mando de *roll* al lazo interno a ± 15 grados.

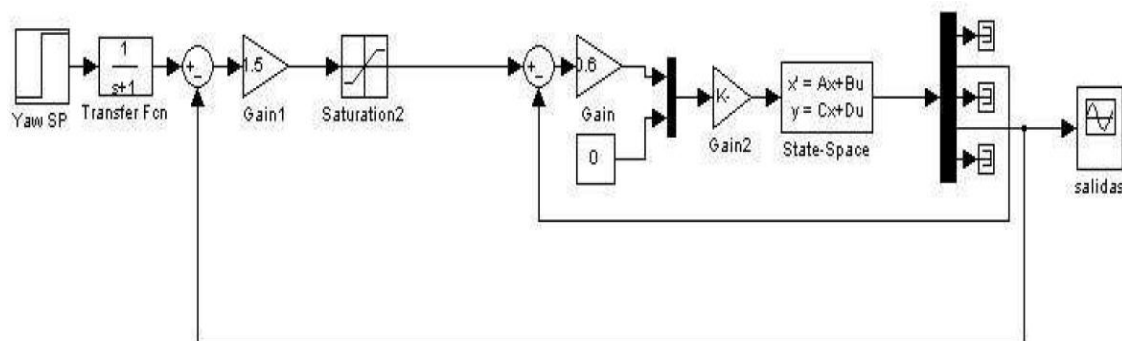


Figura 2-5: Esquema de Control de Rumbo

En el presente trabajo se utiliza la estrategia de control presentada en (Socarrás 2011). El objetivo final del control del ángulo de guiñada es utilizarlo como lazo interno de un control en cascada, en el cual el lazo externo debe garantizar el seguimiento de trayectorias, utilizando coordenadas reales del vehículo (Figura 2-6). En este tipo de control la diferencia entre las coordenadas deseadas y las reales se debe traducir en

un *setpoint* de guiñada (Yaw SP) que se alcanzará con la estrategia explicada en el epígrafe 2.6.

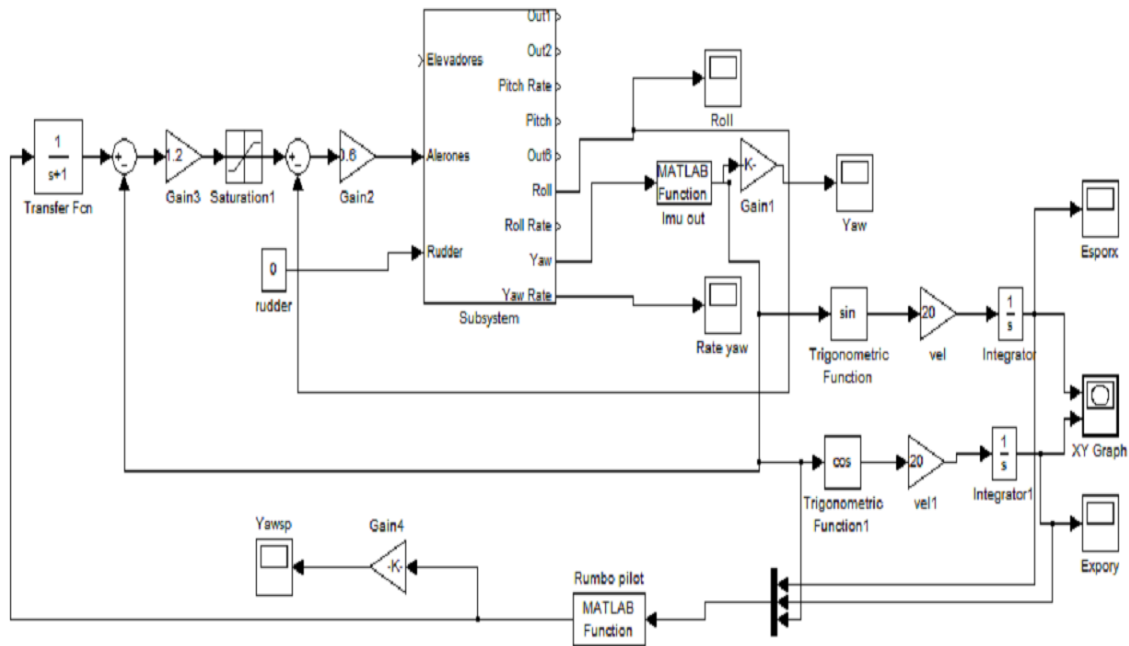


Figura 2-6: Esquema de control de rumbo modificado

El ajuste de las ganancias en el lazo de control de guiñada se toman idénticas a las del esquema planteado por (Socarrás 2011).

Para conocer la posición actual (coordenadas reales) del vehículo se utilizan la velocidad y la guiñada (Yaw) real del avión como datos. La velocidad es constante y de valor 20m/s, la información de la guiñada la da el modelo dinámico. Finalmente conocemos la posición integrando las siguientes ecuaciones:

$$\dot{X} = v \cos(\psi)$$

$$\dot{Y} = v \sin(\psi)$$

Donde X, Y son las coordenadas de la posición del UAV.

ψ es el ángulo de guiñada del UAV.

v es la velocidad lineal del UAV.

2.6 Guiado del vehículo.

Con el propósito de garantizar seguimiento de puntos deseados se realiza el guiado del vehículo. El objetivo de este seguimiento es el ajuste del desplazamiento hacia un conjunto de *waypoints* en el mapa. Esto se consigue manipulando la dirección del vehículo.

2.6.1 Seguimiento de puntos (*waypoints*).

El establecimiento de *waypoints* y su posterior seguimiento es una de las formas más habituales de control de rumbo para UAVs. Cada *waypoint* consiste en unas coordenadas espaciales a las que el UAV deberá aproximarse. Al establecer una secuencia de *waypoints* se determinan algunos lugares por los que el UAV deberá pasar, aunque no la trayectoria completa.

