

VEHICULOS AEREOS GUIADOS AUTONOMAMENTE
UAV'S

KENNY FOENG VERGEL
JAVIER D. ZABALETA HERNANDEZ

DIRECTOR
OSCAR ACEVEDO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRICA Y ELECTRONICA
CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.
2005.

VEHICULOS AEREOS GUIADOS AUTONOMAMENTE
UAV'S

KENNY FOENG VERGEL
JAVIER D. ZABALETA HERNANDEZ

**Trabajo de monografía presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero electrónico e Ingeniero eléctrico**

DIRECTOR
OSCAR ACEVEDO
ING. ELECTRONICO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRICA Y ELECTRONICA
CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.

2005.

Nota de aceptación

Jurado

Jurado

Cartagena D. T. Y C., Octubre de 2005

Señores

COMITÉ CURRICULAR

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

La ciudad

Respetados señores:

Con toda atención nos dirigimos a ustedes con el fin de presentarles a su consideración, estudio y aprobación la monografía titulada VEHICULOS AEREOS GUIADOS AUTONOMAMENTE - UAV'S como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Eléctrico.

Atentamente

JAVIER D. ZABALETA HERNANDEZ

Cartagena D. T. Y C., Octubre de 2005

Señores

COMITÉ CURRICULAR

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

La ciudad

Respetados señores:

Con toda atención nos dirigimos a ustedes con el fin de presentarles a su consideración, estudio y aprobación la monografía titulada VEHICULOS AEREOS GUIADOS AUTONOMAMENTE - UAV'S como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Electrónico.

Atentamente

KENNY FOENG VERGEL

Cartagena D. T. Y C., Agosto de 2005

Señores

COMITÉ CURRICULAR

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

La ciudad

Cordial saludo:

A través de la presente me permito entregar la monografía titulada VEHICULOS AEREOS GUIADOS AUTONOMAMENTE - UAV'S para su estudio y evaluación la cual fue realizada por los estudiantes KENNY FOENG VERGEL y JAVIER D. ZABALETA HERNANDEZ, de la cual acepto ser su director.

Atentamente,

OSCAR ACEVEDO

Ing. Electrónico

AUTORIZACIÓN

Yo JAVIER D. ZABALETA HERNANDEZ, identificado con la cedula de ciudadanía numero 73.199.205 de Cartagena, autorizo a la universidad tecnológica de Bolívar, para hacer uso de mi trabajo de monografía y publicarlo en el catalogo on-line de la biblioteca

JAVIER D. ZABALETA HERNANDEZ

AUTORIZACIÓN

Yo KENNY FOENG VERGEL, identificado con la cedula de ciudadanía numero 73.207.127 de Cartagena, autorizo a la universidad tecnológica de Bolívar, para hacer uso de mi trabajo de monografía y publicarlo en el catalogo on-line de la biblioteca

KENNY FOENG VERGEL

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	1
OBJETIVOS	3
1. ESTADO DEL ARTE	4
1.1 GENERALIDADES	4
1.2 LOS UAV'S A NIVEL MUNDIAL	6
1.3 EL FUTURO	7
2. SISTEMAS DE SENSORES Y NAVEGACION EMPLEADOS EN LOS UAV'S	8
2.1 PRESPECTIVA GENERAL	8
2.1.1 Sensores No Visuales	10
2.1.2 Sensores Visuales	15
2.1.3 Tipos de Sensores Básicos	16
2.1.3.1 Sensores de Orientación (Attitude Sensors)	17
2.1.3.2 Sensores de Posicionamiento	18
2.1.3.3 Sensores de Altitud	19
2.2 SISTEMA DE NAVEGACIÓN INTEGRADO GPS/INS	19
2.2.1 Fundamentación de GPS	20
2.2.2 Fundamentación de INS	22
2.2.3 Integración GPS/INS	25
2.2.3.1 El Filtro de Kalman	25
2.2.3.2 Métodos Utilizados para la Integración GPS/INS	31
2.2.3.3 Configuraciones de Integración GPS/INS	34
2.3 SISTEMA DE RADAR PARA RECONOCIMIENTO DE OBSTACULOS Y EVASIÓN DE COLISIONES	36
2.3.1 Características de los Sistemas de Sensores para Evasión de Colisiones	38
2.3.2 Análisis Requerido en los Sensores para la Evasión de Colisión	40
2.3.2.1 Requisitos del Sistema	41
2.3.2.2 Modo de Eludición de Colisiones	41

2.3.2.3	Requisitos del Sensor	41
2.3.3	Sensor Radar de Eludición de Colisión	44
2.3.3.1	Concepto OACAS	44
2.3.3.2	Parámetro de Diseño del Radar CAS	46
2.3.4	Desempeño en Detección y Evasión de Colisiones del Radar	47
2.3.4.1	La Problemática de la Detección de Obstáculos	47
2.3.4.2	La problemática de la Evasión de Colisiones	48
3.	APLICACIONES DE LOS UAV'S	52
3.1	APLICACIONES LABORALES	52
3.1.1	Monitoreo Ambiental	52
3.1.2	Monitoreo de Incendios Ambientales	53
3.1.3	Fotografía Aérea	53
3.2	APLICACIONES MILITARES	54
3.2.1	Vigilancia y Reconocimiento	54
3.2.2	Guerra Electrónica	55
3.2.3	Combate Aéreo	55
4.	DESARROLLO DE LOS UAV'S EN COLOMBIA	57
4.1	PROYECTO EFIGENIA	57
4.1.1	Objetivos Establecidos en el Proyecto EFIGENIA	58
4.1.2	Desarrollos Implicados en el Proyecto EFIGENIA	59
4.1.2.1	Diseño de la Aeronave	59
4.1.2.2	Sistema de Navegación y Control de Vuelo	59
4.1.2.3	Sistema de Comunicación de Datos (Telemetría y Telecontrol)	60
4.1.2.4	Equipos Electrónicos de Misión	60
4.1.2.5	Estación de Control	61
4.2	PROYECTO COLIBRÍ	61
4.2.1	Objetivos Establecidos en el Proyecto COLIBRÍ	62
	CONCLUSIONES	65
	BIBLIOGRAFIA	67
	ANEXOS	70

LISTAS ESPECIALES

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Giróscopo o peonza simétrica	12
Figura 2. Diagrama General de la Solución Inercial	24
Figura 3. Ciclo de trabajo del filtro de Kalman	29
Figura 4. Ciclo de trabajo del filtro de Kalman con ecuaciones	31
Figura 5. Diagrama de bloques de la integración GPS/INS utilizando un filtro de kalman complementario	33
Figura 6. Diagrama de bloques de la integración GPS/INS utilizando un filtro de kalman extendido	34
Figura 7. Concepto de OACAS	44
Figura 8. Algoritmo de Proceso para la Evasión de Colisión	49

Lista de Fotos

	Pág.
Foto 1. Sensor Visual, Cámara	16
Foto 2. Pathfinder-plus.	52
Foto 3. Prototipo de la UNC.	53
Foto 4. Global Hawk.	54
Foto 5. Prototipo de la UNC.	55
Foto 6. X-45 de Boeing.	56
Foto 7. Ilustración de EFIGENIA.	58

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Características del Sensor.	39
Tabla 2. ELOS “observar y evadir”.	43
Tabla 3. Criterio de “Tiempo de Colisión”.	45
Tabla 4. Parámetros de Intercambio para el Diseño del Radar.	46

RESUMEN

La aplicación de los vehículos no tripulados autónomos (UAV) ha sido uno de los grandes retos de los investigadores ya que son muchas las variables que este tipo de vehículo debe evaluar a la hora de desempeñarse en un medio específico. En el presente documento hablaremos acerca de cómo está actualmente la tecnología en estos vehículos aéreos, las diferentes variables, así como también de los sensores y sistemas de navegación más críticos, los cuales pueden ayudar al UAV a tener un mejor desempeño para así permitirle realizar su tarea asignada de manera más eficiente. Del mismo modo miraremos las aplicaciones a nivel mundial en las cuales se utilizan los UAV's, tanto en el campo laboral como en el campo militar. Por último, describiremos los proyectos más importantes desarrollados en Colombia, con el fin de ver cómo se encuentra la investigación y el desarrollo tecnológico de los UAV en nuestro país.

INTRODUCCION

La robótica y la automatización han entrado de manera contundente en la vida cotidiana buscando facilitar las actividades del ser humano y así poder mejorar su calidad de vida. Tareas donde es necesaria la potencia mecánica, la sutileza de un movimiento o un trabajo que necesariamente debe desarrollarse remotamente por su peligrosidad o donde no hay condiciones para la vida, actualmente se ha mostrado un especial interés en desarrollar vehículos no tripulados, donde estos tengan la capacidad de tomar decisiones sin la necesidad de un operador.

Las aplicaciones más recientes de vehículos no tripulados están en el área de la aeronáutica, en esta área las preocupaciones son más grandes debido a que estos deben sortear más variables que un vehículo terrestre, por eso es principalmente se han desarrollado en instituciones académicas, la primera preocupación es la dinámica del vehículo y el control avanzado todo esto para mejorar la calidad de vida.

Para poder mejorar la dinámica y el control de los vehículos aéreos no tripulados (UAV'S), se ha hecho énfasis en los sensores que posee los cuales le proveen la información acerca del entorno para que este pueda tomar decisiones autónomas, ya siendo estos sensores de tipo visual o no visual.

De este mismo modo se encuentran los sensores de posicionamiento global (GPS) los cuales son el alma de un UAV veremos la importancia de este tipo de sensores al igual que el sistema de navegación inercial (INS) el cual es otro componente importante para los UAV'S y como es la integración entre el GPS y INS.

Otro sensor tomado en cuenta es el de radar, miraremos cuales son sus principales características y requisitos y las aplicaciones que este le ofrece al UAV.

Así mismo se mencionan los diferentes tipos de aplicaciones en los cuales los UAV podrían ser utilizados y en los cuales ya están siendo de gran ayuda ya sea en el área militar o en el área laboral.

Finalmente se hará énfasis sobre el avance tecnológico que han tenido los UAV's en Colombia. Se estudiarán dos proyectos desarrollados por universidades Colombianas, los cuales representan un gran progreso en el campo de la aeronáutica y la electrónica.

OBJETIVOS

General

Realizar un estudio sobre de los sensores empleados en los vehículos autoguiados de carácter aéreo mediante la adquisición de información actualizada acerca de lo que se necesita saber para el desarrollo de aplicaciones militares y laborales.

Específicos

1. Establecer las posibles variables de medición en un vehículo autónoma no tripulado.
2. Analizar los sensores implementados actualmente en los vehículos autónomas no tripulados.
3. Presentar las diversas aplicaciones militares que ofrece un UAV.
4. Conocer las diferentes aplicaciones laborales que tiene un UAV.
5. Nombrar las tecnologías que implementan los vehículos autoguiados.

1. ESTADO DEL ARTE

1.1 GENERALIDADES

Un vehículo aéreo no tripulado (UAV) es una aeronave capaz de volar sin un piloto al mando a bordo, la cual es controlada a distancia y plenamente desde otro lugar (tierra u otra aeronave) o que ha sido programada y es plenamente autónoma.

El desarrollo exitoso de un vehículo aéreo autónomo requiere la solución de complejos problemas de ingeniería, como se muestra en [1]. En esos años iniciales de la robótica aérea un pequeño número de aquellos sistemas fue construido, principalmente en instituciones académicas, y sólo algunos de ellos pudieron mostrar capacidades básicas de vuelo como el vuelo estacionario y el vuelo lento a través de ciertos puntos. Después de estos avances importantes se ha tenido pequeños progresos en el mejoramiento de las capacidades de vuelo automático. La razón principal para esta limitación es la ausencia de un modelo preciso que pueda ser usado para el análisis y diseño del sistema de control de vuelo.

Estos aspectos de hardware y software ocuparon completamente el tiempo de los investigadores y fue una de las razones primarias para el lento y a menudo infructuoso desarrollo de los vehículos experimentales en los años 90. Hoy, estas dificultades continúan representando una dificultad; sin embargo, la situación está mejorando con la experiencia acumulada y el progreso continuo en la tecnología de los sensores y los computadores. Estos avances les permitirán a los investigadores enfocarse a nuevos tópicos (como la dinámica del vehículo, control avanzado de vuelo, guía) que son fundamentales en la creación de vehículos altamente competentes.

Un UAV tiene la posibilidad de realizar tareas sin la intervención humana, y su desarrollo tiene tres objetivos fundamentales, los cuales son:

- Protección de vidas humanas.
- Realización de tareas costosas o difíciles para el hombre.
- Defensa.

Las operaciones de vuelo de vehículos aéreos no tripulados, es un segmento creciente de los usuarios del espacio aéreo y comprenden tanto los UAV de defensa como aplicaciones civiles de la tecnología UAV. En algunas situaciones, se considera que la tecnología UAV es una solución de mejor relación de costo a eficacia que el uso de aviones o helicópteros convencionales, e incluso en algunas circunstancias, el uso de los UAV es sencillamente más seguro y puede también ser el único medio posible de realizar una tarea particular.

Implementar un vehículo aéreo de este tipo, trae consigo ciertas implicaciones de carácter tecnológico para las cuales se requiere de uso, adaptación y desarrollo de dichas tecnologías, junto con técnicas mas avanzadas.

Las áreas de desarrollo tecnológico que corresponden a la implementación básica de un UAV son:

- Sistemas de control.
- Telecomunicaciones.
- Sistemas de tiempo real.
- Sensórica y electrónica.
- Inteligencia artificial, toma de decisiones.
- Nuevos materiales.
- Visión artificial, reconocimiento de imágenes, evasión de obstáculos.

1.2 LOS UAV'S A NIVEL MUNDIAL

Hay una oferta creciente de vehículos aéreos no tripulados, para diferentes aplicaciones a nivel mundial, donde se destacan numerosas aeronaves no tripuladas. Las universidades han sido una fuente importante de investigación en esta área, en especial el caso del *GEORGIA TECH* y el *MIT* de EE.UU., quienes lideran los proyectos con helicópteros muy evolucionados tecnológicamente debido a la experiencia recopilada a lo largo de años de investigación.

Los helicóptero del Georgia Tech que vuelan autónomamente han superado el problema de la navegación en 3D, integrando tecnología de navegación satelital (GPS) con un sistema abordo inercial de navegación compuesto por acelerómetros y giróscopos. Este proceso de integración se realiza mediante una técnica de estimación estadística llamada Filtros de Kalman. Además se han probado algoritmos de control convencionales PID, y no convencionales (lógica Difusa y Redes Neuronales). La implementación de dichos algoritmos se hace sobre un Plataforma x86 y el sistema operativo de tiempo real que corre en este hardware es QNX 4.5. La técnica de Software-Enabled Control le permite al helicóptero contar con un software confiable y seguro.

