

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO

TRABAJO FIN DE GRADO

**CONTROL DE UN SIMULADOR DE VUELO
CON UN AUTOPILOTO EXTERNO**

Autor:

Eduardo Lopez Baeza

Tutor:

Joan Vila Carbó

1 de septiembre de 2016

Índice

1. Introducción	1
1.1. Motivaciones	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Especificaciones	1
2. Fundamentos teóricos	2
2.1. Guiado Horizontal	2
2.2. Guiado Vertical	4
3. Diseño	5
3.1. Control	6
3.2. Guiado	12
3.3. Seguimiento	14
4. Implementación: Diseño de la “interfaz” gráfica	15
4.1. Comunicación	16
4.2. Control	16
4.3. Guiado	17
4.4. Seguimiento	18
5. Resultados	19
5.1. Aterrizaje en LEVC 30	20
5.2. Aterrizaje en LEVC 12	21
5.3. Ascenso – Despegue por LEVC RWY 12	22
5.4. Caso “límite”	23
6. Conclusiones	24
6.1. Propuestas de ampliación	24
7. Presupuesto	25
7.1. Coste de personal	25
7.2. Coste de equipos y software	25
7.3. Costes indirectos	26
7.4. Coste Total	26
8. Bibliografía	27
9. Referencias	27

1. Introducción

1.1. Motivaciones

Con el gran desarrollo actual de las aeronaves no tripuladas y su gran cantidad de posibles aplicaciones, tales como tareas de vigilancia, agricultura, transporte, etc., surge la necesidad de un software que permita la realización de tareas sistemáticas como las descritas, sin necesidad de un pilotaje manual.

1.2. Objetivos

El objetivo de este trabajo de fin de grado es, originalmente, el desarrollo de una interfaz para el control de aeronaves que permita a usuarios sin conocimientos de pilotaje o mecánica de vuelo controlar una aeronave o UAV, guiar durante el aprendizaje a un piloto, o permitir que una aeronave realice trabajos predefinidos sin necesidad de supervisión continua. Para que ello sea posible es necesario que la aplicación venga acompañada de una interfaz gráfica sencilla, eficiente e intuitiva para que el usuario tenga fácil acceso a los controles y a la toma de decisiones.

Pero, más allá del propio resultado del trabajo, el objetivo último de este proyecto es ampliar y profundizar los conocimientos de su autor sobre temas relacionados con el control automático, la programación y la navegación, así como sobre los sistemas críticos y la complejidad de controlar de forma fiable múltiples variables al mismo tiempo.

El presente trabajo se centrará en el desarrollo en las maniobras de ascenso y descenso, críticas a la hora de despegar y aterrizar de manera automática, aunque también se implementará un control horizontal simple que podría ser desarrollado en futuros proyectos.

1.3. Especificaciones

La aplicación se ha programado en lenguaje **Matlab**, lenguaje muy empleado en aeronáutica debido a su gran capacidad de procesamiento de grandes cantidades de datos.

El control se ha diseñado sobre el simulador de vuelo **X-plane** y en la resolución de ecuaciones complejas se ha empleado el robot matemático **Mathematica**.

La aeronave de diseño elegida ha sido la **Cessna-172**, aeronave monomotor de ala alta y tamaño mediano y uno de los modelos más fabricados de la historia, dada la facilidad de acceso a sus datos básicos, tales como peso, coeficientes de vuelo, características del empuje, etc.

2. Fundamentos teóricos

Las funciones básicas de un FMS (*Flight Management System*) son las siguientes:

- **Navegación:** Estima de la forma más aproximada posible los datos sobre el estado actual de la aeronave (posición, actitud, velocidad, etc.)
- **Planeo de rutas:** Permite a la tripulación establecer rutas específicas.
- **Predicción de la trayectoria:** Calcula los perfiles aproximados teniendo en cuenta la ruta establecida completa.
- **Cálculos de funcionamiento:** Suministra a la tripulación información de funcionamiento, como límites de vuelo, consumo de combustible, etc.
- **Guiado:** Genera controles para dirigir a la aeronave a lo largo de los perfiles horizontales y verticales calculados.

Seguidamente se describen con mayor amplitud los aspectos más significativos relativos al guiado, tanto horizontal como vertical.

2.1. Guiado Horizontal

Como ya se ha comentado, el objetivo del guiado es proporcionar parámetros de forma dinámica para seguir un perfil determinado previamente.