Para determinar completamente la trayectoria se necesitan, además de la entrada en forma de secuencia de *waypoints*, un modelo de cómo el UAV sigue la secuencia de *waypoints*. En la figura 2-7 se muestra un esquema del proceso de seguimiento de *waypoints*.

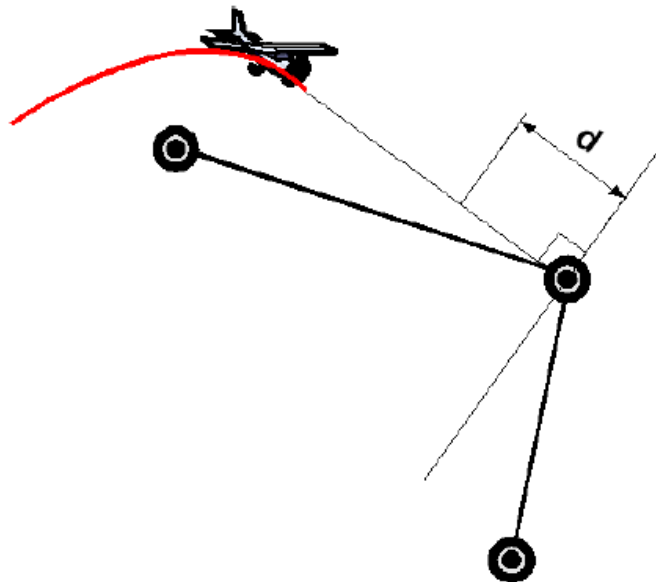


Figura 2-7: Condición de llegada a un *waypoint*

Como puede observarse en la figura 2-7, una de las características determinantes para el comportamiento en el seguimiento de *waypoints* es la condición de llegada al mismo. Esto es así, debido a que la condición de llegada es la que permite conmutar de un punto deseado al siguiente. En el modelo usado en este trabajo esta condición viene determinada por la distancia del UAV (posición actual) al punto deseado. De esta forma el punto se da por vencido cuando la distancia desde el UAV hasta el mismo es igual o menor a 50m.

2.6.2 Guiado del vehículo.

El seguimiento de los puntos en el espacio se realiza orientando el vehículo hacia la posición del *waypoint*, lo que se ejecuta dando al vehículo un ángulo de guiñada deseado (ψ_d). Esto significa que el seguimiento de una referencia depende únicamente del estado actual del vehículo (UAV) y del *waypoint* que se está siguiendo. Estos valores están dados por:

$$\psi_d = \tan^{-1} \left(\frac{Y_{wpi} - Y}{X_{wpi} - X} \right)$$

$$h_d = h_{wpi} = Cte$$

$$v_d = v_{cte}$$

Donde X e Y son las coordenadas del UAV;

ψ_d, h_d, v_d Son las referencias en altura, guiñada y velocidad;

$X_{wpi}, Y_{wpi}, h_{wpi}$ Son las coordenadas del *waypoint* que se está siguiendo.

2.7 Simulación

Una vez analizados los temas de la orientación espacial, coordenadas de ubicación y guiado del vehículo, y contando con los modelos dinámicos del mismo, se procede a la

simulación del problema de generación y control de puntos en el mapa. Para esto se utilizará como herramienta el Simulink del Matlab.

El objetivo del control presentado en este trabajo de diploma es orientar la aeronave hacia un punto deseado el cual está previamente definido en una matriz de puntos. Esto significa mantener un rumbo hacia el punto deseado con ángulo de inclinación (ψ_d) calculado en 2.6.2.

El vehículo aéreo mantendrá esta orientación hasta situarse a una distancia de 50m del punto a vencer. Una vez que esta distancia sea menor, el punto se dará por vencido y luego se dirigirá el avión hacia el siguiente.

Para la realización de la simulación se utilizan los puntos deseados ordenados en una matriz de dimensiones Nx2. Donde N representa la cantidad de puntos deseados.

$$W_{pi} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 \\ X_2 & Y_2 \\ \vdots & \vdots \\ X_i & Y_i \end{bmatrix}$$

En la matriz anteriormente representada la columna 1 representa la coordenada cartesiana en X, mientras que la columna 2 representa la coordenada en Y.