El monitoreo del buen estado del helicóptero se realiza por medio de una Red Wave LAN basada en protocolo TCP/IP estándar 802.11. Los datos son transmitidos a una PC llamado Ground Station. Existe otra estación propuesta para el análisis de los datos transmitidos por una cámara digital a bordo del helicóptero, así como un enlace de radio frecuencia en la banda de UHF. Dadas las limitaciones para realizar pruebas sobre el prototipo se construyó un modelo con Realidad Virtual para hacer simulaciones del entorno en el cual se movería el helicóptero así como prueba de algoritmos de control. La revisión de la literatura muestra que la anterior descripción es la que han adoptado la mayoría de universidades para los prototipos documentados.

1.3 EL FUTURO

Es importante destacar que un UAV esta en capacidad de realizar dos clases de tareas, que son de tipo militar y de tipo laboral o civil, para las cuales se requiere de un completo control sobre tres variables de vital importancia, que son la posición, la dirección y la velocidad. El futuro de los vehículos aéreos no tripulados es dejar que la aeronave despegue sin la intervención absoluta del ser humano, y que además desempeñe su respectiva tarea.

Una de las tareas de mayor aplicación dentro de los UAV, ya sea militar o laboral es la de “vigilancia”, y para desempeñar ésta tarea, lo que realizan los UAV, es crear un mapa del terreno que los rodea y encontrar el objetivo, como se describe en [1]. Si alguna aeronave encuentra su objetivo, ésta información puede ser distribuida a otro UAV que este a una distancia cercana. La tendencia acerca de cómo se distribuye dicha información, es empleando “laser” o “enlaces de radio” para administrar la información que se maneja. Los UAV’s no solo son aeronaves que se limitan a realizar su tarea de manera individual, sino que en los últimos años han comenzado a ser vistos como un conjunto de sistemas de vuelo descentralizados con nodos aéreos. Si algún UAV se estrella, solo un nodo desaparece de la red aérea y casi toda su información permanece dentro de los otros UAV’s. En el futuro, los UAV’s podrán manejar cualquier tipo de carga útil, empleando diferentes tipos de sensores.

Para el campo militar, se tiene especial interés en el desarrollo de los UAV’s, ya que resultan de gran utilidad para propósitos de combate; por ejemplo, las bases militares requieren de personas para vigilar las cercas o vallas, y ésta es una tarea que puede realizar un UAV sin la necesidad de poner en riesgo la vida de los soldados.

2. SISTEMAS DE SENSORES Y NAVEGACION EMPLEADOS EN LOS UAV'S

2.1 PERSPECTIVA GENERAL

Un vehiculo automatizado necesita conocer la información exacta acerca de si mismo, como también acerca del medio que lo rodea, para desempeñar su labor de manera satisfactoria y así realizar sus objetivos planteados.

Los sistemas de sensores proveen la información que se necesita saber sobre el estado del vehiculo, los obstáculos y el medio que lo rodea. Para el caso de un vehiculo autónomo no tripulado, el sistema de sensores juega un papel crucial; sin un sistema de sensores confiable y rápido, no es posible construir un vehiculo autónomo no tripulado. Los sistemas de sensores se pueden dividir en dos categorías básicas:

- Los sensores no visuales
- Los sensores visuales

Según se detalla en [4], los sensores visuales utilizan cámaras para capturar la luz reflejada desde los objetos, mientras que los sensores no visuales hacen uso de los cambios en las cantidades físicas para realizar la medición. Los de visión son probablemente los sensores externos más importantes, los cuales se usan para mediciones de rango, así como también para inspección.

Los sensores también pueden ser clasificados en otras subcategorías como:

- Sensores internos: se encargan de suministrar la información interna del vehículo.
- Sensores externos: se encargan de suministrar la información acerca del medio que rodea al vehículo.

Un sensor es pasivo si recibe energía para poder sensor, y es activo cuando necesita enviar energía para sensor (Ej: sonar).

Los sensores también pueden clasificarse de acuerdo a los datos retroalimentados:

- Sensores de rango: suministran información acerca del alcance entre objetos.
- Sensores de posición absoluta
- Sensores de ambiente: Ej.-termómetros
- Sensores inerciales: Ej.-acelerómetros

A la hora de seleccionar un sensor, se deben tener en cuenta ciertas características. La selección del sensor depende de los siguientes factores:

- Tarea a desempeñar.
- El entorno en el cual se va trabajar.
- Poder de computación.
- Requerimientos de energía.
- Costo.

A través de los sensores, en un vehículo aéreo no tripulado se pueden detectar los parámetros internos de la aeronave como la altura, velocidad, aceleración y orientación. Estos parámetros se pueden medir por medio de un INS que está compuesto de acelerómetros y giroscopios. La posición absoluta del vehículo con respecto a las coordenadas mundiales, pueden medirse con un sistema GPS.

Para la detección de la posición relativa o alguna otra característica especial, es necesario implementar sensores visuales.

De acuerdo con [4], a continuación se describen los diferentes tipos de sensores empleados en los sistemas de navegación y sensorica de los UAV's, tanto visuales como no visuales.

2.1.1 Sensores No Visuales

Acelerómetros

Un acelerómetro es el encargado de sensar la aceleración lineal. Consiste en una masa montada en resorte, la cual se mueve junto con la aceleración a debido a la segunda ley de Newton $F=m*a$. El resorte se extiende también de acuerdo a la aceleración, debido a la ley ideal del resorte, $F=k*x^2$. Un simple potenciómetro se puede usar para sensar dicha extensión y así observar la aceleración.

Un acelerómetro solo puede sensar la aceleración a lo largo de en una dirección, y dicha aceleración estará dada por: $a = \frac{kx^2}{m}$, donde a es la aceleración, k es la constante del resorte, y m es la masa adherida al resorte.

Giroscopios

El giróscopo o giroscopio, constituye una parte muy importante en los sistemas de navegación automática utilizados hoy en día. Todo giróscopo presenta dos propiedades principales, la rigidez giroscópica y la precesión. Aunque desde el punto de vista físico es un aparato muy interesante de analizar, lo verdaderamente destacable es su aplicación a los instrumentos de navegación. Una de sus utilidades más frecuentes es como elemento principal del girocompás. La acción directora en estos instrumentos la ejerce un giróscopo con dos grados de libertad y amortiguamiento, para obtener así la indicación del norte verdadero.

El gir6scopo consta de tres grados de libertad est1 constituido por un toro o rotor, montado sobre los cojinetes que se apoyan sobre un anillo horizontal, capaz de inclinarse alrededor de los cojinetes, y 6stos est1n a su vez colocados sobre un anillo vertical capaz de girar en acimut alrededor de los cojinetes. De esta forma resultan los tres movimientos: de giro del rotor alrededor de su eje; de inclinaci6n del eje rotor alrededor de los cojinetes; de giro en acimut del eje del rotor alrededor de los cojinetes, correspondiente a los tres grados de libertad. Este conjunto es perfectamente sim6trico, de modo que puede ser equilibrado respecto a cualquiera de los ejes de giro, y cuando lo est1, recibe el nombre de gir6scopo libre. Las propiedades del giroscopio son la rigidez giroscopica y la precisi6n.

La rigidez girosc6pica en el espacio de un gir6scopo es consecuencia de la primera ley del movimiento de Newton, que afirma que un cuerpo tiende a continuar en su estado de reposo o movimiento uniforme si no est1 sometido a fuerzas externas. Un ejemplo es una bala de fusil, que —al girar en torno a su eje durante el vuelo— presenta inercia girosc6pica, y tiende a mantener una trayectoria m1s recta que si no girara. La mejor forma de mostrar la rigidez en el espacio es mediante un modelo de gir6scopo formado por un volante montado sobre anillos de forma que el eje del volante pueda adoptar cualquier 1ngulo en el espacio. Por mucho que se mueva, incline o ladee el gir6scopo, el volante mantendr1 su plano de rotaci6n original mientras siga girando con suficiente velocidad para superar el rozamiento de los rodamientos sobre los que va montado. La rigidez se manifiesta por el hecho de que, una vez comunicada al rotor una r1pida rotaci6n, su eje conservar1 siempre la direcci6n primitiva, cualquiera que sea el movimiento que se le d6 a su pedestal. Esto tambi6n es cierto con el rotor parado, pero s6lo en el caso te6rico de que no existan rozamientos. En el caso de estar muy vertical el eje del gir6scopo, esta rigidez desaparece y el eje del rotor vacila y cambia de direcci6n, siendo esto debido a que la casi coincidencia de los ejes de giro, el cual anula uno de sus tres grados de libertad. La rigidez girosc6pica es directamente proporcional a la velocidad de giro del rotor. Y la precesi6n girosc6pica aparece cuando a uno de los anillos,

horizontal o vertical, se le aplica un par perturbador. Hay que tener en cuenta que un par da lugar a un giro, y que este par se representa por un vector normal al plano en que se aplican las fuerzas del paro, lo que es lo mismo, a aquel en que tiene lugar el giro. El extremo del vector par está situado en el lado desde el cual se ve el giro en sentido dextrogiro. El movimiento de precesión se puede definir como aquel que tiende a llevar el vector que representa el giro del rotor a coincidir con el que representa el par perturbador. En un giróscopo, el par perturbador, aplicado sobre los cojinetes, produce una precesión del extremo del eje del rotor, hacia abajo. El valor de la precesión es directamente proporcional al valor del par perturbador e inversamente proporcional a la velocidad de giro del rotor.

Un giroscopio se caracteriza por su Movimiento, un giróscopo o peonza simétrica, cuyo eje de rotación varía de dirección. En general estos movimientos son muy complicados. La figura 1 se muestra un sistema de este tipo compuesto de una rueda de bicicleta que está libre para girar sobre un eje que pivota en un punto situado a una distancia D del centro de la rueda pero que es libre para girar en cualquier dirección.

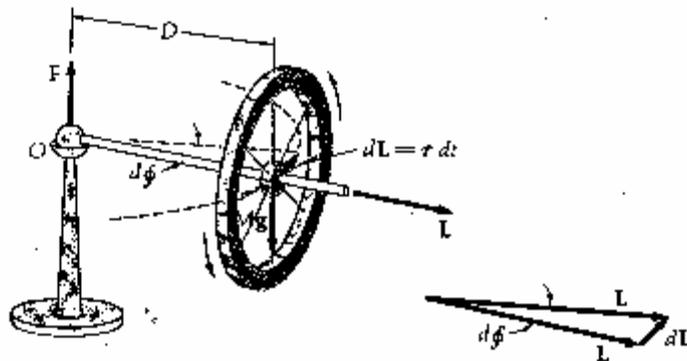


Figura 1. Giróscopo o peonza simétrica

Cuando se mantiene el eje horizontal y se deja libre, si la rueda no está girando, cae simplemente. El momento respecto al punto O es MgD en la dirección y sentido indicados en el diagrama de la figura. Al caer la rueda, su momento cinético debido al movimiento del centro de masas está dirigido hacia el papel.

Como el centro de masas acelera hacia abajo, la fuerza hacia arriba F ejercida por el soporte en O es evidentemente inferior a Mg .

Admitamos ahora que la rueda está girando. El momento cinético respecto al punto O es el momento cinético respecto al centro de masas, en este caso el momento de spin, más el momento cinético debido al movimiento del centro de masas. En la práctica es muy sencillo hacer que el momento cinético de spin sea muy grande de modo que en primera aproximación podamos despreciar la contribución debida al movimiento del centro de masas. A partir de la figura anterior vemos que el momento es perpendicular al momento cinético. Con objeto de que el momento cinético varíe en la dirección y sentido del momento, el eje debe moverse en el plano horizontal, según está indicado. En el tiempo dt , la variación del momento cinético tiene el valor $dL = \delta dt = MgD dt$.

El ángulo ϕ a través del cual se mueve el eje es $d\phi = dL / L = MgD dt / L$.

El movimiento del eje se denomina *precesión*. La velocidad angular de precesión

$$\text{es } \omega_p = \frac{d\phi}{dt} = \frac{MgD}{L}.$$

Como el centro de masas no cae, el punto soporte evidentemente ejerce una fuerza hacia arriba igual a Mg .

Si el eje no está horizontal sino que forma un ángulo θ con la vertical, como se ve en siguiente figura, el momento de la fuerza exterior respecto al punto O es $MgD \sin \theta$. El ángulo de precesión en el tiempo dt es ahora

$$d\theta = \frac{dL}{L \sin \theta} = \frac{MgD \sin \theta}{L \sin \theta} dt = \frac{MgD}{L} dt$$

La velocidad angular de precesión ω_p , es por tanto independiente del ángulo θ .

Una observación cuidadosa del movimiento de un giróscopo revela que si se mantiene horizontal el eje y se deja libre desde el reposo, el movimiento del eje no queda confinado en el plano horizontal. Al principio desciende un poco y al seguir su movimiento de precesión el giróscopo, existe una pequeña oscilación vertical denominada *nutación*.

Brújula o Compás

El compás o brújula se usa para sensar el campo magnético de la tierra para determinar la dirección al polo norte.

INU (unidad de navegación inercial)

INU o INS, es una combinación de múltiples giroscopios, acelerómetros y compás. Dicha combinación de múltiples sensores se implementa para superar las limitaciones de un sensor individual. Muchas aeronaves y helicópteros constan de sistemas INU para observar la orientación, velocidad y aceleración del vehículo.

GPS (sistema de posicionamiento global)

Un GPS es un sistema para la detección de la velocidad y la posición absoluta, el cual utiliza 24 satélites y el tiempo de recorrido de señales de al menos 5 de estos satélites. La resolución de un solo receptor GPS es de 30-100m. Usualmente se utiliza una combinación de varios sistemas GPS localizados en el sistema terrestre, y uno en el vehículo aéreo, para de esta forma se reduzca el error (GPS diferencial). Existen algunos sensores que están próximos al GPS, como son el caso de los sensores de *sonar* y los sensores *infrarrojos*, los cuales detectan cualquier objeto cercano sin necesidad de contacto físico.

Sensores de Sonar

Los sensores de sonar utilizan señales acústicas para medir la distancia entre el sensor y el obstáculo. El tiempo de recorrido esta relacionado con la distancia por medio de: $d = 0.5ct$, donde c es la velocidad del sonido en el aire y t es el tiempo de retardo. Para algunos UAV's los sensores de sonar son usados para estimar la altitud del vehículo.

Sensores Infrarrojos

Los sensores infrarrojos transmiten un pulso infrarrojo midiendo el tiempo que tarda dicho pulso en regresar, para de esta manera determinar la distancia. Este tipo de sensor trabaja a menor rango en comparación con el sensor de sonar.

2.1.2 Sensores Visuales

Los sensores visuales utilizan cámaras como la mostrada en la foto para capturar imágenes. Una de las características más importantes de los sistemas de visión es que, a diferencia de otros sensores, son capaces de capturar una representación de la escena, la cual contiene información diversa que no es posible obtener con cualquier otro tipo de sensor. Cabe destacar que, los sensores visuales son pasivos.

Los sensores visuales usan un dispositivo de carga acoplado (CCD) y la salida de este dispositivo es digitalizada para formar la imagen digital. Este sistema es preferible a otros sensores, ya que la cámara y el hardware resultan de bajo costo, y la instalación, así como la calibración son simples. La desventaja de los sensores visuales es el tiempo de medición, debido a que el tiempo necesario para capturar, digitalizar y procesar la imagen es mucho más largo que en otros sensores.