A la hora de generar el guiado horizontal en el plano vertical se cuenta con dos estrategias:

- i. La primera y más simple es el guiado directo hacia una posición concreta o “*waypoint*”. Es el método de navegación más sencillo.
- ii. La segunda opción, y más compleja, consiste en conseguir que la aeronave siga un camino previamente definido en el plano.

Si bien el presente trabajo no profundiza en el desarrollo del guiado horizontal, ya que no es su objetivo, sin embargo debe considerarse un punto digno de mención. En su tesis "*Algorithms for Motion Planning and Target Capturing*", Mangal Kothari propone una ley de guiado basada en dos términos:

- el primero debe ocuparse de que la aeronave mantenga el rumbo correcto, y
- el segundo, se ocupará de que el rumbo se ajuste al camino establecido.

Esta es una forma efectiva que se adaptará más tarde para el desarrollo de la ley de guiado vertical.

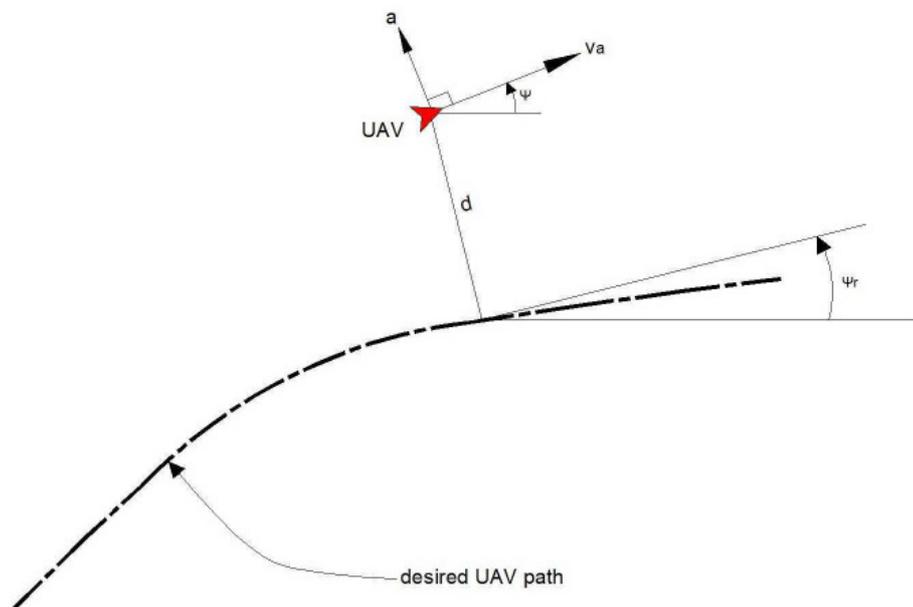


Ilustración 1. Mangal Kothari: "*Algorithms for Motion Planning and Target Capturing*"

2.2. Guiado Vertical

El guiado vertical proporciona los controles del empuje y los elevadores para realizar, según la arquitectura, los objetivos de velocidad, empuje, altitud o velocidad vertical establecidos.

De las formas de guiado vertical empleadas actualmente en aviación, el presente trabajo se ha centrado en las dos siguientes:

- La primera es el **guiado geométrico**, que consiste en dirigir la aeronave siguiendo un camino en línea recta hasta unas coordenadas - objetivo. Al pasar por las coordenadas se requerirá una precisión mayor o menor, dependiendo de la fase del vuelo y de su criticidad, con tolerancias elevadas a gran altitud y más reducidas durante las fases de aproximación y aterrizaje.

Durante las trayectorias realizadas con este procedimiento se controla la aeronave para que se ajuste a un camino geométrico o "*Vpath*" y lo realice, si es posible, a una velocidad también definida.

- El segundo procedimiento es el **ascenso o descenso a velocidad constante**. En este procedimiento la importancia de la trayectoria es menor. Se pretende que la aeronave alcance la altitud del objetivo antes de cruzarlo, pero no se determina con qué velocidad ni en qué punto. Durante este tramo el piloto puede elegir una velocidad de vuelo y/o velocidad de ascenso, dentro de las posibilidades de la aeronave, siempre que cumpla el objetivo de llegar a la altitud deseada antes de atravesar el "*waypoint*".

Generalmente los ascensos y descensos se componen de tramos que alternan estos dos procedimientos de guiado.