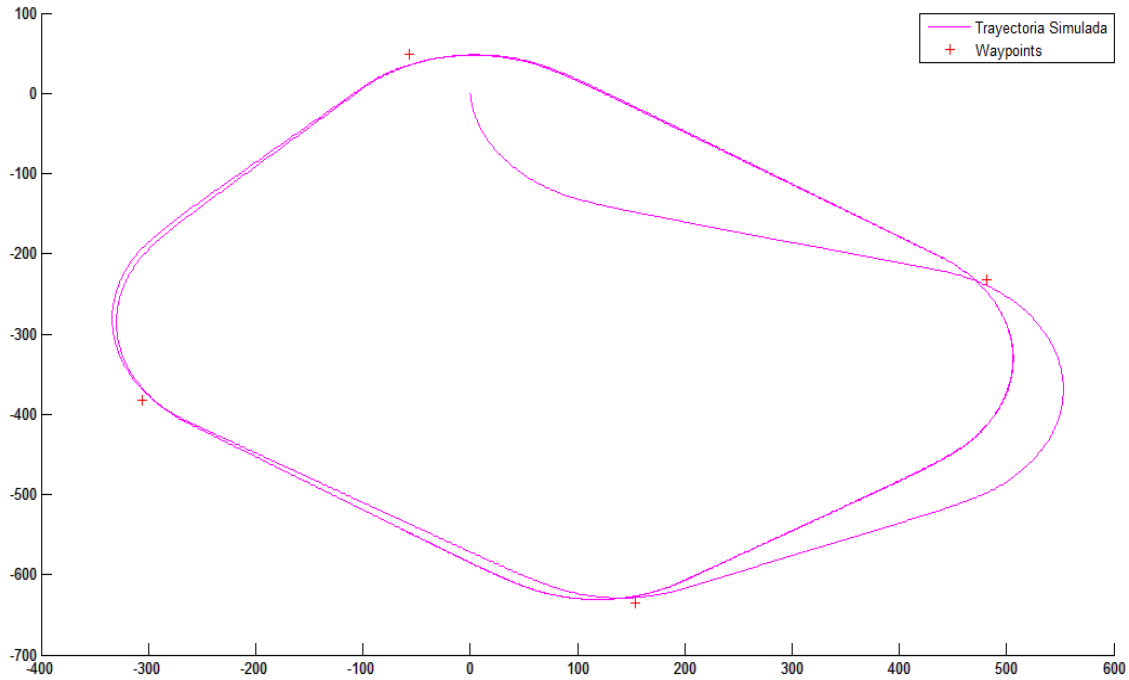


Figura 2-8: Simulación

En la figura 2-8 se muestra la simulación del seguimiento de trayectoria utilizando como puntos deseados:

$$W_p = \begin{bmatrix} 481.7786 & -232.3653 \\ 154.2165 & -635.3760 \\ -306.1111 & -382.9682 \\ -56.3085 & 48.5473 \end{bmatrix}$$

Estos puntos fueron utilizados en el vuelo real de fecha 31 de marzo de 2012. Los puntos se encuentran señalados en cruces rojas.

2.8 Análisis de los resultados.

Para realizar la validación del software de simulación se utilizan los datos del vuelo real de fecha 31 de marzo de 2012. En la figura 2-7 se muestran las trayectorias real y simulada, en colores azul (real) y marrón (simulada) respectivamente.

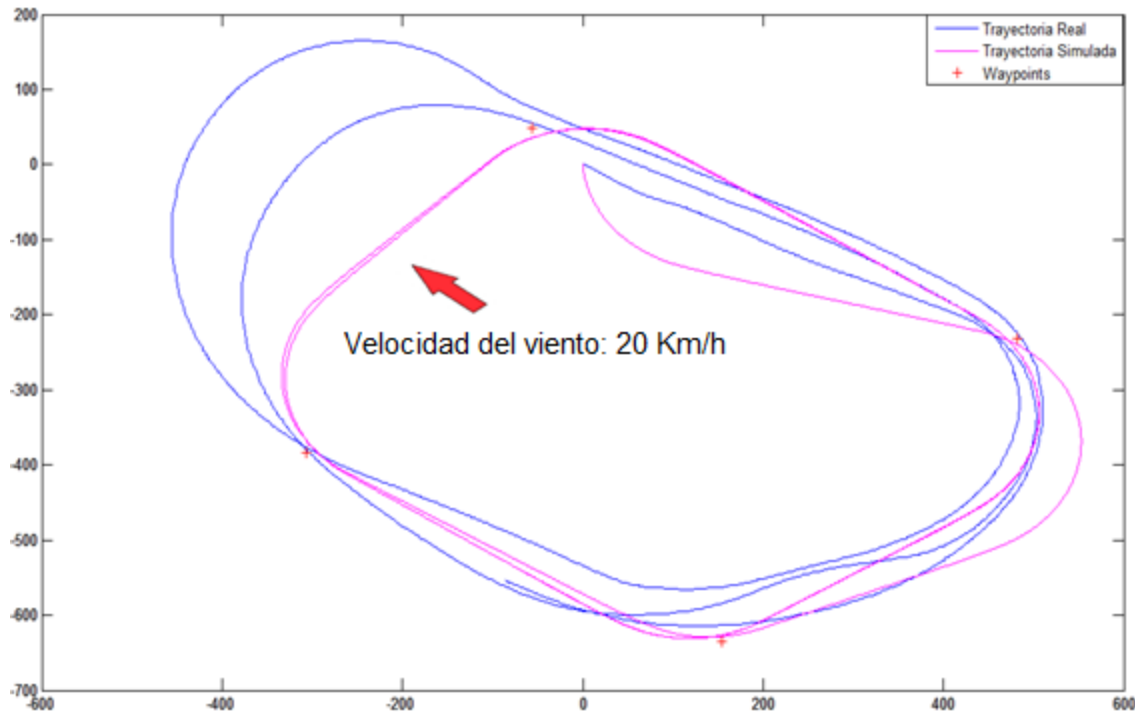


Figura 2-7: Comparación entre las trayectorias real y simulada.

La superposición de las trayectorias real y simulada muestra similitud entre las trayectorias, aunque en la esquina superior izquierda se evidencia que existe un error entre ambas. Esta desviación está provocada por la existencia de viento en el momento del vuelo real. La dirección del viento se indica con la saeta en rojo y sus características son desconocidas.

Al no contar con un modelo atmosférico, es imposible realizar una simulación exacta de la trayectoria real, sin embargo el modelo muestra gran fiabilidad respecto al seguimiento de los puntos deseados.

2.9 Conclusiones parciales del capítulo.

A lo largo de este capítulo se sentaron las bases matemáticas para el seguimiento de puntos en el mapa. Se definió el algoritmo de guiado a partir de un conjunto de *waypoints* que son pasados a la estación a bordo. Se tomaron en cuenta las diferencias que existen entre los sistemas de coordenadas utilizados y se diseñó un algoritmo para la transformación de coordenadas entre ambos sistemas.