FOTO 1. Sensor Visual, Cámara

Los sensores visuales están compuestos de:

- Procesamiento de imagen.
- Rastreo de características.

2.1.3 Tipos De Sensores Básicos

Si un vehículo aéreo no tripulado necesita un aumento en la estabilidad en su control de vuelo, sus algoritmos de control de vuelo necesitan la información acerca de su estado. Dependiendo del tipo de vehículo y su misión a desempeñar, estos requerimientos varían.

Según se explica en [5], para un sistema de navegación se requieren básicamente tres tipos de sensores que son:

- Sensores de orientación (Attitude Sensors).
- Sensores de posicionamiento.
- Sensores de altitud.

2.1.3.1 Sensores de Orientación (Attitude Sensors)

Para el caso en que un vehículo aéreo sea inestable en su sobrevuelo, es necesario conocer la información acerca de la orientación para que el bucle interno del controlador de vuelo estabilice el vehículo.

En relación con [5], los sensores de orientación más comunes están basados en giroscopios, que pueden ser mecánicos, piezoeléctricos u ópticos. Una plataforma giroscópica de tres ejes mide una tasa angular a lo largo de los ejes del vehículo y es contenida en una unidad de medida inercial (IMU - Inertial Measurement Unit), la cual suministra acelerómetros que pueden ser usados para estimar la posición. La posición y orientación, pueden ser integradas por medio de un IMU. Una alternativa para un IMU o giroscopios individuales, es emplear un sistema autónomo de direccionamiento y referencia (AHRS) el cual puede directamente entregar información acerca de la orientación del vehículo, suprimiendo el error creciente.

Ahora bien, como elemento de apoyo existen los magnetómetros, los cuales pueden usarse para determinar la posición del vehículo, por medio de la medición del campo magnético de la tierra. La ambigüedad se convierte en un problema en este tipo de sensor, ya que existe un eje de posición ambiguo paralelo con las líneas de flujo del campo magnético terrestre. Así mismo, la proximidad a campos magnéticos inducidos por corrientes y cuerpos magnéticos disminuyen la exactitud. Mientras fácilmente son aplicados como referencia de dirección para filtros de navegación en unidades AHRS o sistemas de navegación personalizados, también puede entregar información acerca de otros ejes.

Además de los sensores inerciales y magnéticos, los cuales se encuentran en muchos sistemas de orientación, aproximaciones menos comunes están disponibles para los UAV's. La orientación en vuelo de los vehículos aéreos no

tripulados como los helicópteros ha aumentado satisfactoriamente gracias a un sistema basado en GPS, el cual utiliza múltiples antenas para estimar la posición y orientación del vehículo. Se puede contar con indicadores de posición visuales para escanear el horizonte y así mantener el nivel de una aeronave a un terreno permitido.

2.1.3.2 Sensores de Posicionamiento

Resulta básico para un sistema de navegación determinar la posición del vehículo con respecto a un punto conocido. Los métodos de navegación basados en radio que son utilizados en la navegación tripulada se basan usualmente en señales terrestres omni-direccionales y no direccionales, y en la medición de distancias. La alta exactitud, simplicidad y disponibilidad del sistema de posicionamiento global (GPS), hace posible que emerjan sistemas de posicionamiento estándares para aeronaves no tripuladas, tanto para aviación general como comercial.

De acuerdo a [5], conforme la mayoría de los UAV's utilizan GPS como el sensor principal de navegación, se debe enfocar más en las limitaciones que tiene dicho sensor y como usarlo de la mejor manera posible. Mientras la operación GPS de único punto sea aceptable para muchas aplicaciones, el uso de correcciones diferenciales de un segundo receptor GPS es ocasionalmente requerido para errores atmosféricos y semejantes. Las exactitudes alcanzables en modo diferencial están aproximadamente dentro de los 3 pies o mejor, si las fases de la portadora de las señales GPS son analizadas. Es importante señalar que un sistema GPS diferencial siempre necesita de algún tipo de enlace de datos para así poder recibir datos corregidos de la estación de referencia. Un vehículo simple equipado con GPS puede técnicamente operar totalmente autónomo (excepto el satélite GPS) sin la necesidad de ningún enlace.

2.1.3.3 Sensores de Altitud

Los sensores de altitud son los encargados medir con respecto al nivel del mar (MSL) o el terreno local (AGL), conforme se muestra en [5]. El tipo de datos que se necesita para controlar la altitud de la aeronave depende del tipo de vehiculo y de los modos de operación, así como la ubicación de dicha operación. Las operaciones que se efectúan próximas a tierra como son el caso del aterrizaje, usualmente requieren medición absoluta del AGL o de una base de datos muy exacta del terreno.

Dentro de los sensores disponibles se encuentran:

- Sonar (AGL)
- Radar (AGL)
- Laser/Lidar (AGL)
- GPS (MSL)
- Sensores Barométricos (MSL)

2.2 SISTEMA DE NAVEGACIÓN INTEGRADO GPS/INS

La precisión en la navegación con el sistema de posicionamiento global (GPS) ha progresado ampliamente, encontrándose en el rango de metros a centímetros, dependiendo del tipo de observaciones y métodos para su procesamiento utilizados. El entorno operacional del sistema de navegación juega un papel importante en la calidad de las medidas obtenidas, debido a que se necesita mantener en línea de vista los satélites que tiene enganchados el receptor GPS, y bajo condiciones adversas, existen dificultades en el seguimiento de los satélites, introduciendo errores de medida que pueden sesgar los parámetros estimados, comprometiendo la integridad del sistema.

Por su parte, las unidades de medidas inerciales (IMUs) son instrumentos completamente autónomos que registran las aceleraciones y velocidades de rotación de un cuerpo, relativos a un frame de referencia inercial. A partir de las velocidades de rotación se obtienen los cambios de orientación que permitirán transformar las medidas de los acelerómetros al frame de navegación deseado e integrarlas para obtener la velocidad y la posición. Pero las imprecisiones de los sensores, principalmente sesgos y derivas, causan una degradación del posicionamiento inercial. Por lo tanto, es necesario proporcionar actualizaciones regulares para limitar el error a un nivel aceptable.

Dada la naturaleza complementaria del GPS y de las IMU's, su integración representa la mejor opción para incrementar la disponibilidad y precisión de la solución de navegación de acuerdo a [6], que dependerá de la arquitectura utilizada para la integración, siendo los principales: *loosely coupled*, *tightly coupled* y *ultra-tightly coupled* (o *deep*).

2.2.1 Fundamentación de GPS

El sistema GPS ofrece un servicio de posicionamiento preciso (PPS) para usuarios autorizados, pero también proporciona el servicio de posicionamiento estándar (SPS) menos preciso para usuarios civiles. Teóricamente, este último posee precisiones de 13 metros horizontales y 22 metros verticales con un 95% de confiabilidad.

El principio funcional del GPS se basa en medir el tiempo empleado por la señal transmitida por los satélites en llegar al receptor del usuario, y este intervalo de tiempo es multiplicado por la velocidad de la luz para obtener la distancia satélite receptor. Para ello, se puede utilizar cualquiera de los tres tipos de observables GPS: pseudodistancia, fase de portadora y Doppler. En el primero, el tiempo de

propagación de la señal se mide correlando la secuencia PRN generada localmente en el receptor con la recibida del satélite. Se denomina pseudodistancia por los errores presentes en la medida.

La fase de portadora es un método más preciso de obtener la pseudodistancia, con errores más pequeños que el método anterior. Este observable es la diferencia de la fase de portadora que le llega al receptor con la generada internamente, existiendo un número ambiguo de ciclos que hay que resolver para poder utilizar este método.

Las medidas Doppler representan la velocidad de cambio de la frecuencia observada de la señal de los satélites, producto del movimiento relativo satélite-receptor. Se utiliza generalmente para derivar la velocidad del receptor.

Matemáticamente, los tres observables se representan como:

$$\begin{aligned} p_r^s &= \rho_r^s + c(\delta t^s - \delta t_r) + I_r^s + T_r^s + M_r^s + \epsilon_p \\ \phi_r^s &= \rho_r^s + c(\delta t^s - \delta t_r) + \lambda N_r^s - I_r^s + T_r^s + M_r^s + \epsilon_\phi \\ \dot{\phi}_r^s &= \dot{\rho}_r^s + c(\delta \dot{t}^s - \delta \dot{t}_r) - \dot{I}_r^s + \dot{T}_r^s + \dot{M}_r^s + \dot{\epsilon}_\phi \end{aligned}$$

donde ρ_r^s es la distancia geométrica real, δt^s y δt_r son los offsets de los relojes del satélite y del receptor respectivamente, c es la velocidad de la luz, λ es la longitud de onda y N_r^s es el número entero de ciclos (ambigüedad). El resto de términos son los errores que afectan a las medidas y se explican brevemente a continuación.

Errores

Las principales fuentes de error que afectan a los observables son:

- Los errores orbitales: Provocados por la variación lenta de la posición de los satélites

- retardo ionosférico (I_r^s): Provocado por los electrones libres en la atmósfera originando que el código se retrase mientras que la fase se adelante en la misma cantidad de tiempo.
- Retardo troposférico (T_r^s): Provocado por gases secos y vapor de agua en la atmósfera.
- Ruido del receptor (ϵ).
- Multicamino (M_r^s).

Para paliar estos errores, se han desarrollado distintos métodos, siendo el más utilizado el GPS diferencial (DGPS). Sin embargo, el principal inconveniente de GPS es la pérdida de línea de vista satélite-receptor, sobre todo en zonas urbanas (cañón urbano), razón por la que es necesario aumentarlo con otros sistemas de apoyo.

2.2.2 Fundamentación de INS

La navegación inercial se basa en el posicionamiento relativo a partir de la integración de las aceleraciones registradas por los acelerómetros, utilizando las velocidades angulares de los giróscopos para determinar la dirección del recorrido. Al conjunto de sensores inerciales se le conoce como IMU (unidad de medición inercial) que, junto con las ecuaciones de mecanización, conforman un sistema de navegación inercial (INS). Generalmente los sistemas inerciales se clasifican en:

- *Gimbal*. Aquellos que mantienen los ejes de los sensores coincidiendo con un frame de interés, que puede ser un frame inercial (*space-stabilized system*), o un frame local (*local-level system*). La ventaja de este tipo de sistemas es que no necesitan la transformación de coordenadas, resultando relativamente sencillo el cálculo de la solución de navegación.

- *Strapdown*. Los sensores son solidarios con el vehículo, midiendo las velocidades angulares y las fuerzas específicas a lo largo de los ejes del frame del mismo. Para obtener la solución de navegación se necesita calcular la orientación (*attitude*) del vehículo para transformar las fuerzas específicas al frame de navegación deseado.

Debido a los errores en los sensores, sobre todo si se utiliza un sistema *strapdown*, las medidas de los sensores deben ser compensadas. En el caso de los giróscopos para corregir la deriva de las medidas angulares respecto al espacio inercial, utilizando:

$$w_{ib}^b = \tilde{w}_{ib}^b - d_{ib}^b$$

siendo \tilde{w}_{ib}^b la salida de los giroscopios y d_{ib}^b su derivada.

Corregidas las velocidades angulares, se utilizan para calcular la matriz de transformación entre los frames del vehículo y el de navegación (R_b^n), necesaria para transformar las medidas de los acelerómetros (\tilde{f}^b). Estas últimas también deberán corregirse para eliminar el sesgo de los acelerómetros (b^b).

$$f^b = \tilde{f}^b - b^b$$

Aquí, f^b además de la aceleración del vehículo, contiene:

- $G(r)$, la aceleración gravitacional provocada por el campo gravitacional terrestre y está en función de la posición.
- $\Omega_{ie} \Omega_{ie} r$, la aceleración centrífuga, provocada por la rotación terrestre.
- $\Omega_{ie} v$, la aceleración Coriolis, también provocada por la rotación terrestre.

Como sólo interesa la aceleración del vehículo, el resto de aceleraciones deben eliminarse. Una vez obtenidas las aceleraciones lineales, se integran para obtener la velocidad y la posición en el frame de interés. La figura siguiente representa el

procedimiento general para obtener la solución inercial, y matemáticamente se representa por medio de las ecuaciones que se muestran debajo de dicha figura.

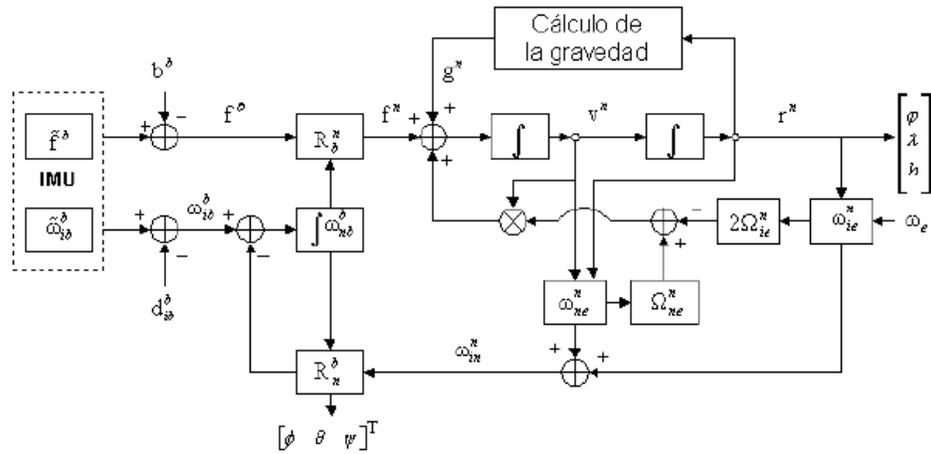


Figura 2. Diagrama General de la Solución Inercial

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}}^n \\ \dot{\mathbf{v}}^n \\ \dot{\mathbf{R}}_b^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}\mathbf{v}^n \\ \mathbf{R}_b^n \mathbf{f}^b + (\Omega_{ne}^n - 2\Omega_{ie}^n)\mathbf{v}^n + \mathbf{g}^n \\ \mathbf{R}_b^n \Omega_{nb}^b \end{bmatrix}$$

donde $\mathbf{r}^n = [\phi \ \lambda \ h]^T$ es el vector posición, $\mathbf{v}^n = [v_N \ v_E \ v_D]^T$ es el vector velocidad y \mathbf{g}^n representa el vector de gravedad local. La matriz \mathbf{M} para el caso de escoger el frame de navegación local, está definida por la siguiente ecuación:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{\phi+h}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{(R_{\lambda+h}) \cos(\phi)} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

y la siguiente ecuación define Ω_{nb}^b :

$$\Omega_{nb}^b = \Omega_{ib}^b - \mathbf{R}_n^b (\Omega_{ie}^n + \Omega_{ne}^n)$$

siendo R_ϕ y R_λ los radios terrestres en la latitud y longitud dadas respectivamente.