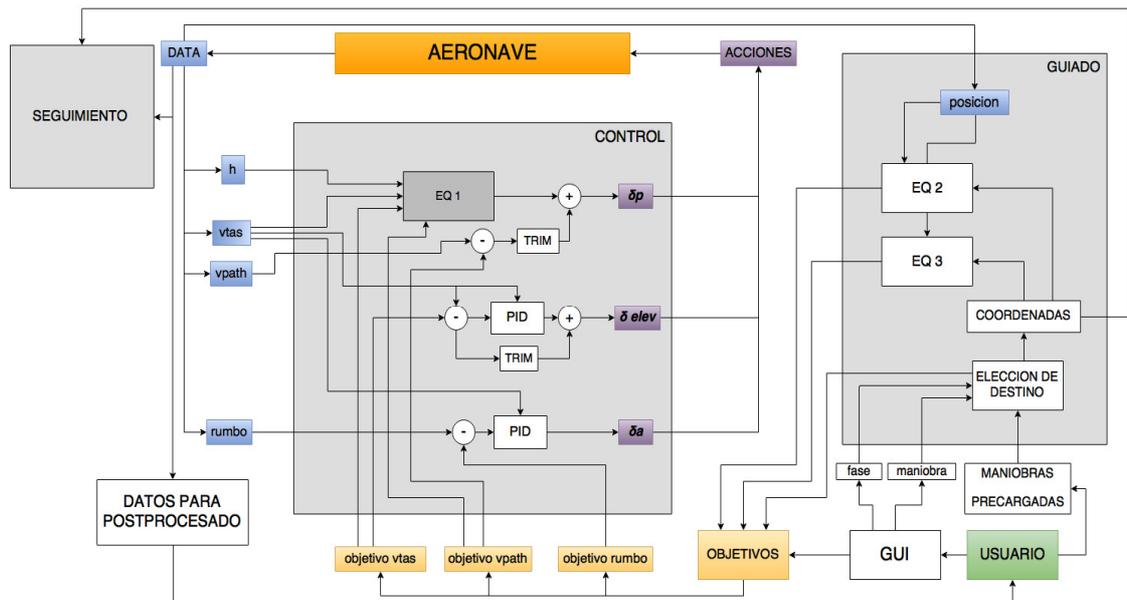
3. Diseño

La aplicación contará con tres módulos diferenciados:

- Control
- Guiado
- Seguimiento

Los dos primeros módulos serán destinados al manejo de la aeronave, mientras que el último tendrá un carácter puramente informativo, siendo capaces de funcionar de manera independiente a elección del usuario, aunque el objetivo es que funcionen de manera simultánea, cooperando entre sí.

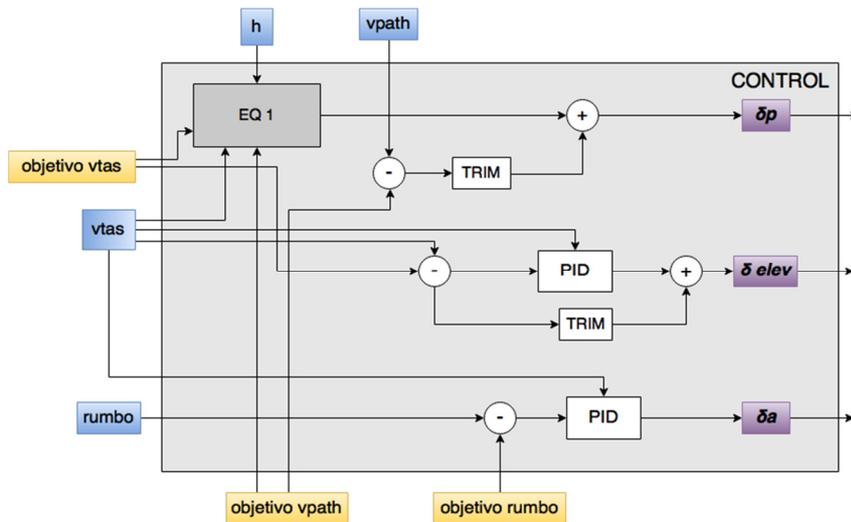
Seguidamente se muestra un diagrama representativo de la estructura descrita:



3.1. Control

Este módulo es el más importante, ya que es el encargado de controlar las superficies de la aeronave para que realicen las maniobras deseadas, al mismo tiempo que mantiene la aeronave en el aire.