También se presentó el lazo de control de rumbo a utilizar explicando la modificación realizada. Finalmente se efectuó el análisis del software de navegación mediante comparaciones con datos de vuelos reales y se concluye que el modelo desarrollado es capaz de realizar el seguimiento de puntos en el espacio.

CAPÍTULO 3: ALGORITMO PROPUESTO

3.1 Introducción.

En los capítulos anteriores se han descrito las características principales de los UAVs, así como los requerimientos y el diseño del software para lazo de control de rumbo. En este capítulo se realiza la propuesta de un nuevo algoritmo de generación de trayectoria para UAV.

3.2 Trayectorias propuestas.

En el capítulo anterior se diseñó un software control de camino para el UAV N606LS, dicho software se basó en un control de rumbo para dirigir el vehículo hacia un punto deseado en el espacio. Esto permitió que el avión siguiera indirectamente un camino entre los puntos propuestos, pero en la mayoría de los casos no llegó a vencer los mismos, ya sea por las condiciones atmosféricas, como por el modelo implementado. Para evitar este inconveniente se propone realizar la construcción de caminos discretizados, independientes del tiempo, que conecten los puntos deseados.

Con el empleo de líneas rectas y arcos de circunferencia se pueden construir varios lugares geométricos independientes del tiempo, que de una forma u otra conecten ciertos puntos (*waypoints*) en el espacio. La unión de estos puntos representa el camino sobre el cual se orienta el vehículo.

La forma más sencilla de representar la trayectoria deseada es la aproximación de la misma como un conjunto de líneas rectas que une dos puntos consecutivos, como se muestra en la figura 3-1.

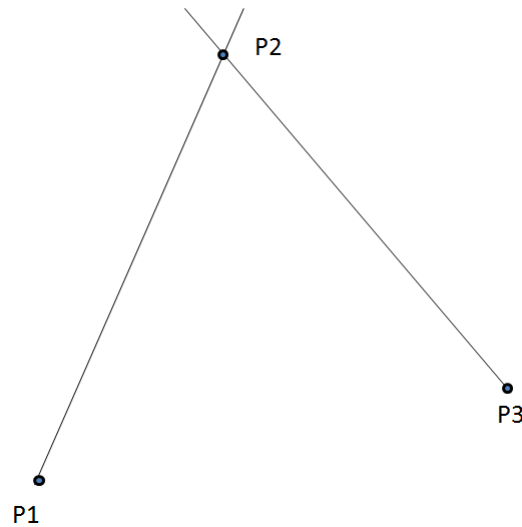


Figura 3-1: Trayectoria 1

El inconveniente fundamental de la aproximación por tramos rectos, son los puntos de giro. En estos puntos se presenta una alinealidad de salto, ya que el sistema no puede cambiar instantáneamente de dirección, sino que lo hace describiendo un arco de circunferencia debido a la saturación del ángulo del timón. Esto provoca que el sistema se desvíe de la trayectoria deseada en el momento del cambio de tramo.

Para minimizar este efecto se propone que el giro se realice antes de alcanzar el punto deseado, dejando suficiente espacio como para que el sistema describa un arco de circunferencia, con un radio mayor que el radio de curvatura mínimo permitido por el mismo, como se muestra en la figura 3-2

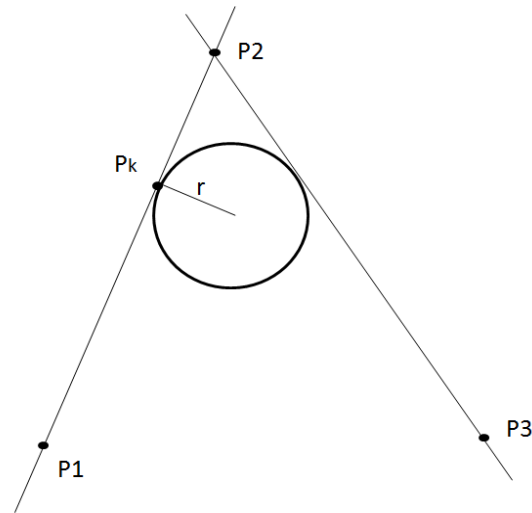


Figura 3-2: Trayectoria 2

El principal inconveniente de la aproximación anterior es que los puntos deseados nunca son alcanzados, ya que el giro se realiza con anterioridad. Por esta razón se propone la variante representada en la figura 3-3

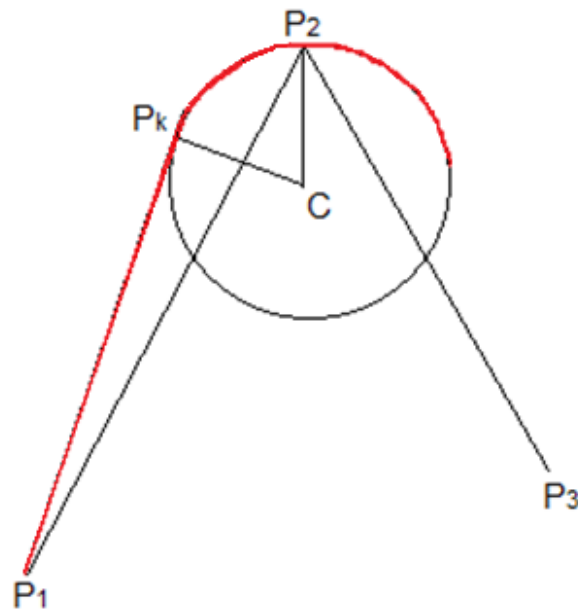


Figura 3-3: Trayectoria 3

El objetivo de esta aproximación es que el UAV describa la trayectoria señalada en rojo, trasladándose sobre la recta P_1P_k , y siguiendo el desplazamiento sobre un arco de

circunferencia con radio en C (x,y). Es necesario aclarar que P_k es un punto tangente a la circunferencia.