Fuentes de Error

De las principales fuentes de error que degradan la solución inercial, analizaremos sólo los sesgos y las derivas de los sensores. Dichas variaciones se pueden modelar por procesos Gauss-Markov o como ruido blanco, escogiendo la segunda opción para modelar los errores de los sensores.

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{d}} &= \mathbf{0} \\ \dot{\mathbf{b}} &= \mathbf{0}\end{aligned}$$

2.2.3 Integración GPS/INS

Antes de hablar sobre como se realiza la integración y de las configuraciones existentes, es necesario explicar en que consiste y como trabaja el “filtro de Kalman”, el cual constituye la herramienta principal para efectuar la integración del GPS con el INS.

2.2.3.1 El Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un conjunto de ecuaciones matemáticas que proveen una solución recursiva eficiente del método de mínimos cuadrados. Esta solución permite calcular un estimador lineal, insesgado y óptimo del estado de un proceso en cada momento del tiempo con base en la información disponible en el momento $t-1$, y actualizar, con la información adicional disponible en el momento t , dichas

estimaciones. Este filtro es el principal algoritmo para estimar sistemas dinámicos especificados en la forma de estado-espacio.

El filtro es un procedimiento matemático que opera por medio de un mecanismo de predicción y corrección. En esencia este algoritmo pronostica el nuevo estado a partir de su estimación previa añadiendo un término de corrección proporcional al error de predicción, de tal forma que este último es minimizado estadísticamente.

El procedimiento de estimación completo es el siguiente: el modelo es formulado en estado espacio y para un conjunto inicial de parámetros dados, los errores de predicción del modelo son generados por el filtro. Estos son utilizados para evaluar recursivamente la función de verosimilitud hasta maximizarla.

El Algoritmo Discreto Del Filtro De Kalman

El filtro se desempeña suponiendo que el sistema puede ser descrito a través de un modelo lineal, en donde el error asociado tanto al sistema como a la información adicional que se incorpora en el mismo tiene una distribución normal con media cero y varianza determinada. La solución es óptima por cuanto el filtro combina toda la información observada y el conocimiento previo acerca del comportamiento del sistema para producir una estimación del estado de tal manera que el error es minimizado estadísticamente. Para proveer la solución final o recursiva anteriormente mencionada, el filtro recalcula la solución cada vez que una nueva observación o medida es incorporada en el sistema.

El filtro de Kalman es el principal algoritmo para estimar sistemas dinámicos representados en la forma de estado-espacio En esta representación el sistema es descrito por un conjunto de variables denominadas de estado. El estado contiene toda la información relativa al sistema a un cierto punto en el tiempo. Esta

información debe permitir la inferencia del comportamiento pasado del sistema, con el objetivo de predecir su comportamiento futuro.

Lo que hace al filtro tan interesante es precisamente su habilidad para predecir el estado de un sistema en el pasado, presente y futuro, aún cuando la naturaleza precisa del sistema modelado es desconocida. En la práctica, las variables estado individuales de un sistema dinámico no pueden ser exactamente determinadas por una medición directa. Dado lo anterior, su medición se realiza por medio de procesos estocásticos que involucran algún grado de incertidumbre en la medición.

El Proceso para la Estimación

El filtro de Kalman tiene como objetivo resolver el problema general de estimar el estado $X \in \mathfrak{R}^n$ de un proceso controlado en tiempo discreto, el cual es dominado por una ecuación lineal en diferencia estocástica de la siguiente forma:

$$X_t = AX_{t-1} + w_{t-1}$$

con una medida $Z \in \mathfrak{R}^n$, que es

$$Z_t = HX_t + v_t$$

Las variables aleatorias w_t y v_t representan el error del proceso y de la medida respectivamente. Se asume que son independientes entre ellas, que son ruido blanco y con distribución de probabilidad normal:

$$p(w) \cong N(0, Q)$$

$$p(v) \cong N(0, R)$$

En la práctica las matrices de covarianza de la perturbación del proceso, Q , y de la perturbación de la medida, R , podrían cambiar en el tiempo, por simplicidad en general se asumen que son constantes.

La matriz A se asume de una dimensión $n \times n$ y relaciona el estado en el periodo previo $t-1$ con el estado en el momento t . La matriz H de dimensión $m \times n$ relaciona el estado con la medición Z_t . Estas matrices pueden cambiar en el tiempo, pero en general se asumen como constantes.

El Algoritmo

El filtro de Kalman estima el proceso anterior utilizando una especie de control de retroalimentación, esto es, estima el proceso a algún momento en el tiempo y entonces obtiene la retroalimentación por medio de los datos observados.

Desde este punto de vista las ecuaciones que se utilizan para derivar el filtro de Kalman se pueden dividir en dos grupos: las que actualizan el tiempo o ecuaciones de predicción y las que actualizan los datos observados o ecuaciones de actualización. Las del primer grupo son responsables de la proyección del estado al momento t tomando como referencia el estado en el momento $t-1$ y de la actualización intermedia de la matriz de covarianza del estado. El segundo grupo de ecuaciones son responsables de la retroalimentación, es decir, incorporan nueva información dentro de la estimación anterior con lo cual se llega a una estimación mejorada del estado.

Las ecuaciones que actualizan el tiempo pueden también ser pensadas como ecuaciones de pronóstico, mientras que las ecuaciones que incorporan nueva información pueden considerarse como ecuaciones de corrección. Efectivamente, el algoritmo de estimación final puede definirse como un algoritmo de pronóstico-corrección para resolver numerosos problemas. Así el filtro de Kalman funciona por medio de un mecanismo de proyección y corrección al pronosticar el nuevo estado y su incertidumbre y corregir la proyección con la nueva medida. El ciclo de trabajo se muestra en la figura siguiente.

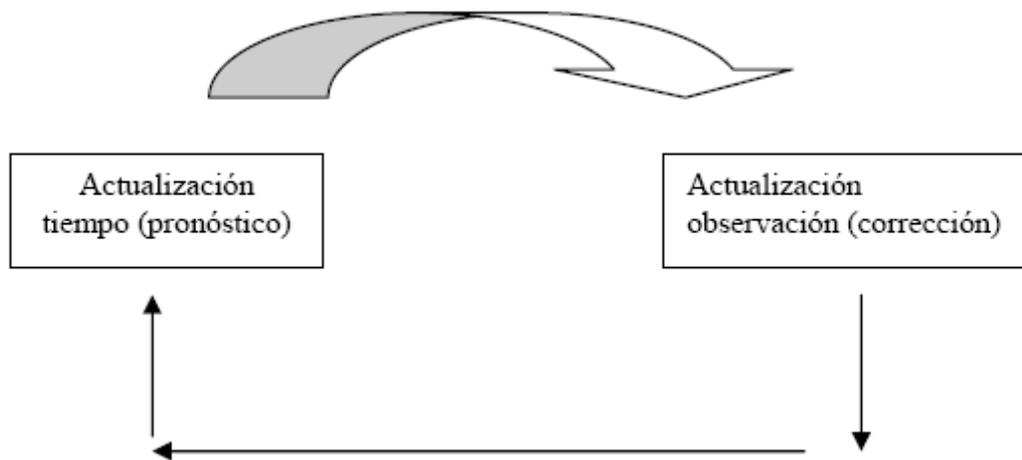


Figura 3. Ciclo de trabajo del filtro de Kalman

El primer paso consiste en generar un pronóstico del estado hacia adelante en el tiempo tomando en cuenta toda la información disponible en ese momento y en un segundo paso, se genera un pronóstico mejorado del estado, de tal manera que el error es minimizado estadísticamente.

Las ecuaciones de pronóstico del filtro de kalman son las siguientes:

$$\hat{X}_t^* = A\hat{X}_{t-1}$$

$$P_t^* = AP_{t-1}A^T + Q$$

Estas ecuaciones pronostican las estimaciones del estado y la covarianza hacia delante desde t-1 a t. La matriz A relaciona el estado en el momento previo t-1 con el estado al momento actual t, esta matriz podría cambiar para los diferentes momentos en el tiempo (t). Q representa la covarianza de la perturbación aleatoria del proceso que trata de estimar el estado.

Y las ecuaciones de corrección del Filtro de Kalman discreto son:

$$\begin{aligned}K_t &= P_t^* H^T (HP_t^* H^T + R)^{-1} \\ \hat{X}_t &= \hat{X}_t^* + K_t (Z_t - H\hat{X}_t^*) \\ P_t &= (I - K_t H) P_t^*\end{aligned}$$

La primera tarea en el proceso de corrección de la proyección del estado es el cálculo de la ganancia de Kalman, K_t mediante la primera de las tres ecuaciones de corrección. Este factor de ponderación o ganancia es seleccionado de tal forma que minimice la covarianza del error de la nueva estimación del estado. El siguiente paso es realmente medir el proceso para obtener Z_t y entonces generar una nueva estimación del estado que incorpora la nueva observación como se muestra en la segunda de las tres ecuaciones de corrección. El paso final es obtener una nueva estimación de la covarianza del error mediante la tercera ecuación.

Después de cada par de actualizaciones, tanto del tiempo como de la medida, el proceso es repetido tomando como punto de partida las nuevas estimaciones del estado y de la covarianza del error. Esta naturaleza recursiva es una de las características llamativas del filtro de Kalman.

La siguiente figura muestra de una manera más completa el ciclo de trabajo del filtro de Kalman, incluyendo las ecuaciones de pronóstico y corrección.

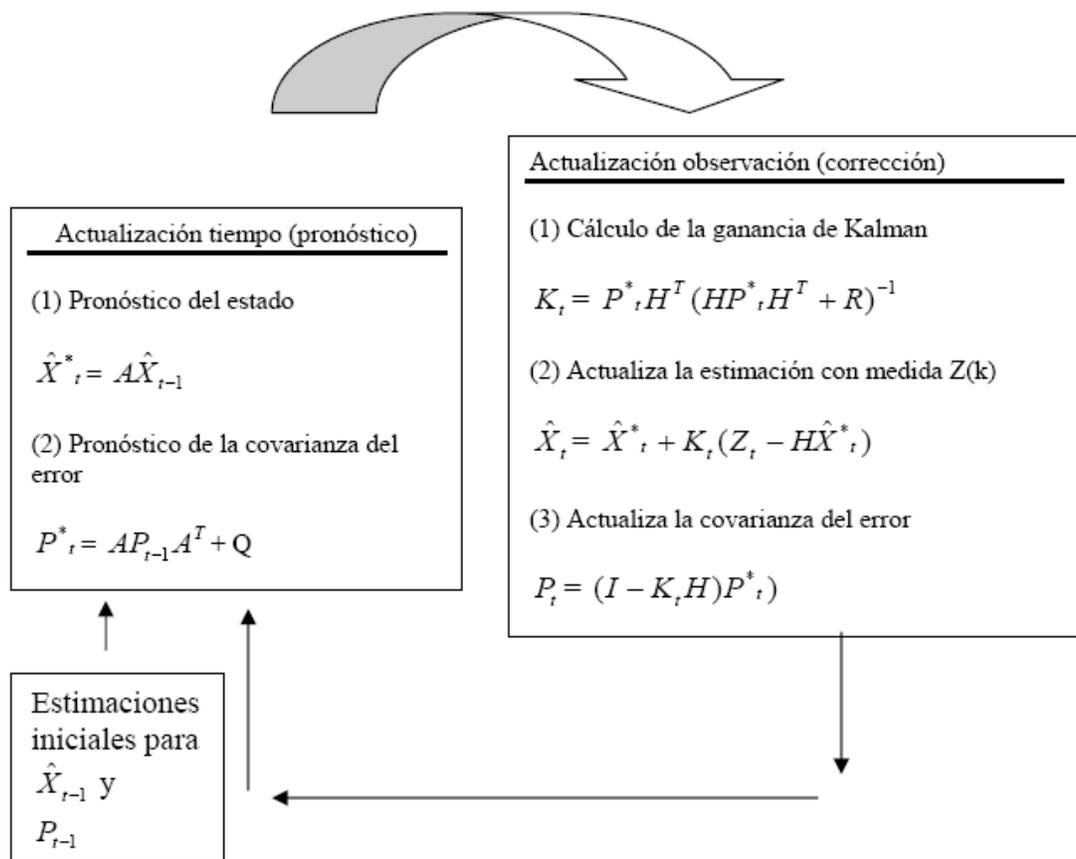


Figura 4. Ciclo de trabajo del filtro de Kalman con ecuaciones

2.2.3.2 Métodos Utilizados para la Integración de GPS/INS

Un receptor GPS se utiliza para determinar la posición y velocidad de salida de la aeronave. La medición está sujeta a ruido por el tiempo de retardo y a interferencias. Sin embargo, la medición de la velocidad y posición no presentan desviaciones a durante largos periodos de tiempo.

A su vez, una unidad de medición inercial (IMU) se emplea para saber las aceleraciones y las tazas angulares de salida de la aeronave, las cuales se

integran en un sistema de navegación inercial (INS) y de ésta manera obtener la posición, velocidad y orientación de la aeronave. Las mediciones hechas por la IMU están sujetas a ruido, factores escalares y variaciones en la temperatura.

Las ventajas y desventajas de los sistemas de sensores INS y GPS, los hacen complementarios entre sí, y es por ésta razón que al combinar las mediciones realizadas por ambos, tanto GPS como INS, se obtiene la mejor estimación de la posición, velocidad y orientación de la aeronave. La integración se realiza por medio de una técnica de modelamiento llamada “Filtros de Kalman”, en la cual se pueden utilizar dos tipos de filtros que son el complementario o el extendido.

Filtro de Kalman Complementario (CKF)

La implementación del filtro de kalman complementario (CKF) como método de integración, utiliza un algoritmo INS para obtener el valor calculado de posición y velocidad (PV – posición y velocidad), los cuales son comparados con la salida PV de un GPS y así obtener una señal de error. Dicha señal de error constituye la entrada a un filtro de kalman lineal que se encarga de estimar los errores del INS en cuanto a posición, velocidad y orientación, y además calcula la desviación de los sensores del IMU. Todos estos cálculos de errores son usados para corregir las salidas PVA (posición, velocidad y orientación) y las entradas de IMU al algoritmo INS.

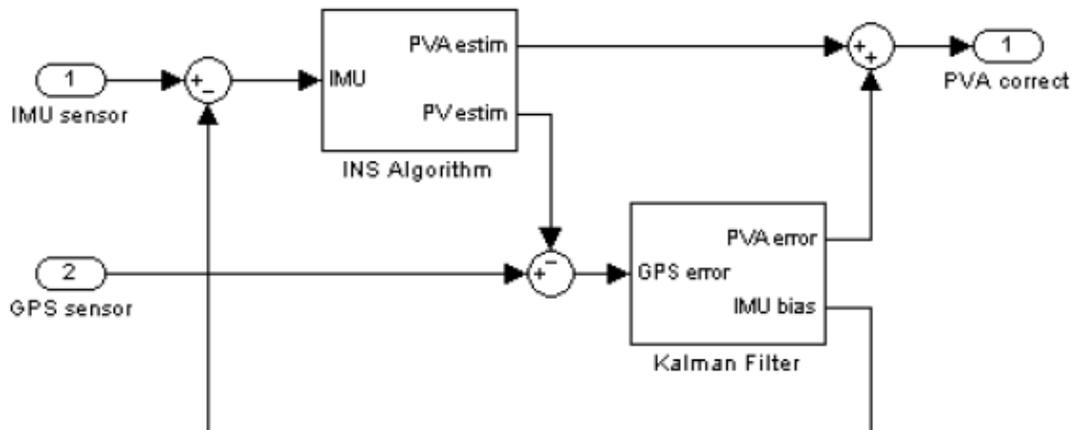


Figura 5. Diagrama de bloques de la integración GPS/INS utilizando un filtro de kalman complementario

La ventaja principal de emplear el CKF como método de integración radica en que solo el INS necesita ejecutarse a las altas tasas de transferencia de la IMU, y teniendo en cuenta que la implementación computacional del INS es poco costosa, la aplicación en general resulta considerablemente económica.