Seguidamente se muestra un diagrama representativo:



El modelo de control elegido es el denominado “**Total-Energy Model**” propuesto por la Base of Aircraft Data (BADA) de EUROCONTROL. El modelo relaciona el trabajo realizado por las fuerzas que actúan sobre la aeronave con el aumento de energía potencial y cinética, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$(Thr - D) \cdot V_{TAS} = mg_0 \frac{dh}{dt} + mV_{TAS} \frac{dV_{TAS}}{dt}$$

La mencionada base BADA incluye asimismo una serie de coeficientes que permiten modelar el comportamiento de la aeronave en el aire, como se describe a continuación:

- **Constantes**

$T_0 = 288.15;$	$g = 9.80665;$
$p_0 = 101325;$	$\kappa = 1.4;$
$\rho_0 = 1.225;$	$R = 287.0587;$
$a_0 = 340.294;$	$\beta_t = -0.0065;$

- **Modelo atmosférico**

$$T = T_0 + \Delta T + \beta t * h m;$$

$$p = p_0 * ((T - \Delta T) / T_0)^{-g / (\beta t * R)}$$

$$\rho = p / (R * T);$$

$$a = \text{Sqrt}[\kappa R T];$$

- **Comportamiento aerodinámico:** CD, CL, Resistencia Aerodinámica

$$C_L = \frac{2 \cdot m \cdot g_0}{\rho \cdot V_{TAS}^2 \cdot S \cdot \cos \phi}$$

$$C_D = C_{D0,CR} + C_{D2,CR} \times (C_L)^2$$

$$D = \frac{C_D \cdot \rho \cdot V_{TAS}^2 \cdot S}{2}$$

- **Masas:** de referencia, máxima al despegue

m_{min}	- minimum mass
m_{max}	- maximum mass
m_{ref}	- reference mass
m_{pyld}	- maximum payload mass

- **Dominio de vuelo:** altura máxima, velocidad máxima, velocidad de entrada en pérdida

V_{MO}	-	maximum operating speed (CAS) [kt]
M_{MO}	-	maximum operational Mach number
h_{MO}	-	maximum operating altitude [ft] above standard MSL
h_{max}	-	maximum altitude [ft] above standard MSL at MTOW under ISA conditions (allowing about 300 ft/min of residual rate of climb)

- **Modelo del empuje del motor:**

$$\text{Jet: } (\text{Thr}_{\text{max climb}})_{\text{ISA}} = C_{\text{Tc},1} \times \left(1 - \frac{H_p}{C_{\text{Tc},2}} + C_{\text{Tc},3} \times H_p^2 \right)$$

$$\text{Turboprop: } (\text{Thr}_{\text{max climb}})_{\text{ISA}} = \frac{C_{\text{Tc},1}}{V_{\text{TAS}}} \times \left(1 - \frac{H_p}{C_{\text{Tc},2}} \right) + C_{\text{Tc},3}$$

$$\text{Piston: } (\text{Thr}_{\text{max climb}})_{\text{ISA}} = C_{\text{Tc},1} \times \left(1 - \frac{H_p}{C_{\text{Tc},2}} \right) + \frac{C_{\text{Tc},3}}{V_{\text{TAS}}}$$

Una vez finalizados todos los cálculos pertinentes, la ecuación quedaría definida como se describe seguidamente:

$$0.44704 (-1.8 \text{ Drag} + \text{Thr}) \text{vtas} = 4625.08 \text{vtas} \tan \left[\frac{\pi \text{vpath}}{180} \right]$$

donde

Drag:

$$6.58557 \times 10^{-11} (288.15 - 0.0019812 h)^{4.25577} \left(0.0153 + \frac{1.02672 \times 10^{27}}{(288.15 - 0.0019812 h)^{8.51155} \text{vtas}^4} \right) \text{vtas}^2$$

Empuje (Thr):

$$0.95 \left(2116.7 \left(1 - \frac{h}{28192} \right) + \frac{8824}{\text{vtas}} \right) \delta p$$

De este modo, el resultado de la ecuación viene definido por tres variables:

- Velocidad ($vtas$)
- Empuje (δp)
- Velocidad de ascenso, que queda sustituida por el ángulo de ascenso

Sin considerar otras superficies como flaps, slats o spoilers, se dispone de dos inputs independientes disponibles para variar el desplazamiento en el plano vertical:

- los elevadores
- la palanca de gases

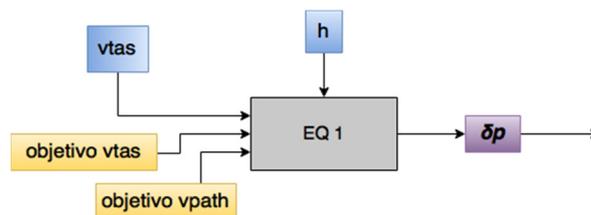
Estos dos elementos permiten controlar dos de las tres variables definidas anteriormente, obteniendo la tercera variable al resolver la ecuación.