3.2.1 Planificación de la trayectoria.

Para definir los tramos de línea recta se utiliza el ángulo entre el segmento y el eje X_n del plano de navegación (σ_k), y los dos puntos que limitan el segmento (P_{k-1} , P_k), como se muestra en la figura 3-4, también es necesario conocer el centro C de la circunferencia.

A continuación se muestran los cálculos para encontrar el centro de la circunferencia (C).

Según la figura 3-4

$$B = \tan^{-1}\left(\frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}\right)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{Y_2 - Y_3}{X_2 - X_3}\right)$$

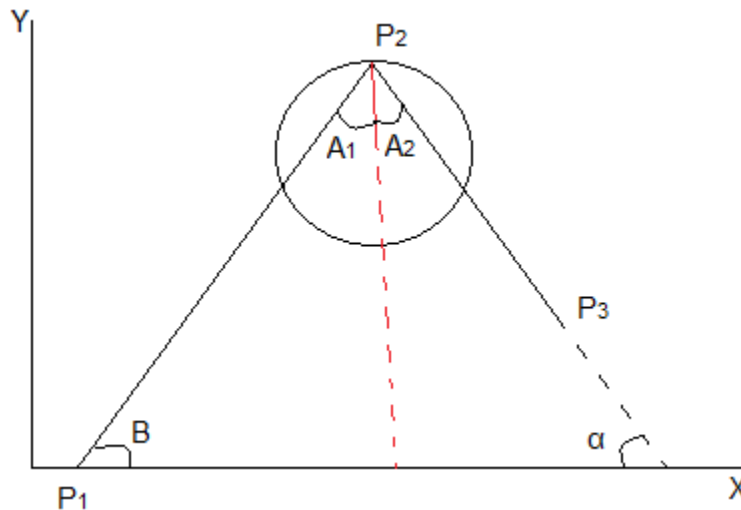


Figura 3-4: Ángulos A_1 y A_2

Se asume que los ángulos A_1 y A_2 son iguales ($A_1 = A_2$) y que $A = (A_1 + A_2)$.

Por tanto:

$$A = 180^\circ - B - \alpha$$

El centro de la circunferencia se calcula como sigue (figura 3-5):

$$D = 180^\circ - B - A_1$$

$$Y_c = R \cdot \sin(D) - Y_2$$

$$nc = Y_2 - \tan(D) \cdot X_2$$

$$X_c = (Y_c - nc) / \tan(D)$$

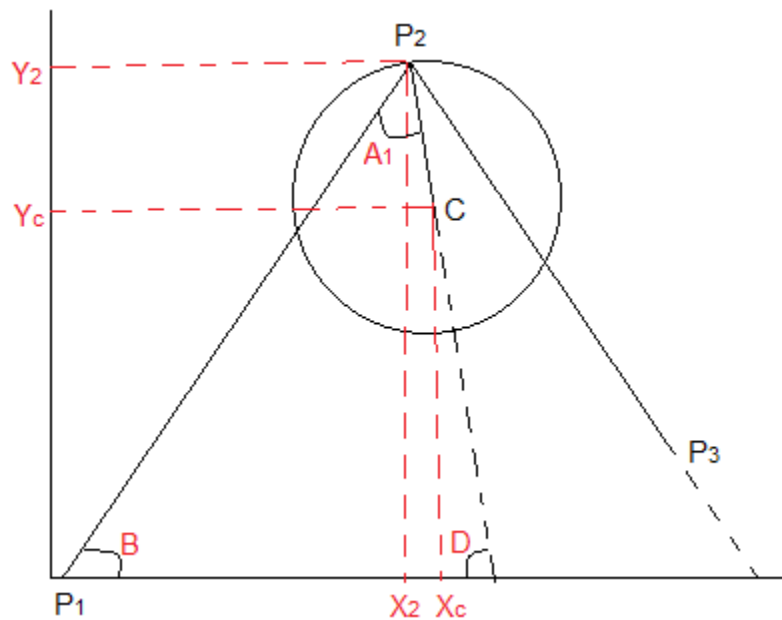


Figura 3-5: Centro de la circunferencia

Con el apoyo de la figura 3-6 se procede a calcular el punto pk como sigue:

$$P_1C = \sqrt{(Y_c - Y_1)^2 + (X_c - X_1)^2}$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{Y_c - Y_1}{X_c - X_1}\right)$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{R}{P_1C}\right)$$

$$\sigma_k = 90^\circ - \beta - \theta$$

Conociendo el ángulo σ_k se tiene la inclinación del segmento P_1P_k .

$$P_1P_k = \frac{R}{\tan \theta}$$

$$X_k = P_1P_k \cdot \sin(\sigma_k) + X_1$$

$$n_k = Y_1 - \tan(90^\circ - \sigma_k) \cdot X_1$$

$$Y_k = \tan(90^\circ - \sigma_k) \cdot X_k + n_k$$

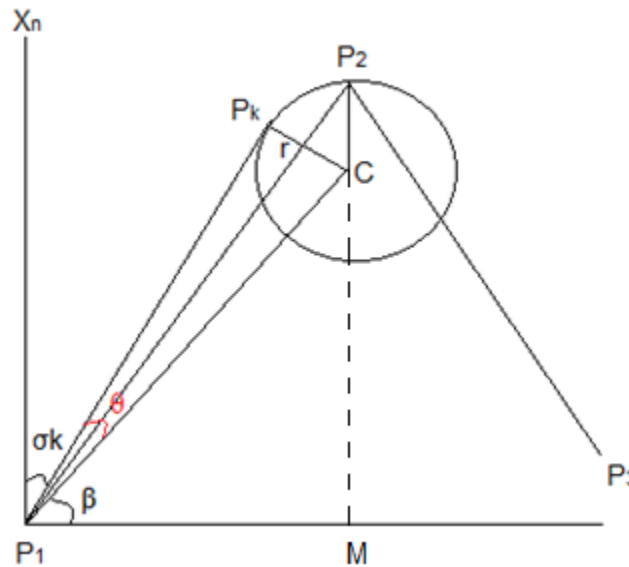


Figura 3-6: Planificación de la trayectoria.