El filtro de kalman, el cual es el subsistema que requiere el mayor tiempo de proceso, necesita ser actualizado a la baja tasa de transferencia del receptor GPS. La desventaja del CKF es que la suposición de linealidad para los cálculos de los errores no siempre resulta válida.

Filtro de Kalman Extendido (EKF)

El EKF es un filtro de kalman el cual acepta modelos dinámicos no lineales, y por lo tanto no es necesario adicionar un algoritmo INS en éste método de integración. El filtro de navegación es capaz de calcular de manera directa la posición, velocidad y orientación de la aeronave.

Con el filtro de kalman extendido se puede además dar como salida cálculos filtrados de las mediciones inerciales para aplicaciones de control en vehículos de alto rendimiento.

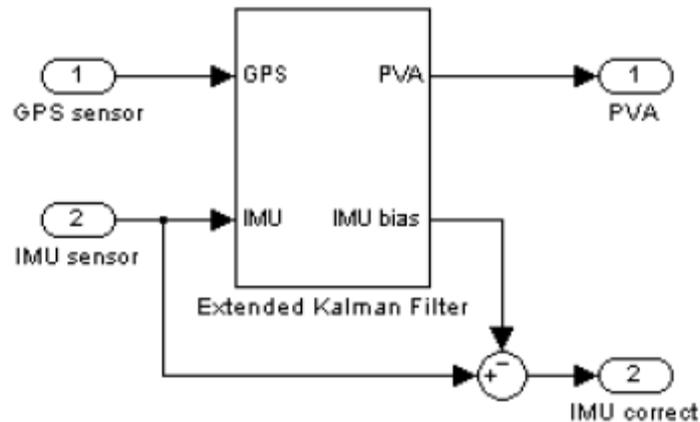


Figura 6. Diagrama de bloques de la integración GPS/INS utilizando un filtro de kalman extendido

En definitiva se puede afirmar que un EKF tiene una mayor carga computacional que un CKF, debido básicamente a que el filtro de kalman extendido se ejecuta a más altas tasas de transferencia.

2.2.3.3 Configuraciones de Integración GPS/INS

Las estrategias de integración generalmente se clasifican en tres categorías: *loosely coupled*, *tightly coupled* y *ultra-tightly coupled*.

Loosely Coupled

En la primera, el receptor GPS posee su propio filtro de Kalman para calcular la solución de navegación que se combinará con la solución inercial para formar los errores residuales que alimentarán al filtro de navegación Kalman. Esta estrategia permite el máximo aprovechamiento del hardware y software existente que se ensambla en un sistema en cascada sin mayores desarrollos. Además, dentro de esta categoría existen dos arquitecturas: *feedforward* y *feedback*. La primera está destinada a sistemas que involucran IMUs de alta calidad y para aplicaciones de corta duración por que el filtro de navegación procesa la información del receptor GPS y del INS, pero no existe ningún mecanismo de corrección para paliar los errores en los sensores. En la configuración *feedback*, el filtro de navegación además de proporcionar las correcciones a la solución de navegación, permite limitar los errores en los sensores (sesgos, derivas, no ortogonalidad) y en las ecuaciones de navegación. Esta configuración es importante para aquellos sistemas con IMUs de precisión media-baja, donde la propagación de errores es relativamente alta. Con mayor razón si se pretende utilizar el sistema en aplicaciones reales o cercanas a tiempo real, donde la estimación y compensación de los errores es determinante.

Tightly Coupled

En la configuración *tightly coupled*, los filtros Kalman del receptor GPS y el de navegación son combinados en uno solo, por lo que el vector de estados incluye los estados de la solución inercial (posición, velocidad, orientación (attitude), deriva de los giros, sesgo de los acelerómetros) y del receptor GPS (sobre todo sesgo y deriva del reloj). Esta arquitectura utiliza de forma más eficiente las medidas disponibles y la información apriori para determinar y corregir los errores del sistema de una forma altamente integrada, obteniendo una mejor prestación

que la integración *loosely coupled*. Además de proporcionar estimados de navegación precisos durante periodos de alta dinámica vehicular.

Ultra-Tightly Coupled

La última configuración se lleva a cabo a nivel de hardware y es implementado, por el momento, únicamente por los fabricantes del equipo. Las otras dos estrategias aparecen aproximadamente en cantidades iguales en la literatura, aunque aparentemente la integración *tightly* parece tener preferencia. Sin embargo, es necesario tener un grado alto de sincronismo entre sus elementos, lo que no es necesario en la arquitectura *loosely*.

2.3 SISTEMA DE RADAR PARA RECONOCIMIENTO DE OBSTACULOS Y EVASIÓN DE COLISIONES

Recientemente, los vehículos aéreos no tripulados (UAV) han ido trazando un gran atractivo para aplicaciones tanto militares como civiles sin presentar riesgo alguno en cuanto a la seguridad aérea, ya sea para el piloto en vuelo de baja altitud o en ambientes peligrosos de campos de combate. Debido a la inherente naturaleza de los vehículos al volar a baja altura, el reconocimiento de obstáculos es un requisito fundamental para evitar colisiones en contra obstáculos designados (estacionarios o en movimiento) a lo largo de su trayectoria. También ha de notarse que un UAV debe asegurar un nivel equivalente de seguridad en comparación con aeronaves tripuladas para así poder volar espacio aéreo militar y civil. De esta manera, el sistema de evasión de colisión debe ser considerado como parte del sistema de navegación de un vehículo aéreo no tripulado. El reconocimiento de obstáculos y evasión de colisiones, está siendo reconocido como el problema mas importante en el campo de los UAV's. La posibilidad de creación de un estándar internacional

de regulación para realizar la tarea de “sensar y eludir” en un UAV, esta siendo estudiada en Europa y USA.

La mayoría de los actuales sistemas de evasión de colisión de las aeronaves tripuladas emplean sistemas de alarma de tráfico y evasión de colisión (TCAS) con un protocolo estándar, el cual mide el rango y la proporción de rango (range rate) de alguna otra aeronave que incursione en la trayectoria, utilizando métodos interrogativos y proveer la información de decisión para el piloto y realizar un control de vuelo automático. La vigilancia autónoma dependiente por difusión (ADS-B) esta siendo considerada para futuros sistemas de evasión de colisiones, los cuales transmiten su propia información de posición de vuelo (basada en GPS) a las aeronaves cercanas para así de esta manera asegurar una distancia adecuada sobre la propia aeronave. A pesar de ello, muchos vehículos aéreos, tanto MAV's (vehículos aéreos tripulados) como UAV's no pueden esforzarse en llevar demasiadas ayudas avionicas, principalmente debido al peso, volumen, potencia e incluso repercusiones de costos. De este manera las estrategias de evasión de colisiones, requiere un mínimo de ayudas avionicas así como también de un desempeño efectivo con tamaño reducido y peso aligerado por parte de la aeronave para así proporcionar el desarrollo automatizado de la tarea de evasión de colisión en vehículos que no requieren piloto. Adicionalmente los sistemas de evasión de colisiones deben automáticamente sensar los obstáculos a los largo de la trayectoria de vuelo y medir el rango y la proporción o tasa de rango (range rate) en tiempo real y bajo entornos climáticos de todo tipo.

Conforme se describe en [7], el sistema de reconocimiento y evasión de obstáculos está bajo estudios de viabilidad para el proyecto “Korea smart UAV”, el cual tiene como objetivo desarrollar un UAV inteligente capaz de navegar a altas velocidades y realizar despegue y aterrizaje vertical (VTOL) integrando tecnologías inteligentes desarrolladas a través de los años, consolidado por el ministerio de ciencia y tecnología. Los requerimientos del sistema básico incluyen:

una velocidad máxima de 500 Km/h, altitud de hasta 3 Km, tiempo de duración de 5-3 horas, y rango de detección de obstáculos de mas de 5 Km.

2.3.1 Características de los Sistemas de Sensores para Evasión de Colisiones

En general, los sistemas de evasión de colisiones para vehículos tripulados y no tripulados pueden ser clasificados en sistemas cooperativos y sistemas no cooperativos. Un ejemplo de sistemas cooperativos incluye a TCAS, el cual actualmente es integrado con la aeronave, y el ADS-B no se usa como sistema de evasión de colisiones, pero se esta considerando la posibilidad para futuras aplicaciones. Los sistemas no cooperativos emplean sensores tales como los electro-ópticos y los radares electromagnéticos para medir la información de evasión sobre obstáculos usando métodos activos y pasivos.

Los sensores activos emiten energía a los obstáculos y reciben la energía reflejada, mientras que los sensores pasivos solo reciben energía radiada proveniente de los obstáculos.

Dependiendo del tipo de sensor aplicable, existen un número de ventajas y desventajas en términos de la frecuencia de operación como: consumo de potencia promedio, rango de detección, tamaño del componente, resolución angular, efectos atmosféricos e inmunidad a la interferencia electromagnética.

La banda de frecuencia de los sensores de radar de microondas es relativamente baja, y por los tanto no provee una resolución angular suficiente, no obstante es insensible a las situaciones climáticas. Por otra parte, el radar de la onda de milímetro provee ventajas en cuanto a, tamaño reducido y buena resolución angular, sin embargo esta limitado por su rango de detección y también porque es

sensible a entornos climáticos. La resolución angular puede ser mejorada, aumentando la frecuencia de operación, pero eso depende físicamente del tamaño de apertura de la antena. La siguiente tabla planteada en [7], resume las características de los sensores activos en función de su capacidad para detección de obstáculos.

Condición	Microonda	MMW	Imagen Térmica
Modo	Activo	Activo	Activo
Longitud de Onda	cm	cm	Cm
Potencia Promedio (mismo rango)	Alta	Media	Baja
Rango y Proporción de Rango(range rate)	Disponible	No disponible	No disponible
Rango de Detección	Ilimitado	10 Km	10-15 Km
Componente	Grande	Pequeño	Pequeño
Resolución Angular	Grande	Pequeño	Pequeño
Efectos Atmosféricos	No degradado	Levemente degradado	degradado

Tabla 1. Características del Sensor

Como un sistema cooperativo de evasión de colisiones, el TCAS provee una especie de ojos electrónicos para que el piloto pueda ver la situación del tráfico en las cercanías de la aeronave. TCAS se despliega para mostrarle al piloto la posición y velocidad relativa de alguna aeronave que se encuentre 40 millas a distancia. El instrumento suena una alarma cuando determina que otra aeronave pasará demasiado cerca de la propia aeronave. Existen dos diferentes versiones: TCAS I, el cual indica la altura relativa de toda la aeronave dentro de un rango seleccionado de 10 a 20 millas. Cuando los pilotos reciben una consulta de tráfico (TA), ellos deben identificar visualmente la otra aeronave que se encuentra en su trayectoria, y así poder alterar la altitud del aeroplano. La otra versión TCAS II también provee al piloto con una resolución de consulta (RA's) cuando sea necesario. El sistema determina el curso de cada aeronave; elevación, descenso, o dirección y nivel de vuelo. TCAS II emite un RA, informando a los pilotos que ejecuten una maniobra evasiva, necesaria para evitar a la otra aeronave ya sea en elevación o descenso.

Los estándares para ADS-B están siendo desarrollados actualmente conjuntamente por la *Administración Federal de Aviación* (FAA) e industrias a través de la *Radio Technical Commission for Aeronautics inc* (RTCA). La idea es que la aeronave obstáculo transmita un mensaje en una base regular, el cual incluya su posición como son latitud, longitud y altitud, velocidad y posiblemente otra información. La otra aeronave pueda recibir esta información para usarla en una amplia gama de aplicaciones como son la evasión de colisiones. Estos reportes informando acerca de la posición están basados en sistema de navegación muy exactos, como sistemas satelitales GPS. La exactitud no se ve afectada por el alcance que se tiene hasta la otra aeronave. Con el radar, los cambios de velocidad detectados, se requiere de un rastreo de los datos recibidos. Los cambios solo pueden ser detectados durante un periodo de varias actualizaciones de posición. Estas mejoras en exactitud de la vigilancia pueden ser usadas para apoyar una gran variedad de aplicaciones de evasión de colisiones en un aeropuerto y en el espacio aéreo para mejorar la seguridad en un futuro cercano.

2.3.2 Análisis Requerido en los Sensores para la Evasión de Colisión

El programa de inteligencia UAV requiere tener la capacidad para la evasión de colisiones y así de esta manera eludir obstáculos estacionarios y no estacionarios que se encuentren a o largo de la trayectoria del vehiculo, en vuelos de baja altitud y ambientes de maniobrabilidad rápida. De acuerdo con [7], es esencial considerar que el sensor para la evasión de colisiones debe ser capaz de proveer la información de la posición medida en tiempo real y además, ajustarse a las necesidades del vehiculo debido a la carga útil, como: peso, volumen, y potencia. Basado en los requerimientos del sistema, los parámetros de diseño clave que se deben tener en cuenta son los siguientes:

2.3.2.1 Requisitos del Sistema

La máxima velocidad de un UAV es 500Km/h sin carga, y 440Km/h con carga. La carga útil para misiones de vigilancia está limitada a menos de 40Kg, y en caso de misiones donde se requiera utilizar evasión de colisiones, la carga está estipulada a menos de 25Kg.

2.3.2.2 Modo de Eludición de Colisiones

Se requieren de tres modos de operación críticos para decidir el estado de riesgo de colisión: modo de búsqueda, conocimiento y evasión. En un modo de navegación, el sistema busca y monitorea el obstáculo dentro de un cierto volumen de escaneo a lo largo de la trayectoria del vuelo. Una vez que los obstáculos son detectados por los sensores, en 23 segundos (teniendo en cuenta el tiempo estimado de colisión) se activará el modo de conocimiento, rastreando la posición del objetivo designado. En el modo de evasión, el sistema empieza a maniobrar y automáticamente girar el vehículo para de esta manera eludir el obstáculo. A una velocidad cercana de 1000Km/h, el sensor debe detectar el obstáculo a una distancia mínima de 6.4Km. Los tipos de obstáculos incluyen objetos estacionarios como edificios, torres, líneas de alta tensión; así como también árboles, colinas y montañas. Los objetos no estacionarios son los vehículos aéreos que se encuentran adyacentes como aviones, helicópteros y UAV's cercanos.