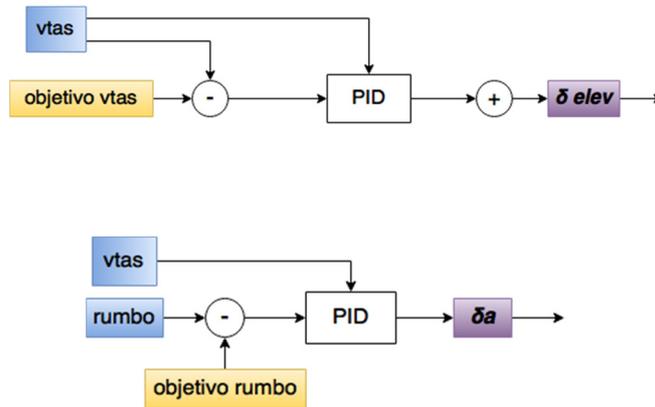
Ya que el objetivo deseado es la definición de la trayectoria vertical, se fijará la velocidad y el ángulo de ascenso deseados, despejando de la ecuación la posición de la palanca de gases necesaria en función de la altitud de vuelo.

Una vez fijado el empuje, se controlará la velocidad a través de los elevadores, mediante un controlador proporcional, obteniendo al mismo tiempo el ángulo de ascenso o descenso deseado.

Para añadir la tercera dimensión, el rumbo se controlará a través de los alerones, mediante un controlador también proporcional, simple pero más que suficiente para el correcto funcionamiento de la aplicación.

De este modo, el esquema de control, funcionando en bucle abierto, queda como se describe a continuación:



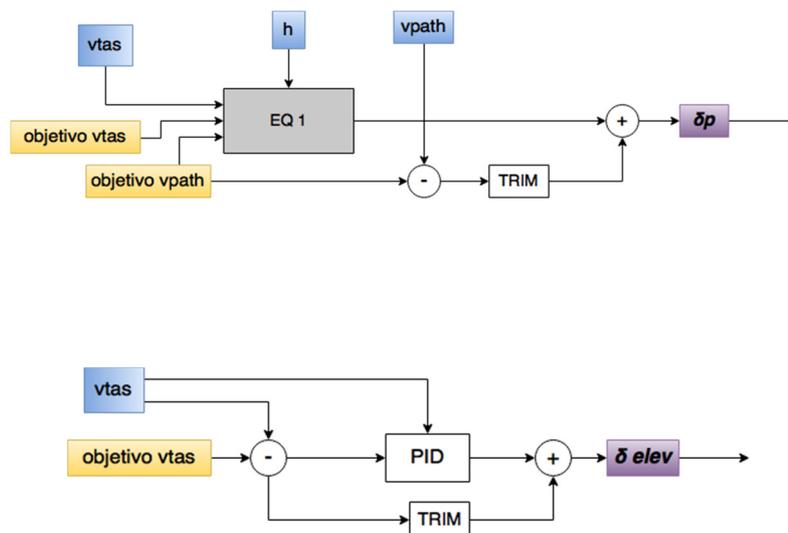


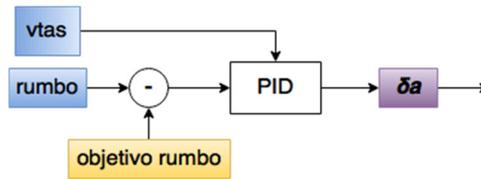
Los resultados obtenidos en primera instancia podrían valorarse como satisfactorios, encontrándose en los siguientes rangos:

- entre 0 y -3 mph para la velocidad
- entre 2 y -2 grados para la pendiente de ascenso/descenso

No obstante, aun siendo aceptable el error observado en la velocidad, el error en el ángulo distaría del requerido por una aplicación de precisión, considerando además que quedaría incrementado residualmente por el error en la velocidad.

Para resolver el problema de la precisión, se ha implementado el bucle cerrado, permitiendo ajustar ligeramente los inputs en función del error en la posición, quedando el módulo de control como se muestra a continuación:



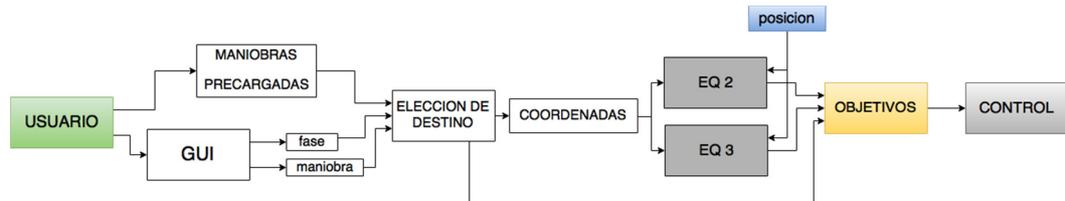


De este modo, el bucle cerrado, aunque incrementa el tiempo de estabilización, permite unos resultados mucho más satisfactorios, obteniendo errores despreciables tanto para la velocidad como para el ángulo de ascenso/descenso, como se observa en los resultados adjuntos:

Send	In	Real	Target
Vtas	<input type="text"/>	104.977	105
Vpath	<input type="text"/>	-3.7749	-3.7714E
Heading	<input type="text"/>	19.8129	19.6143

3.2. Guiado

Una vez establecida la forma de controlar la aeronave a través de requerimientos (velocidad, ángulo y rumbo objetivo), el siguiente paso consistirá en manejar estas variables para que la aeronave realice los procedimientos deseados. De esto se encargará el módulo de guiado, cuyo esquema se describe seguidamente:



Efectivamente, el módulo de guiado es el encargado de cargar las distintas maniobras programadas por el usuario mediante puntos en el espacio (“waypoints”). Para poder usarlo, el usuario deberá definir previamente en una hoja Excel una lista de maniobras, compuestas por puntos, junto con su **nombre**, **latitud**, **longitud**, **altitud** y la **velocidad** a la que se desea que se recorra ese tramo, con la siguiente estructura:

Nombre	nº de waypoints	NombreWP	Lat	Lon	Alt	Vtas
Aterrizaje LEVC RWY 30	5	IF	N039°24' 28.00"	W000°16' 0.500"	2500	120
		Pre-FAF	N039°26' 15.00"	W000°20' 47.00"	1800	110
		FAF	N039°26' 50.00"	W000°22' 16.00"	1800	95
		ILS	N039°28' 56.80"	W000°27' 48.87"	300	95
		Aterrizaje	N039°29' 45.15"	W000°30' 0.52 "	170	0

Al elegir una de las maniobras precargadas, el usuario podrá ver todos los puntos descritos y elegir a cuál quiere dirigirse, o bien realizar el recorrido completo punto por punto.

Este módulo puede funcionar independientemente del resto, con la posibilidad de usarlo en modo manual para guiar al piloto, pero su mayor potencial se obtiene cuando funciona conjuntamente con el módulo de control.

El módulo cuenta asimismo con maniobras especiales tales como, por ejemplo, un aterrizaje automático o realizar tareas en bucle.

La aeronave considerará que ha llegado a uno de los puntos cuando se encuentre a una distancia (r) que el usuario puede definir desde la interfaz gráfica. Ajustando este parámetro, el paso por los “waypoints” se puede ajustar a procedimientos “fly-over” para distancias pequeñas y procedimientos “fly-by” para distancias más grandes.

Cuando el módulo de control y el de guiado están activos al mismo tiempo, el usuario pierde la capacidad de actuación sobre el módulo de control y es el módulo de guiado el que envía las órdenes y los objetivos. En relación con ello, debe recordarse que las órdenes que el módulo de control debe recibir son: rumbo, ángulo de ascenso/descenso y velocidad.

El módulo de guiado utiliza la **función de Vincenty** para calcular la distancia y el rumbo entre la aeronave y su próximo objetivo. La velocidad del tramo ya está definida en la trayectoria, por lo que sólo resta calcular el rumbo y el ángulo de ascenso.

Como se ha comentado en apartados anteriores, el guiado se divide en dos partes, por un lado, el guiado horizontal y, por otro, el vertical.

Para el guiado horizontal se utiliza una estrategia “*Track to fix*”: simplemente se dirige la aeronave hacia las coordenadas – objetivo, sin reparar en que siga un camino prediseñado, lo que es más que suficiente para cumplir con los objetivos. La ley de guiado horizontal quedaría así:

$$\text{Rumbo deseado} = \text{Rumbo calculado}$$

Para el guiado vertical se requiere una mayor precisión, lo que precisa una navegación más exigente. En este caso, se requerirá que la aeronave no solo pase por los puntos indicados, sino que siga un camino en línea recta entre puntos, lo que permite un mayor control sobre la trayectoria descrita por la aeronave, así como una mayor precisión en condiciones de viento. La ley de control contará, como ya se mencionó en un apartado anterior, con dos términos, uno para determinar el rumbo correcto y otro que ajuste el camino recorrido, como se muestra seguidamente:

$$\text{Angulo deseado} = \text{Angulo geometrico} + \text{Constante} * \text{Error en altura}$$

$$\text{Angulo deseado} = \arctg\left(\frac{h_2 - h_a}{r_a}\right) + K * \frac{(h_2 - h_1) * (r - r_a)}{r}$$