3.2.2 Ley de Guiado.

En el epígrafe anterior se mencionaba el esquema de la generación de trayectoria, el cual consiste en generar una nueva serie de puntos deseados. Estos puntos están ubicados sobre una circunferencia de radio, igual al radio mínimo de saturación del timón. El objetivo principal que se persigue con esta planificación (Figura 3-3) es obligar

al vehículo a pasar sobre el punto deseado originalmente, ya que una vez llegado al punto recalculado se ordena girar, saturando el timón. Este movimiento describe un arco de circunferencia que se ubica sobre el *waipoint* original.

El método de guiado propuesto es el mismo que se explicó en el epígrafe 2.6.2, utilizando el lazo de control de rumbo del epígrafe 2.5. Por tanto en este capítulo se pretende establecer una comparación entre los resultados obtenidos en el capítulo dos y el capítulo tres.

3.3 Análisis de resultados.

En el capítulo dos se presentó un algoritmo de seguimiento de puntos que consiste en mantener fijo un rumbo deseado, para que el UAV se dirija hacia el mismo. Para realizar la simulación se pasan al software un conjunto de puntos deseados, ordenados en la matriz Wp del epígrafe 2.7. El resultado se muestra en la figura 2.8 del capítulo dos, donde se observa que la trayectoria no se desplaza, en la mayoría de los casos, sobre el punto deseado, pues el mismo se da como vencido a los 50m de distancia. Esto provoca que el giro se realice antes y por tanto, el vehículo no pase sobre el *waypoint*.

Utilizando la planificación de trayectoria del epígrafe 3.2.1 se toman los puntos originales de la matriz Wp y se recalculan los nuevos *waypoints*, como muestra la figura 3-7.

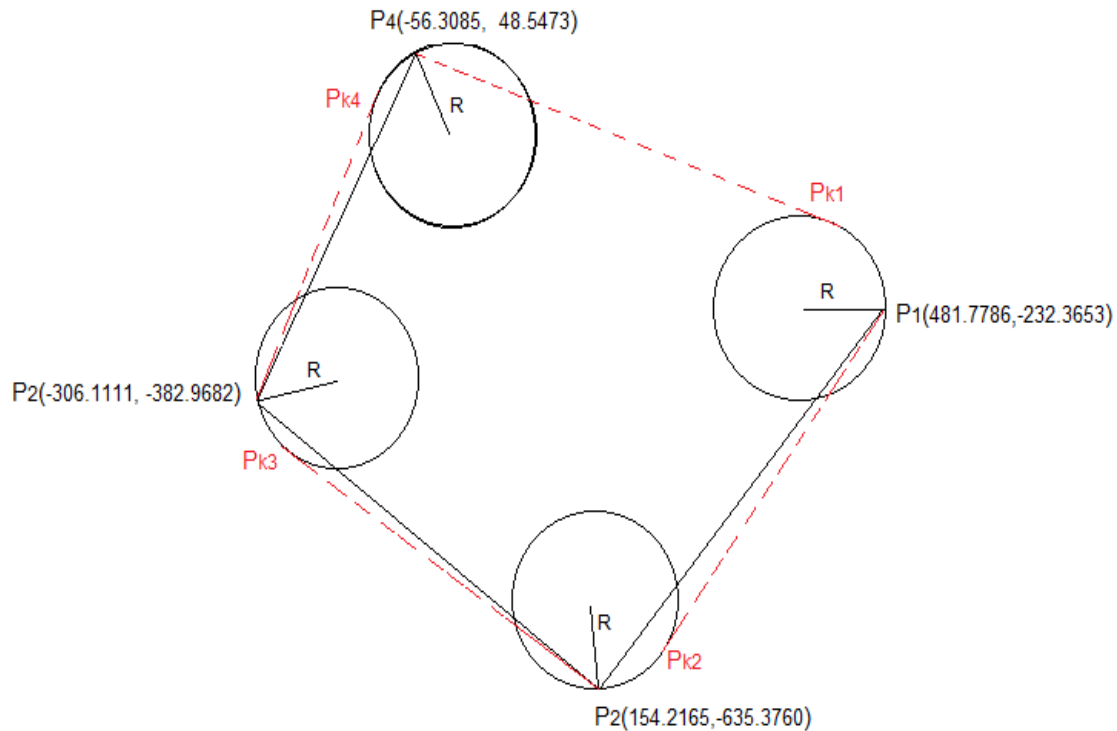


Figura 3-7: Cálculo de los puntos deseados.

Una vez calculados los nuevos puntos, se pudo confirmar que, partiendo de los puntos originales $P1$, $P2$, $P3$ y $P4$ es posible calcular una serie de puntos P_{k1} , P_{k2} , P_{k3} y P_{k4} , que representan la intersección de la recta tangente a la circunferencia de radio R , que pasa por los *waypoints* originales. Estos puntos representan la entrada a dichas circunferencias.

El control de rumbo por consiguiente, debe trabajar en función de los puntos recalculados, tomando un punto como vencido cuando el avión se encuentra a 2m del mismo, ya que en ese momento el vehículo se encamina hacia el siguiente punto. El resultado de la simulación se muestra en la figura 3-8.