2.3.2.3 Requisitos del Sensor

La selección del sensor para la evasión de colisiones, debe ser considerada desde diversos puntos de vista: capacidad de medir en tiempo real, entorno de

operación, limitaciones de carga útil, y regulación de la seguridad aérea. El más importante de todos los requisitos para la evasión de colisiones es la capacidad de medir en tiempo real, el rango relativo, la tasa de rango, elevación producida y el acimut, que es el ángulo que forma el círculo vertical con el meridiano y pasa por un punto del globo terráqueo. El entorno de operación del vehículo es considerado como el criterio de selección del sensor, en el cual se incluyen: la capacidad de búsqueda y escaneo; la capacidad de operación en ambientes climáticos de todo tipo (tanto de día, como de noche); el tiempo resistencia del vehículo en el aire; y capacidad de medición de respuesta electrónica (ECCM). Las necesidades más críticas para vehículos UAV de tamaño pequeño son los requisitos de carga útil. El peso de la carga se requiere que sea menor a 25 Kg, y los límites del volumen sean 620 mm de ancho, 420 mm de alto y 300 mm de largo para el equipo para el vehículo. Además, se requiere de viabilidad concerniente a bajo consumo de potencia junto con una larga vida de operación.

La consideración final se tiene que ver con los requisitos de seguridad aérea durante el vuelo en espacio aéreo, los cuales son dictados por la FFA o el estándar internacional. Desafortunadamente, los requisitos para el estándar de “sensar y eludir” para la seguridad aérea de los UAV aún no está disponible, pero hasta el momento, como norma superior de regulación, el requisito mínimo es cumplir con el nivel equivalente de seguridad (ELOS) en observación y evasión para vehículos tripulados dado por la regulación de la FFA. La siguiente tabla resume los parámetros claves de regulación para la evasión de colisiones en aeronaves tripuladas.

PARÁMETRO DESEMPEÑADO	ELOS PARA "OBSERVACIÓN Y EVASION"
Distancia mínima de colisión	500 pies
Campo en consideración	Volumen de búsqueda
- acimut	+/- 60 grados
- elevación	+/- 10 grados
Rango de detección VFR (visual flight rules)	1.84 millas
Tiempo de colisión (11 seg maniobra evasiva)	21 seg (10 PTR) 23.5 seg (12.5 seg PTR) PTR: tiempo de reacción del piloto (pilot reaction time)
Numero de aeronaves	Limitado (5-10)

Tabla 2. ELOS "observar y evadir"

A pesar de los requisitos de la fase inicial del estudio sobre la evasión de colisiones, los métodos no cooperativos que utilizan sensores activos están siendo seleccionados como sensores primarios para evasión de colisiones. Existe una serie de intercambio entre los sensores de radar por microondas y por milímetro. Los de microondas satisfacen la mayoría de los requisitos mencionados anteriormente en cuanto al rango de detección y la proporción de rango, sin embargo su limitación es la adaptación a la carga útil debido a su gran tamaño y volumen en una relativamente larga longitud de onda y banda de microonda. Por otro lado, se encuentran los radares de onda milímetro, de tamaño pequeño y peso ligero, y pueden satisfacer los requisitos del nivel equivalente, incluso con un rango de detección limitado de 10 Km. Sin embargo esta limitación esta dentro de los requisitos de rango de detección de 6.4 Km.

En base a este intercambio de valores técnicos, el sensor de radar de milímetro esta siendo seleccionado como sensor primario de evasión de colisiones. No obstante, el método cooperativo como el TCAS y/o ADS-B podrían ser considerados como una opción alternativa para la fiabilidad del sistema de apoyo, siempre y cuando se permitan los márgenes de ajuste de la carga útil.

2.3.3 Sensor Radar de Eludición de Colisión

2.3.3.1 Concepto OACAS

El diseño conceptual del diagrama de bloques para un sistema de reconocimiento de obstáculos y evasión de colisiones (OACAS) que se muestra en la figura de la siguiente hoja consiste de un sensor radar de evasión de colisión CAS (Sistema de Evasión de Colisiones) y de un procesador OCAS (sistema de evasión de colisión con objetos). Los sistemas TCAS y ADS-B son de opcionales.

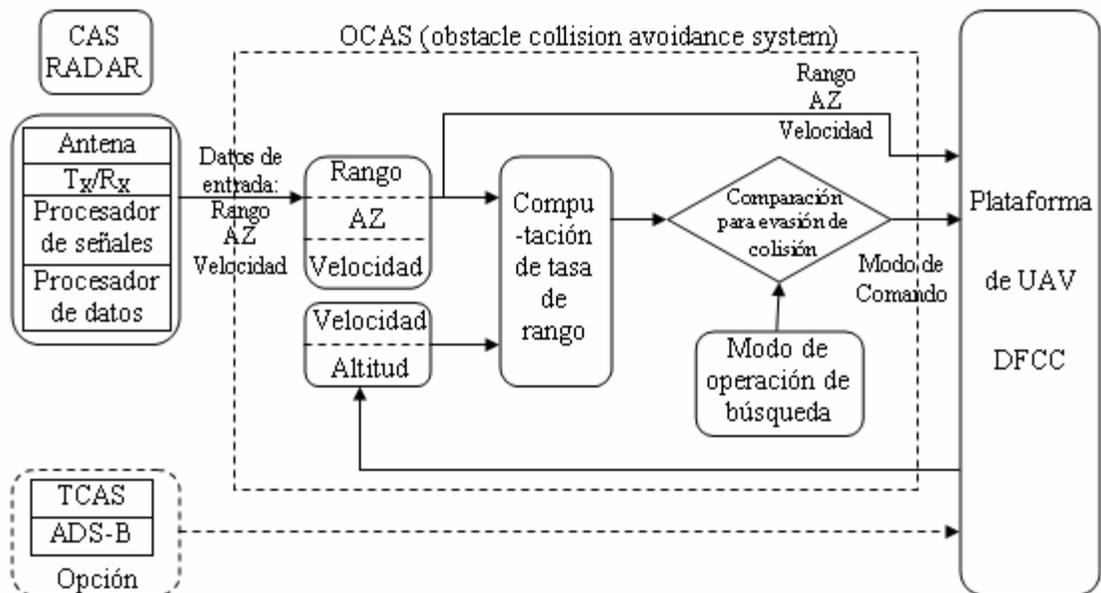


Figura 7. Concepto de OACAS

El sistema CAS consiste de sensores de radar (CAR) y un procesador de sistema de evasión de colisión con objetos (OCAS). Utilizando el sensor radar de rango, acimut, o de elevación, y velocidad de los obstáculos, el OCAS debe decidir el criterio de colisión y enviar el comando de evasión al computador de control digital de vuelo (DFCC), basado en el criterio de “tiempo de colisión”. El procesador OCAS puede estar contenido dentro del procesador de datos del radar o puede

ser incluido en el DFCC. El radar CAS constituye la antena, transmisor y receptor, procesador de señales y procesador de datos. El procesador OCAS describe la proporción de rango para generar el comando de evasión de colisión usando los datos del radar. Dependiendo de la velocidad de cierre o apertura que tengan los obstáculos en movimiento, detectados por el radar, se pueden resumir en la siguiente tabla los requisitos mínimos para el criterio de “tiempo de colisión” (asumiendo una velocidad de 440Km/h con carga útil).

VELOCIDAD (Km/h)	TIEMPO DE COLISION (SEC)					
	5	11	17	23	25	s
500	0.7	1.5	2.3	3.2	3.5	Km
600	0.8	1.8	2.8	3.8	4.2	Km
700	1	2.1	3.3	4.5	4.9	Km
800	1.1	2.4	3.8	5.1	5.6	Km
900	1.3	2.8	4.2	5.8	6.3	Km
1000	1.4	3.0	4.7	6.4	6.9	Km
Velocidad de Cierre		Modo de Evasión		Modo de Reconocimiento		

Tabla 3. Criterio de “Tiempo de Colisión”

El sistema CAS debe cumplir con los requisitos de peso y volumen para ajustar el sistema inteligente UAV. Dentro de la configuración del sistema del UAV, el sistema CAS es instalado en la parte frontal del vehiculo para de esta manera sensar eficientemente y evadir los obstáculos mediante la búsqueda en el análisis obtenido. Para ajustar correctamente el sistema CAS, éste debe cumplir con los siguientes parámetros: las dimensiones deben ser de 62 cm (ancho) X 42 cm (alto) X 30 cm (profundidad) y el volumen de espacio de la antena de 30 cm de diámetro. El peso de la carga para el sistema CAS está limitado a 25 kg.

2.3.3.2 Parámetro de Diseño del Radar CAS

El radar de reconocimiento y evasión de colisiones debe detectar y automáticamente evadir los obstáculos dentro del volumen de búsqueda durante el vuelo de acuerdo con los requisitos del sistema CAS descritos anteriormente. El sistema de radar de evasión de colisiones (CAR) puede ser diseñado e implementado de varias maneras para alcanzar los requisitos de buen desempeño para la evasión de colisiones. Los modos duales de CAR y SAR (Radar De Apertura Sintético) pueden considerarse para la evasión de colisiones, así como también para la vigilancia, utilizando un único hardware de radar. La especificación de diseño se puede intercambiar en cada parámetro, el cual es seleccionado para el sistema de radar propuesto. La siguiente tabla muestra los parámetros clave de diseño para el sistema radar:

PARÁMETROS	INTERCAMBIADO POR
Tipo de radar	Coherente o coherente en receptor
Modulo de Potencia	MPM o TRM o Mgnetrón
Frecuencia	Banda Ka (35GHz) o Ku
Tipo de antena	De tipo plano o de disco
Rango	8 Km máximo
Resolución	Rango < a 5 m
Tipo de PRF	Bajo PRF < 5 KHz ó PRF alto > 20 KHz
Cobertura de análisis (Scan)	+/- 90 grados en acimut +20 hasta -80 grados en elevación
Volumen de análisis	+/- 60 grados en acimut +/-10 grados en elevación
Amplitud de transmisión de la antena	3 grados en acimut y elevación o mas amplio
Lóbulo de ganancia de la antena	38 dB (lóbulo principal) o mas -32 dB (lóbulo principal) o menos
Probabilidad de detección	90% para SW2, RCS 1 m2, Pfa =10-6

Tabla 4. Parámetros de Intercambio para el Diseño del Radar

2.3.4 Desempeño en Detección y Evasión de Colisiones del Radar

La problemática de utilizar sensores tipo radares se puede considerar en dos casos. Uno es el problema del reconocimiento, el cual puede ser representado por la probabilidad de detectar los obstáculos que son estadísticamente diferentes modelos de la sección transversal medida por el radar (RCS) en los ambientes de los vehículos autónomos. El otro es el problema de la evasión, el cual se ve representado por el desempeño del algoritmo de evasión de colisiones basado en el rango, la proporción de rango y la información producida por medio de los distintos escenarios de vuelo del vehículo. El algoritmo de evasión de colisiones también afecta en los datos en tiempo real disponibles, así como también la exactitud o errores de rango, proporción de rango e información producida. Así de esta manera, la problemática del reconocimiento para la detección de la información exacta del radar desde el sensor radar es en primer lugar resuelta antes que el modo de evasión se active para girar el vehículo a una distancia lo suficientemente segura. En modo de reconocimiento, el procesador OCAS puede entregar el estado en movimiento de todos los obstáculos a lo largo de la trayectoria de vuelo, rastreando un número de obstáculos. Por otra parte, en modo de evasión el procesador OCAS debe generar los datos para la orden que determina cual es la mejor ruta de vuelo para evadir los obstáculos que estén incursionando en la trayectoria.

2.3.4.1 La Problemática de la Detección de Obstáculos

Los obstáculos del radar se puede afirmar que son representados por los objetos estacionarios (edificios, torres, árboles, montañas) y los no estacionarios (aeronaves, helicópteros y otros vehículos aéreos). La sección transversal del objeto medida por el radar (radar cross section - RCS) es función del coeficiente de reflexión y del tamaño de la superficie reflejada. También varía de acuerdo al

aspecto de los ángulos, longitud de onda y a efectos de trayectorias múltiples. Debido a las dificultades asociadas con la predicción exacta de la sección transversal medida por el radar (RCS) incluso para objetos simples, los métodos aproximados son la alternativa más viable. El RCS de un objeto complejo puede ser modelado como un grupo de centros dispersos a través del objeto. Los obstáculos estacionarios pueden ser modelados como RCS estáticos, pero a medida que el vehículo se mueve, las dispersiones traseras pueden variar con el aspecto de los ángulos. En la mayoría de las situaciones prácticas, existe un movimiento relativo entre el radar y el objeto observado. De esta manera, el RCS medido por el radar fluctúa en un periodo de tiempo como función de la frecuencia y del aspecto de ángulo que tiene el objeto. Este RCS dinámico puede fluctuar tanto en amplitud como en fase. En la mayoría de los casos la fluctuación de la fase no es la mayor preocupación, pero para los casos en que se requiere de alta precisión y exactitud, una fluctuación en la fase puede resultar perjudicial para el desempeño. Las fluctuaciones en amplitud pueden variar lenta o rápidamente, dependiendo del tamaño, forma y dinámica del obstáculo, así como también de su movimiento relativo con respecto al radar.