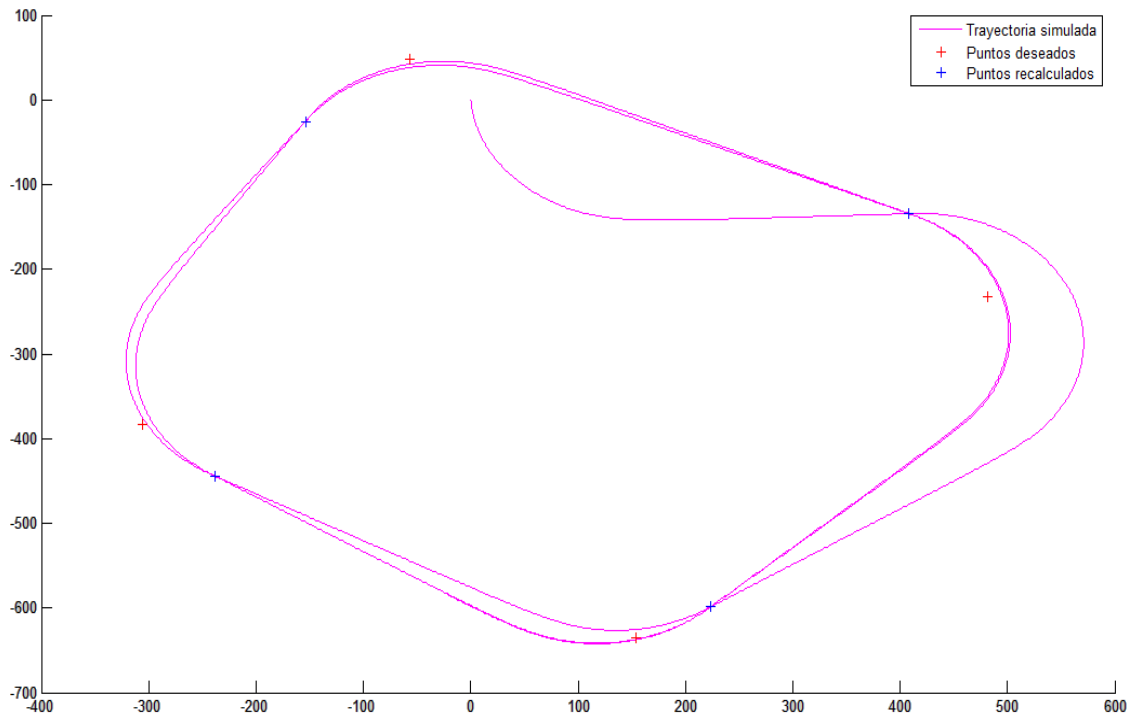


Figura 3-8: Trayectoria simulada

En la figura 3-8 se muestran en azul los puntos recalculados, y en rojo los originales, y se evidencia que con el cálculo de los nuevos puntos, se obliga al vehículo a pasar por encima de los puntos deseados (en rojo), sin que exista gran desviación.

3.4 Análisis económico.

La utilización de aviones pequeños no tripulados, en sustitución de los convencionales, para tareas específicas tiene entre sus grandes ventajas un considerable ahorro de recursos. Un ejemplo de esto lo podemos tener en la agricultura, donde una hora de vuelo de las avionetas utilizadas cuesta aproximadamente 400 CUC, mientras que los pequeños aviones no tripulados pueden sustituirlas eficazmente costando menos de 20 CUC como promedio.

Los vehículos aéreos autónomos están valorados entre 30000 y 15 millones de dólares estadounidenses (USD), dependiendo del tamaño del vehículo, los sensores y equipos instalados, su capacidad de carga útil y su autonomía.

Las tareas de vigilancia de las costas y supervisión de los ecosistemas de playas que son explotadas por el turismo, se realizan con aviones o helicópteros convencionales. El costo de cada una de estas tareas de supervisión se valora en 20 000 CUC, la implementación del autopiloto está en el orden de los 6 000 CUC como inversión primaria, el costo por concepto de combustible y reparaciones es muy pequeño en comparación con los vehículos de gran escala.

El costo de desarrollo del prototipo del autopiloto diseñado, incluyendo la aeronave está en el rango de los 8000 USD. Todo el equipamiento de hardware y sensores instalados clasifican en la gama baja que proporcionan los fabricantes, donde el único sensor instalado es la MTI-G de Xsens, el cual está valorado en 5069 USD, a pesar de ser un precio relativamente alto no se compara con sensores utilizados en otros UAV que pueden costar 100 000 dólares (Pineda 2011).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- En correspondencia con la capacidad de cómputo real se seleccionó como método de control el seguimiento de puntos en el espacio.
- El lazo de control de rumbo implementado garantizó el seguimiento de puntos deseados.
- Las trayectorias simuladas muestran diferencias con respecto a las trayectorias reales, debido a que el software de navegación no cuenta con un modelo atmosférico que corrija el efecto del viento.
- El método descrito en el capítulo tres permite corregir las deficiencias presentadas en el esquema del capítulo dos en cuanto al vencimiento real de los puntos deseados.

Recomendaciones

- Implementar el software de generación y guiado en la computadora a bordo del UAV N606LS con el objetivo de observar su desempeño en un vuelo real.
- Diseñar un nuevo algoritmo de navegación que utilice la generación de trayectoria propuesta en el capítulo tres, con la ley de guiado LOS (*Line of Sight*).
- Perfeccionar los algoritmos de planificación y seguimiento de trayectoria.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abusleme, A. C. (2000). "Control difuso de vehículo volador no tripulado."
- ALSwailam, S. I. (2004). Application of Robust Control in Unmanned Vrhicles Flight Control System Design Cranfield University.
- Barrientos, A., L. F. Peñín, et al. (1998). Fundamentos de Robótica Universidad Politécnica de Madrid.
- Ben, Y. (2010). Development of a miniature low-cost UAV helicopter autopilot plataform and formation flight control of UAV teams. Doctor of Philosophy, National University of Singapore.
- Bertrand, S., N. Guénard, et al. (2011). "A hierarchical controller for miniature VTOL UAVs: Design and stability analysis using singular perturbation theory." Control Engineering Practice 19(10):1099-1108
- Bristeau, P. J., E. Dorveaux, et al. (2010). "Hardware and software architecture for state estimation on an experimental low-cost small-scaled helicopter." Control Engineering Practice 18(7): 733-746.
- Carmenate, M. E. M. (2009). Desarrollo de sistemas de control para autopiloto de avión de pequeño porte, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Córdoba, M. A. (2005). "Análisis, Modelamaiento y Construcción del Sistema de Control Embebido DSP/FPGA Fuzzy Logic de Vuelo Autónomo para una Aeronave no tripulada UAV Efigenia basado en Matlab Simulink Aerospace and Real Time Workshop Toolbox."
- Fossen, T. I. (2002). "Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles."
- Fossen, T. I. (2011). "Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control."
- Fradkov, A. L. and B. Andrievsky (2011). "Passification-based robust flight control design." Automatica 47(12): 2743-2748.
- Francois, A. (2000). Sistemas de coordenadas y transformaciones. GeoConceptos Uruguay.
- Guowei, C., B. M. Chen, et al. (2008). "Modeling and Control of the Yaw Channel of a UAV Helicopter." Industrial Electronics, IEEE Transactions on 55(9): 3426-3434

- Hernández, Y. (2010). Modelo matemático del avión N606LS. Ingeniero en Automática, Universidad Central de las Villas.
- Hoffmann, G. M., H. Huang, et al. (2011). "Precision flight control for a multi-vehicle quadrotor helicopter testbed." Control Engineering Practice **19**(9): 1023-1036.
- How, J. P., C. Fraser, et al. (2009). "Increasing autonomy of UAVs." Robotics & Automation Magazine, IEEE **16**(2): 43-51.
- Kendoul, F., I. Fantoni, et al. (2009). "Optic flow-based vision system for autonomous 3D localization and control of small aerial vehicles." Robotics and Autonomous Systems **57**(6-7): 591-602.
- Kim, H. J. and D. H. Shim (2003). "A flight control system for aerial robots: algorithms and experiments." Control Engineering Practice **11**(12): 1389-1400.
- Lemus, J. L. (2011). Sistema software de navegación y guiado en tiempo real para Vehículo Autónomo Sumergible. Ingeniero en Automática, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Leonardo, S. G. (2008). Planificación de trayectoria para un robot tipo con restricciones dinámicas. Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Bogotá. **Vol. 18-1** 75-94.
- Liu, C., W.-H. Chen, et al. (2011). "Piecewise constant model predictive control for autonomous helicopters." Robotics and Autonomous Systems **59**(7-8): 571-579.
- Matveev, A. S., H. Teimoori, et al. (2011). "A method for guidance and control of an autonomous vehicle in problems of border patrolling and obstacle avoidance." Automatica **47**(3): 515-524.
- Mayorga, R. A. (2009). Sistema de Navegación para Vehículos Aéreos Cuadricópteros. Ingeniería Técnica Aeronáutica, especialidad Aeronavegación, Universidad Técnica de Cataluña.
- McGill, P. R., K. R. Reisenbichler, et al. (2011). "Aerial surveys and tagging of free-drifting icebergs using an unmanned aerial vehicle (UAV)." Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography **58**(11-12): 1318-1326.
- Mondragón, I. F., P. Campoy, et al. (2010). "Omnidirectional vision applied to Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) attitude and heading estimation." Robotics and Autonomous Systems **58**(6): 809-819.
- Ollero, A. and L. Merino (2004). Control and perception techniques for aerial robotics. Annual Reviews in Control, ELSEVIER.

- Osborne, R. W., Y. Bar-Shalom, et al. (2011). "Design of an Adaptive Passive Collision Warning System for UAVs." Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on **47**(3): 2169-2189.
- Pajares, G., J. J. Ruz, et al. (2008). Generación de trayectoria y toma de decisiones para UAVs. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial. **5**.
- Paw, Y. C. and G. J. Balas (2011). "Development and application of an integrated framework for small UAV flight control development." Mechatronics **21**(5): 789-802.
- Pineda, L. M. (2008). Modelo matemático de un avión autónomo, Universidad Central de las Villas.
- Pineda, L. M. (2011). Control del vehículo aéreo autónomo basado en modelo dinámico. Master en Ciencias, Universidad Central de las Villas.
- Raffo, G. V., M. G. Ortega, et al. (2010). "An integral predictive/nonlinear H^∞ control structure for a quadrotor helicopter." Automatica **46**(1): 29-39.
- Rios, L. H. (2008). Generación de trayectorias para un robot móvil empleando redes neuronales, Universidad Tecnológica de Pereira.
- Shi, Y. and R. Li (2011). Coordinated stability based trajectory tracking control law design of reconnaissance and attack UAV. Control Conference (CCC), 2011 30th Chinese.
- Socarrás, H. E. (2011). Modelado y Control convencional de un UAV. Ingeniero en Automática, Universidad Central de las Villas.
- Xiang, H. and L. Tian (2011). "Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV)." Biosystems Engineering **108**(2): 174-190.
- Weifeng, L. (2011). A UAV route tracking algorithm based on the previewing point and fuzzy PID control. Control Conference (CCC), 2011 30th Chinese.
- Zarafshan, P., S. A. A. Moosavian, et al. (2010). "Comparative controller design of an aerial robot." Aerospace Science and Technology **14**(4): 276-282.
- Ziyang, Z., W. Daobo, et al. (2010). UAV flight trajectory control based on information fusion control method. Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2010 International Conference on.