2.3.4.2 La problemática de la Evasión de Colisiones

La problemática de la evasión de colisiones consiste en determinar la posibilidad de colisión, y además proveer comando de maniobra al vehículo en un complicado ambiente de obstáculos. Existen tres modos de operación concebidos: *modo de búsqueda (detección)*, *modo de reconocimiento (detectar y rastrear)*, y *modo de evasión (maniobrar)*. El proceso para la evasión de colisiones se muestra en el siguiente diagrama:

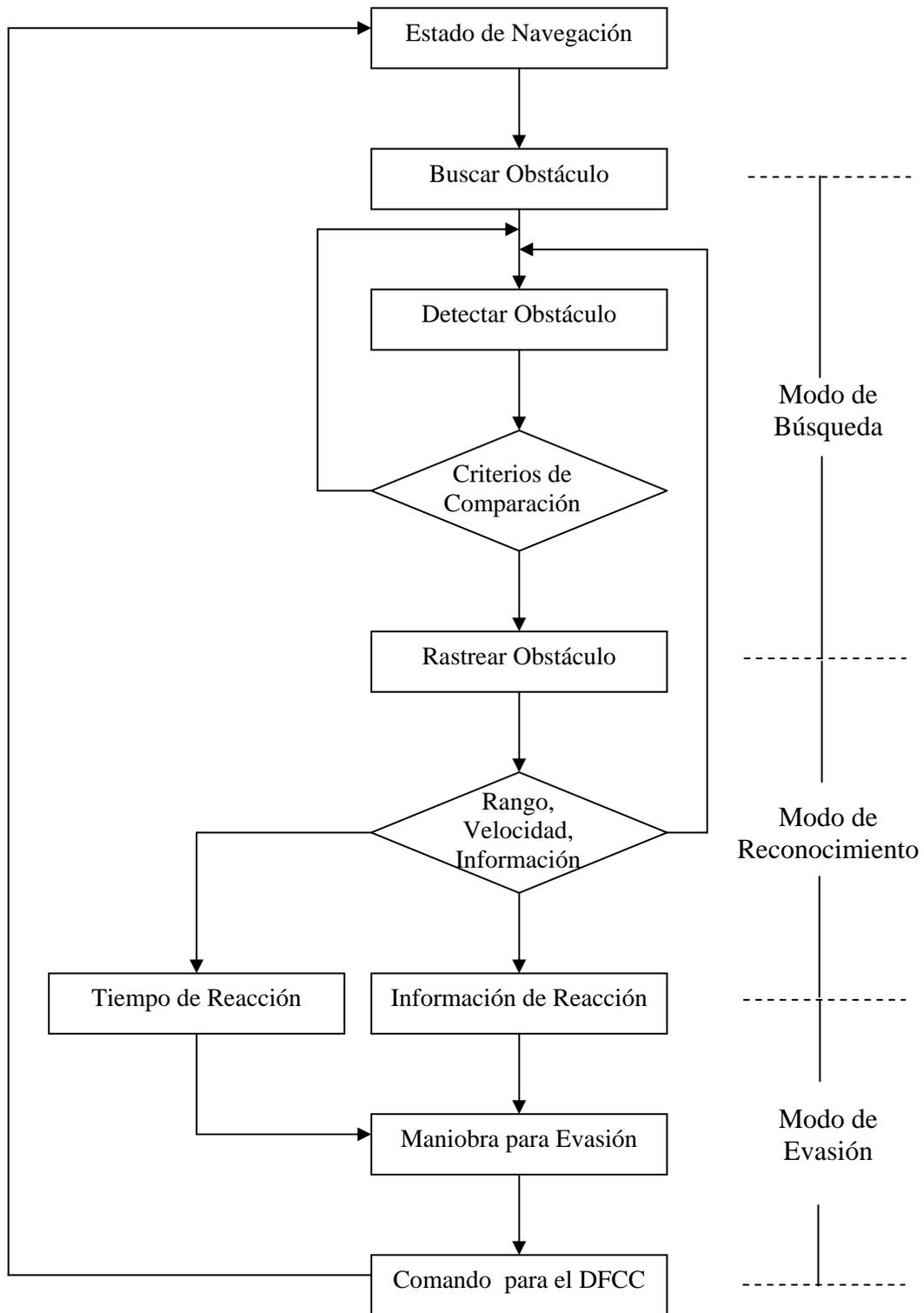


Figura 8. Algoritmo de Proceso para la Evasión de Colisión

En el modo de búsqueda de un estado de navegación normal, el UAV vuela hacia su destino preprogramado por medio del sistema de navegación, y el radar CAS busca los obstáculos dentro del análisis (scan) realizado a lo largo de la trayectoria, y además lo detecta y observa su acercamiento hacia el vehículo. Una vez que cualquier objeto se acerque al “tiempo de colisión” de 23 segundos, se cambia de modo de operación de modo de búsqueda a modo de reconocimiento, en el cual tiene la capacidad de reaccionar al obstáculo, rastreando sus movimientos a través de una actualización continua del vector de movimiento del objeto cada vez que se realiza un análisis (scan). Si el “tiempo de colisión” de cualquier objeto que se esté acercando al objeto es menor a 11 segundos durante el rastreo, entonces el modo de evasión es inicializado para maniobrar el vehículo. Por el contrario si la amenaza de colisión es removida, entonces el UAV vuelve a su estado de navegación normal (búsqueda de cualquier obstáculo). El desempeño en la evasión de colisión, principalmente depende de las mediciones disponibles del radar, así como también de la exactitud en su rango, proporción de rango y su comportamiento en diversos escenarios de vuelo.

Se podría establecer un escenario típico de vuelo, con el fin de investigar los problemas involucrados en el modo de evasión. Los parámetros claves del radar para modelar la situación de vuelo, incluyen el vector de velocidad y los aspectos angulares de acimut y de elevación para la distancia dada.

El primer escenario podría ser el caso muy simple en el cual el obstáculo en movimiento se acerca en la dirección radial en el cual su aspecto angular es cero grados. En este caso, dependiendo de la velocidad del obstáculo, el tiempo de colisión es determinado estimando la proporción de rango y comparándola con los criterios.

El segundo escenario es un caso más general, en donde el obstáculo en movimiento se acerca en una dirección angular de cero a noventa grados. En este

caso la velocidad del obstáculo varía por medio del aspecto angular, por lo tanto es más sensible la obtención de la información acerca de la estabilidad en la proporción de rango.

El tercer escenario es el caso en el cual el obstáculo del vehículo vuela hacia la dirección de apertura, pero el vehículo aéreo se mueve más rápido que la velocidad del obstáculo. En este caso existe una posibilidad de colisión solo para el caso en que la velocidad del propio vehículo sea mayor que la del obstáculo entrante.

El cuarto escenario es el caso en el cual los obstáculos estacionarios como torres o colinas están dentro de una distancia peligrosa. En este caso, la evasión de una colisión es posible usando la información acerca del rango y el rumbo.

3. APLICACIONES DE LOS UAV'S.

3.1 APLICACIONES LABORALES

3.1.1 Monitoreo Ambiental

En esta aplicación lo que se busca con UAV es mirar el estado de terrenos y plantaciones de diferentes clases, y según se describe en [9], en la actualidad la NASA tiene un proyecto llamado “Proyecto del Café” en el cual la función del UAV, que en este caso se utilizó el pathfinder-plus, es volar de ida y vuelta a través de la plantación en patrones de precisión mientras cámaras especiales capturan y transmiten imágenes del café que madura a directores de campo en el suelo. El equipo de cámaras del avión toma ríngleras superpuestas de imágenes, las cuáles asistirán a los cosechadores a localizar los cafetales más maduros.



Foto 2. Pathfinder-plus

3.1.2 Monitoreo De Incendios Ambientales

Así como se describe en [8], la principal función de los UAV en este tipo de aplicación es determinar focos de incendio y así ser los ojos de un bombero en el incendio cuando el origen aún no ha sido determinado. La Universidad del Norte de California (UNC) diseño un micro UAV para este tipo de aplicaciones utilizando un sensor de temperatura así registrando el punto mas caliente en pantalla el cual sería el foco del incendio.

3.1.3 Fotografía Aérea

De igual manera conforme se muestra en [8], la fotografía aérea consiste en que el UAV tome fotos en lugares los cuales son inaccesibles para las personas, también se puede usar en zonas en las cuales las condiciones ambientales no son favorables para la vida humana. El prototipo de la UNC es el que en estos momentos se utiliza para esto ya que ayuda a los rescatistas ubicando personas en los cuales ellos no puedan tener fácil acceso ya este transmite las imágenes en tiempo real ya que consta con una filmadora para esto.



Foto 3. Prototipo de la UNC.

3.2 APLICACIONES MILITARES

3.2.1 Vigilancia y Reconocimiento

La vigilancia y reconocimiento aéreo puede operar con los múltiples enlaces satelitales disponibles a nivel mundial, para proporcionar imágenes de alta resolución en tiempo real al conductor de las operaciones militares, y estos puedan dar un respuesta inmediata a la situación y todo esto sin arriesgar ninguna vida humana en campo enemigo, conforme a [12]. El principal UAV que ya es bastante utilizado es el Global Hawk que un vehiculo de vigilancia y reconocimiento que vuela a mayores alturas que un avión tripulado lo que le permite una mayor autonomía, el Global Hawk puede trabajar sobre objetivos que se encuentran hasta 25.000 kilómetros de su base.



Foto 4. Global Hawk.

3.2.2 Guerra Electrónica

Esta es una aplicación la cual está todavía en desarrollo pero en esta se busca localizar armas nucleares y armas biológicas, uno de los UAV que se tiene en prueba es el prototipo de la UNC como se muestra en [8], esto es posible reemplazando la cámara filmadora por sensores de radiación, sensores de bacterias o detectores de ciertas sustancias para las armas nucleares y biológicas respectivamente.



Foto 5. Prototipo de la UNC.

3.2.3 Combate Aéreo

Es la aplicación en la cual se han preocupado más ya que en aquí se utilizan los UAV para combates aéreos y así se puede evitar la pérdida de vidas humanas en la actualidad estos aviones son respaldos de aviones de combates tripulados, un ejemplo de estos es el X-45 de Boeing mostrado en [12], el cual está diseñado para ataque y destrucción de objetivos aéreos y terrestres aunque la idea de este

UVA es solo utilizarlo en los primeros días del conflicto que es donde las fuerzas enemigas tienen todos sus recursos y las pérdidas humanas son más grandes y conforme avanza el conflicto se encargaría de tareas de vigilancia y reconocimiento así como ataques esporádicos de objetivos terrestres.



Foto 6. X-45 de Boeing.

4. DESARROLLO DE LOS UAV'S EN COLOMBIA

Si bien cierto que en los países desarrollados como Estados Unidos se hace más evidente el uso y desarrollo de los vehículos aéreos no tripulados debido a los cuantiosos recursos económicos, no es imposible ver en países de menores recursos como Colombia, un desarrollo fructífero en el campo de los UAV's. Prueba de ello son el proyecto **EFIGENIA** realizado por "*Mario Andrés Córdoba*" de la "*UNIVERSIDAD DEL CAUCA*", y el proyecto **COLIBRÍ** que adelantan en conjunto las siguientes universidades: "*UNIVERSIDAD EAFIT*", "*UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA*" y "*UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN*".

A continuación se describen éstos dos proyectos.

4.1 PROYECTO EFIGENIA

El EFIGENIA es un vehículo Aéreo Robotizado, no tripulado, de despegue y aterrizaje vertical, o en pistas muy cortas (S/VTOL), autocontrolado mediante la combinación de una Red Neuronal Digital y un Sistema Experto Difuso.

Tal como se detalla en [13], el Proyecto fue presentado por primera vez por *Mario Andrés Córdoba* (*autor del proyecto*) de la *UNIVERSIDAD DEL CAUCA* en la *X Convención Científica Nacional* realizada en 1995, aunque en realidad se comenzó a trabajar en él desde el año 1991. Luego de varios años de investigación y una serie de modelos de prueba, el proyecto Efigenia fue culminado en el año 2000 por el mismo *Mario Andrés Córdoba*, quien alcanzó sus metas propuestas y además impulsó en gran medida el desarrollo en este campo de la aeronáutica y la electrónica.



Foto 7. Ilustración de EFIGENIA

4.1.1 Objetivos Establecidos en el Proyecto EFIGENIA

- Desarrollar nuevas tecnologías en cuanto a diseño de aerovehículo (S/VTOL), mediante la aplicación de conceptos innovadores y el establecimiento de simulaciones y prácticas con modelos.
- Experimentar bajo una visión futurista y real, con la aplicación de Redes Neuronales y Sistemas Expertos en el control y navegación autónoma de aeronaves no tripuladas, con la finalidad de obtener el más alto desempeño de estos aparatos.
- Generar y validar tecnología totalmente diseñada y construida en nuestro país, a un bajo costo, altas prestaciones, y un alto nivel de calidad.
- Buscar soluciones a los problemas que presenta nuestro país en cuestión de Telecomunicaciones, contaminación ambiental, investigación científica, mejora en las labores de busque y rescates haciéndolas más rápidas y

eficientes, apoyo a misiones marítimas, aéreas, fluviales o terrestres dada la cualidad del EFIGENIA de poder despegar y aterrizar verticalmente (S/VTOL) en un pequeño espacio.

4.1.2 Desarrollos Implicados en el Proyecto EFIGENIA

4.1.2.1 Diseño De la Aeronave

El EFIGENIA se caracteriza por su avanzado diseño aerodinámico; para ello se desarrolló un concepto innovador bautizado como: *aerovehículo de sustentación "híbrida"*, en el que la producción de las fuerzas sustentadoras ofrecen un alto desempeño aeromecánico resaltando en este las "bondades" tanto del helicóptero, a nivel de maniobrabilidad, como las de los aviones en cuanto a velocidad se refiere, obteniendo como resultado un gran desempeño, alta velocidad, estabilidad, gran maniobrabilidad, y rendimiento en el consumo de combustible.

Su característica especial es el despegue y aterrizaje vertical, o de manera convencional (en una pista de 2,8 metros de longitud), lo cual hace del EFIGENIA un equipo muy útil en el desarrollo de tareas de alto riesgo, faenas de trabajo de larga duración, ante un costo de operación y mantenimiento bastante económico.

4.1.2.2 Sistema de Navegación y Control de Vuelo

Su construcción se basó en un sistema multiprocesador que consta de seis minicomputadoras diseñadas especialmente para el aero-robot y estructuradas a partir de procesadores digitales de señal (DSP's) de 16 bits cada uno. Cada procesador realiza una tarea independiente y paralela en

tiempo real, permitiendo así una mayor velocidad de proceso y optimizando el desempeño de la aeronave.

Para medir de forma instantánea el rumbo, la posición y actuación real de aerovehículo se instalaron procesadores del sistema que se encargan de recolectar datos a través de sus equipos periféricos entre ellos el SISTEMA INERCIAL DE NAVEGACIÓN construido partir de cuatro acelerómetros, y la recepción de datos de ubicación global remitidos desde un satélite GPS.

Para que todo el Hardware y Software pueda operar correctamente, la fuente de alimentación se construyó a partir de células solares y dos unidades de baterías que producen voltajes duales (± 12 voltios, ± 5 voltios).

4.1.2.3 Sistema de Comunicación de Datos (Telemetría y Telecontrol)

En el desarrollo de cada tarea realizada por el EFIGENIA, según su objetivo se recolectarán datos e imágenes que serán enviadas a través de un equipo transceptor que opera en tiempo real, en la banda de UHF, con el objetivo de mantener informado del desarrollo de las operaciones realizadas por el robot al supervisor de misión y al centro de información de la estación de control.

Mediante este equipo no solamente se puede recibir datos provenientes de los sistemas a bordo, sino también enviar órdenes, o realizar cambios en los planes de vuelo y misión.

4.1.2.4 Equipos Electrónicos de Misión

Según el objetivo de la misión a desempeñar por el aero-robot, los siguientes son los equipos utilizados:

- *Sistema de Mapeo de Superficies*, el cual se utiliza para adquirir todos los datos topográficos de una superficie determinada.
- *Detector de Temperatura del Cuerpo Humano*, el cual funciona mediante la percepción de ondas calóricas, permitiendo detectar sobrevivientes en el lugar de una catástrofe.
- *Sistema de transmisión de video*, que permite visualizar los procesos que se están ejecutando en todo momento.
- *Sensores químicos e infrarrojos*, los cuales son útiles para la prevención y aviso de incendios forestales.

4.1.2.5 Estación de Control

Las operaciones de vuelo y el control de misión del EFIGENIA serán determinadas y supervisadas desde una estación de control que por sus minúsculas dimensiones físicas podrá estar a bordo de un automóvil, un barco, un avión, o en tierra. Desde aquí se mantendrá comunicación permanente con el aerovehículo mediante el transceptor de UHF.

4.2 PROYECTO COLIBRÍ

Según se describe en [2] y [3], Colibrí es una aeronave no tripulada (un mini-helicóptero de radio control) capaz de navegar por sus propios medios, es decir con la habilidad de ir de un punto a otro sin la intervención del ser humano. Para que la aeronave pueda navegar por sus propios medios es necesario utilizar métodos matemáticos y algoritmos para el desarrollo experimental, los cuales incluyen: *modelado matemático experimental, métodos de control convencional y multifrecuencia, redes para aplicaciones de hardware distribuido, agentes autónomos, métodos de transmisión inalámbrica y RT-Linux*. Tales métodos han

sido desarrollados y/o aplicados por los grupos de investigación que apoyan la propuesta, pero no han sido ensamblados con el propósito de adaptación y desarrollo para nuestro país de un sistema aéreo eficiente de bajo costo que, sin arriesgar vidas humanas, permita realizar diversas tareas como:

- Monitoreo ambiental
- Inspección y vigilancia de redes
- Inspecciones de tráfico
- Búsqueda y rescate
- Fotografía aérea
- Inteligencia y reconocimiento aéreo

A diferencia del proyecto EFIGENIA, COLIBRÍ es un proyecto con un mayor tratamiento científico debido a que tiene un enfoque más bien investigativo en lugar de trabajo personal.

El proyecto empezó a mediados de 2003, cuando cinco ingenieros colombianos y un equipo de estudiantes emprendieron el sueño de diseñar y construir un vehículo aéreo no tripulado, autónomo. Este proyecto fue presentado a Colciencias junto con otros 150 más de todo el país y fue catalogado como el segundo en importancia por su desarrollo tecnológico, integración interinstitucional y por los beneficios que podría prestar al mundo. A esta iniciativa se le llamó Colibrí, ya que el minirobot se parece a esta ave.

4.2.1 Objetivos Establecidos en el Proyecto COLIBRÍ

- Adecuar y ensayar un banco de prueba con un mini-helicóptero comercial eléctrico que permita, bajo un entorno seguro que no arriesgue el prototipo y no

requiera de pericia en el manejo del helicóptero, realizar pruebas, simulaciones, docencia y entrenamiento.

- Adecuar, probar, poner a punto y optimizar la aviónica inicialmente sobre el mini-helicóptero eléctrico y con el entorno de desarrollo de MATLAB (basado en Simulink, Real-Time Workshop, Real-Time Windows Target y xPC), incluyendo una red CAN (“Control Area Network”) que interconecte dispositivos de medición, actuación y control (“Flight Computer”, GPS, INS, RA, brújula electrónica y servos) para control de la actitud (vuelo estacionario).
- Obtener y validar el modelo matemático del sistema por medio de leyes físicas e identificación paramétrica que permita realizar simulaciones del mini-helicóptero eléctrico y el diseño de diferentes tipos de controladores.
- Diseñar algoritmos de control con muestreo convencional y no convencional a partir del modelo matemático y la simulación en computador para el torque del motor, la actitud (roll, pitch, yaw) y la altitud, de acuerdo a parámetros de diseño dados en la bibliografía científica y estándares internacionales.
- Desarrollar un modelo tridimensional en realidad virtual en las plataformas OpenGL y 3D Studio, basado en el modelo matemático obtenido por leyes físicas, para hacer simulaciones del mini-helicóptero (eléctrico y de gasolina) y de su entorno.
- Implementar y probar un sistema de tiempo real en el “Flight Computer” basado en RT-Linux para el control, monitoreo, transmisión y recepción de datos del mini-helicóptero (eléctrico y de gasolina).
- Implementar y probar un sistema de telemetría por LAN (“Local Area Network”) inalámbrica (Wave LAN) con TCP/IP en el “Flight Computer” para supervisar el estado del mini-helicóptero (eléctrico y de gasolina) desde una terminal remota (“Ground Station”).
- Diseñar una arquitectura del mini-helicóptero (eléctrico y de gasolina) basada en agentes inteligentes.

- Adecuar, probar, poner a punto y optimizar un mini-helicóptero comercial de gasolina con la aviónica, sistema de tiempo real y telemetría necesarios para realizar pruebas de campo.
- Realizar pruebas reales, inicialmente sobre el mini-helicóptero eléctrico y luego sobre el de gasolina, de diferentes métodos de control convencional y no convencional, diseñados a partir del modelo matemático y probados con la simulación, que permitan el vuelo estacionario del sistema, y comparar los logros obtenidos con resultados semejantes dados en la bibliografía y estándares internacionales.
- Generar publicaciones internacionales de alto contenido científico y tecnológico.
- Formar recurso humano a nivel de pregrado y posgrado.
- Formar y consolidar una red de investigación en el área del "Control y guía de aeronaves", con cooperación de investigadores colombianos y del exterior.

CONCLUSIONES

A través de la presente monografía se lograron establecer los lineamientos fundamentales acerca de los sensores que se implementan en los vehículos aéreos no tripulados (UAV), los cuales representan hoy en día el mayor avance en el área de la aeronáutica civil y militar.

Mediante el presente documento se demuestra que los sensores representan uno de los elementos de mayor importancia para el completo funcionamiento de un vehículo aéreo no tripulado, ya que mediante éstos se adquirieren los datos relevantes para desempeñar la labor asignada. Con el estudio realizado en el presente documento se puede concluir que, la manera más exacta y eficiente de adquirir dichos datos no es emplear el tipo sensor que ostente mayor precisión o exactitud, sino más bien obtener la integración más adecuada de entre varios tipos de sensores y de éste modo superar mutuamente las limitaciones que poseen los sensores al ser empleados individualmente. Tal es el caso del INS (sistema de navegación inercial), el cual utiliza acelerómetros, giroscopios y compás para medir la orientación, velocidad y aceleración del vehículo con mayor eficiencia.

Una integración más avanzada se utiliza en el sistema de navegación de un UAV, en el cual se combina un GPS y un INS a través de una técnica de estimación llamada filtros de kalman con el fin de incrementar al máximo la precisión y reducir al mínimo el error en la medición.

En definitiva, el sistema de sensores en un UAV es una gran combinación de varios tipos de sensores integrados, en el cual resulta de vital importancia lograr el balance perfecto entre todos y cada uno de los sensores para así poder alcanzar resultados netamente satisfactorios a la hora de realizar cualquier tarea que

requiera la utilización de UAV's, ya sea para efectuar tareas de tipo militar o de carácter laboral.

Por otra parte, es claro que los sistemas de sensores y navegación estudiados en el capítulo 2 se emplean en todas y cada una de las aplicaciones que tienen los UAV's. Esto se debe esencialmente a que cualquier tarea (militar o laboral) que se le asigne a un vehículo aéreo no tripulado, por muy simple que sea requiere de una herramienta que le proporcione a la aeronave información en tiempo real sobre las variables de control para así realizar una adecuada navegación hacia su destino. Es decir, que en cualquier tipo de aplicación en la cual se utilice un vehículo aéreo no tripulado, se aplica de manera explícita uno de los conceptos básicos del control automático el cual establece que para poder controlar una variable se debe estar en capacidad de medirla.

Ahora bien, con respecto al impacto que han tenido los UAV's en Colombia, se puede afirmar mediante el estudio del capítulo 4 que el progreso tecnológico se ha visto beneficiado de manera formidable gracias a todo el desarrollo investigativo que implica diseñar y construir una aeronave de éste tipo. Además, el uso de los UAV's en tareas de tipo laboral mejora la sensibilidad de calidad de vida de los colombianos, ya que en aplicaciones como la detección de incendios forestales, monitoreo ambiental y la búsqueda y rescate de personas en catástrofes naturales, se salvan vidas humanas sin arriesgar otras.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rönnbäck, Sven. Tesis: Development of a INS/GPS navigation loop for an UAV. Suecia: Luleå University of Technology, 2000.
<http://epubl.luth.se/1402-1617/2000/081/LTU-EX-00081-SE.pdf>
- [2] Investigadores de la universidad de Medellín, universidad Pontifica Bolivariana y Universidad EAFIT. Presentación: Diseño, implementación y prueba de un sistema de control y navegación para un mini-helicóptero robot – COLIBRÍ. Colombia: Medellín, 2003.
<http://control-systems.net/recursos/material/colibri.pdf>
- [3] Investigadores de la universidad de Medellín, universidad Pontifica Bolivariana y Universidad EAFIT. Propuesta de Proyecto: Diseño, implementación y prueba de un sistema de control y navegación para un mini-helicóptero robot – COLIBRÍ. Colombia: Medellín, 2003.
www.control-systems.net/recursos/material/colibri_colciencias.pdf
- [4] Altung, Erdin. Ostrowski, James. Taylor, Camillo. Tesis: Vision based control of unmanned aerial vehicles with applications to an autonomous four rotor helicopter, quadrotor. Estados Unidos: University of Pennsylvania, 2003.
www2.itu.edu.tr/~altuger/Documents/Papers/Thesis.pdf
- [5] Dittrich, Joerg S. Tesis: Design and Integration of an Unmanned Aerial Vehicle Navigation System. Estados Unidos: School of Aerospace Engineering Georgia Institute of Technology, 2002.
http://controls.ae.gatech.edu/papers/dittrich_msthesis.pdf

- [6] Ramírez González, Alejandro. Fernández Rubio, Juan. Trabajo Investigativo: Integración GPS/INS: Conceptos Y Experimentos. España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2004.
http://gps-tsc.upc.es/comm2/publications/ramirez_ursi04.pdf
- [7] Kwang, Young K. Kang, Jung W. Trabajo Investigativo: Obstacle awareness and collision avoidance radar sensor system for low-altitude flying smart UAV. Corea: Hankuk Aviation University, 2004.
www.ieee.org
- [8] Periódico Hoy No. 5 sobre aplicaciones UAV's. Artículo: Diseñan un avión no tripulado para usos múltiples. Argentina: Córdoba, 2005.
<http://www.prensa.unc.edu.ar/hoylauniversidadpapel/5/numero5-13-03-05.pdf>
- [9] Dino, Jonas. Artículo: El vehículo aéreo inhabitado (uav) proyecto del café. Estados Unidos: NASA, 2004.
www.nasa.gov/lb/centers/ames/spanish/research/lifeonearth/lifeonearth-uavcoffee.html
- [10] Cozzi Paredes, Ruggero. Artículo: La exploración y la evolución de los sensores aéreos. Chile, 1999.
www.revistamarina.cl/revistas/1999/6/cozzi.pdf
- [11] Nuño Ortega, Emmanuel. Basañez Villaluenga, Luis. Trabajo Investigativo: Teleoperación: técnicas, aplicaciones, entorno sensorial y teleoperación inteligente. España: Universidad Politécnica de Cataluña, 2004.
<http://biblioteca.upc.es/reports/ioc/IOC-DT-P-2004-05.pdf>

[12] García Pérez, Alberto. Artículo: UAVs: Vehículos Aéreos No Tripulados. España, 2004.

www.portierramaryaire.com/arts/uav_1.php

[13] Cordoba, Mario Andrés. Proyecto: EL EFIGENIA EJ-1 Una Aeronave Robot de despegue y aterrizaje vertical (S/VTOL) autocontrolada mediante Inteligencia Artificial. Colombia: Universidad del Cauca, 2000.

www.efigenia-aerospace.com

ANEXOS

Abreviaturas

1. ADS-B - Automatic Dependent Surveillance-Broadcast
Traducción: Vigilancia Autónoma Dependiente por Difusión

2. AGL - Above Ground Level
Traducción: Terreno Local

3. AHRS - self-contained Attitude Heading and Reference System
Traducción: Sistema Autónomo de Direccionamiento y Referencia

4. CAN - Control Area Network
Traducción: Red de Control de Área

5. CAR - Collision Avoidance Radar
Traducción: Radar de Evasión de Colisiones

6. CAS - Collision Avoidance System
Traducción: Sistema de Evasión de Colisiones

7. CCD - Charge-Coupled Device
Traducción: Dispositivo de Carga Acoplado

8. DFCC - Digital Flight Control Computer
Traducción: Computador de Control Digital de Vuelo

9. DGPS - Differential Global Positioning System

Traducción: Sistema de Posicionamiento Global Diferencial

10. DSP - Digital Signal Processor

Traducción: Procesador Digital de Señal

11. ECCM - Electronic Counter-Counter Measures

Traducción: Medición de respuesta Electrónica

12. ELOS - Equivalent Level of Safety

Traducción: Nivel Equivalente De Seguridad

13. FAA - Federal Aviation Administration

14. GPS - Global Positioning System

Traducción: Sistema de Posicionamiento Global

15. IMU - Inertial Measurement Unit

Traducción: Unidad de Medida Inercial

16. INU - Inertial Navigation Unit

Traducción: Unidad de Navegación Inercial

INS - Inertial Navigation System

Traducción: Sistema de Navegación Inercial

Nota: El significado de las dos abreviaturas anteriores es el mismo, solo que expresado con otras palabras.

17. LAN - Local Area Network

Traducción: Red de Área Local

18. MAV - Manned Aerial Vehicle

Traducción: vehículo Aéreo Tripulado

19. MIT - Massachusetts Institute of Technology

Traducción: Instituto Tecnológico de Massachusetts

20. MSL - Mean Sea Level

Traducción: Nivel del Mar

21. NASA - National Aeronautics & Space Administration

Traducción: Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio

22. OACAS - Obstacle Awareness and Collision Avoidance System

Traducción: Sistema de Reconocimiento de Obstáculos y Evasión de Colisiones

23. OCAS - Obstacle Collision Avoidance System

Traducción: sistema de Evasión de Colisiones con objetos

24. PID - Tipo de control: Proporcional, Integrador y Derivador

25. PRN – Pseudo Random Number

Traducción: Numero Pseudo Aleatorio

26. PV – Position and Velocity

Traducción: Posición y Velocidad

27. PVA – Position, Velocity and attitude

Traducción: Posición, Velocidad y Orientación

28. RA - Advisory Resolution
Traducción: Aviso de Resolución
29. RCS - Radar Cross Section
Traducción: Sección Transversal de Radar
30. RTCA - Radio Technical Commission for Aeronautics
Traducción: Comisión Radio Técnica para la Aeronáutica
31. SAR - Synthetic Aperture Radar
Traducción: Radar De Apertura Sintético
32. SPS - Stanadar Positionig Service
Traducción: Servicio de Posicionamiento Estándar
33. S/VTOL - Short Vertical Take Off Landing
Traducción: Aterrizaje y Despegue Vertical en Corto
34. TA - Traffic Advisory
Traducción: Aviso de Trafico
35. TCAS - Traffic Alert and Collision Avoidance System
Traducción: Sistemas de Alarma de Trafico y Evasión de Colisión
36. UAV - Unmanned Aerial Vehicle
Traducción: Vehiculo Aéreo no Tripulado

37. UHF - Ultra High Frecuency

38. UNC - University of North California

Traducción: Universidad del Norte de California

39. VTOL - Vertical Take Off Landing

Traducción: Aterrizaje y Despegue Vertical