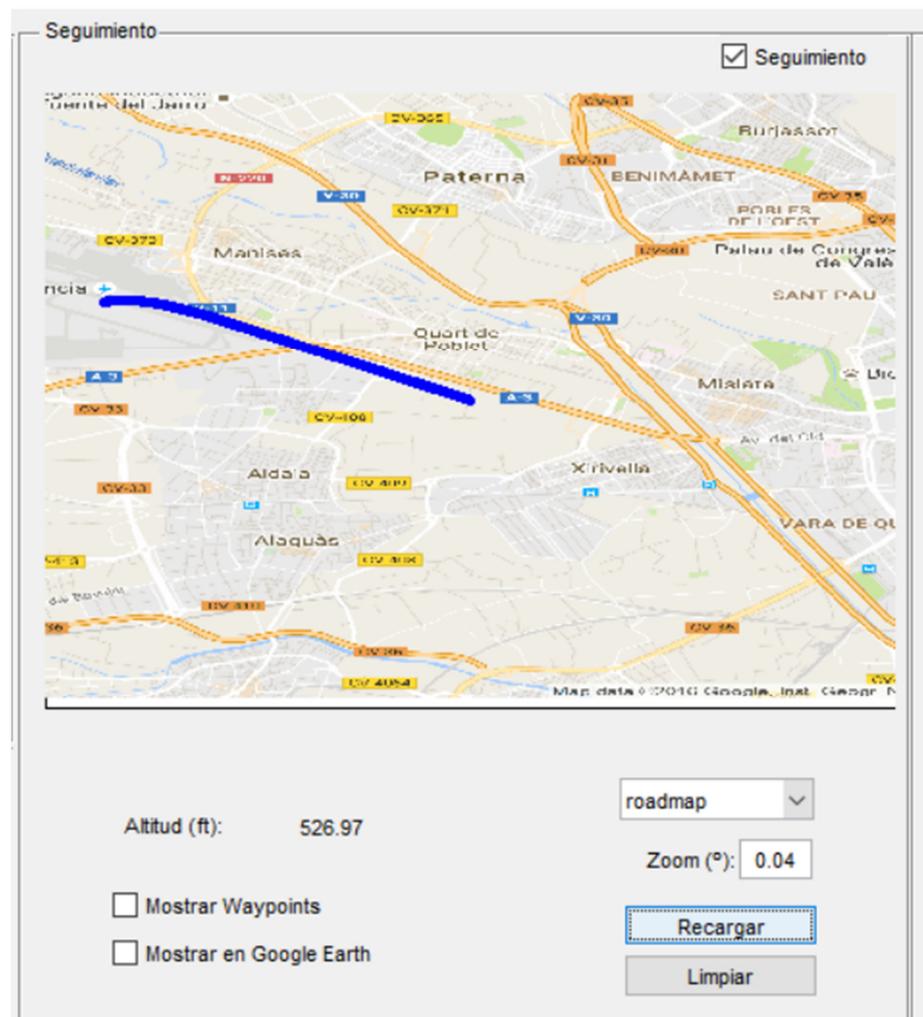
3.3. Seguimiento

El módulo de seguimiento tiene una función exclusivamente de supervisión, y pretende ser un complemento para las otras dos, así como una forma de registrar los movimientos de la aeronave o una ayuda a la navegación en condiciones de baja visibilidad.

Este módulo dispone de una pantalla en la que se muestra una captura obtenida desde *Google Maps*, mostrando la aeronave y su trayectoria. Tanto el zoom como el tipo de mapa (carreteras, satélite...) es fácilmente ajustable.

También muestra en tiempo real las coordenadas LLA del vehículo.

Si se utiliza conjuntamente con el módulo de guiado se pueden representar los *waypoints* sobre el mapa, de manera que resulte más sencillo controlar el correcto recorrido de la trayectoria buscada:



4. Implementación: Diseño de la “interfaz” gráfica

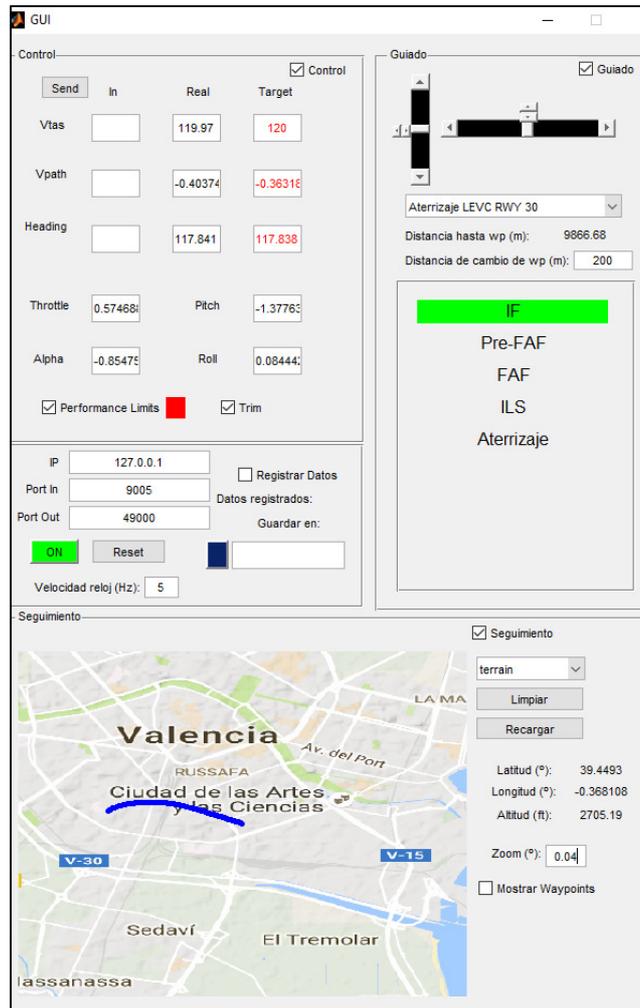


Ilustración 2. Interfaz Gráfica de la aplicación

Una vez diseñado el sistema hay que implementarlo, para lo que, como se ha mencionado anteriormente, se ha empleado el entorno “Matlab”.

La comunicación entre el simulador y Matlab se realizará a través de un conjunto de librerías provistas por la ETSID, que proporciona todos los “*datarefs*” necesarios y los almacena en una variable “*struct*”.

Cada ciclo se recorre según el esquema de control, tal y como se ha mostrado anteriormente. Para que el usuario tenga un acceso rápido e intuitivo se ha diseñado una interfaz gráfica que integra los módulos anteriormente citados.

Los diferentes módulos se pueden activar y desactivar a elección del usuario para compatibilizarlo, por ejemplo, con un control manual, o si tan solo se desea acceder a una parte de la utilidad de la aplicación.

4.1. Comunicación

Este módulo permite introducir los puertos de comunicación con el simulador; encender o apagar el bucle de control, resetear la interfaz o modular la frecuencia de ejecución del bucle. También permite almacenar todos los datos en un archivo a elegir para su post-procesado.

Una vez activo el bucle, no se podrá modificar la información del cuadro hasta que no se vuelva a detener.

IP	127.0.0.1	<input type="checkbox"/> Registrar Datos
Port In	9005	Datos registrados:
Port Out	49000	Guardar en:
<input type="button" value="ON"/>	<input type="button" value="Reset"/>	<input type="text"/>
Velocidad reloj (Hz):	5	

Ilustración 3. Interfaz Gráfica de Comunicación

4.2. Control

Con el guiado desactivado, el bloque de control permite introducir los valores - objetivo de forma manual.

Este módulo contiene los valores de control y muestra otras variables de interés aeronáutico, como el “empuje” o la “actitud”. También permite activar o desactivar suplementos de control como el “trimado”.

	Send	In	Real	Target
Vtas	<input type="text"/>		119.97	120
Vpath	<input type="text"/>		-0.40374	-0.36318
Heading	<input type="text"/>		117.841	117.838
Throttle	<input type="text" value="0.57468"/>		Pitch	<input type="text" value="-1.37763"/>
Alpha	<input type="text" value="-0.85475"/>		Roll	<input type="text" value="0.08444"/>

Control
 Performance Limits ■ Trim

Ilustración 4. Interfaz Gráfica de Control

4.3. Guiado

En el bloque de guiado se pueden seleccionar las trayectorias cargadas desde la hoja Excel, anteriormente descrita. Si, además, se encuentra activado el bloque de control, la interfaz tomará el control de la aeronave.

El bloque posee adicionalmente unas crucetas que permiten a un piloto, actuando en modo manual, conocer la dirección de su próximo objetivo.

Simplemente actuando con el cursor sobre uno de los “waypoints”, se puede cambiar el objetivo del guiado.

Además, la aplicación muestra la distancia hasta el proximo objetivo y permite elegir la distancia de cambio de objetivo, es decir, la distancia a la que la aplicación debe considerar que ha llegado al punto designado, migrando automáticamente al siguiente objetivo.

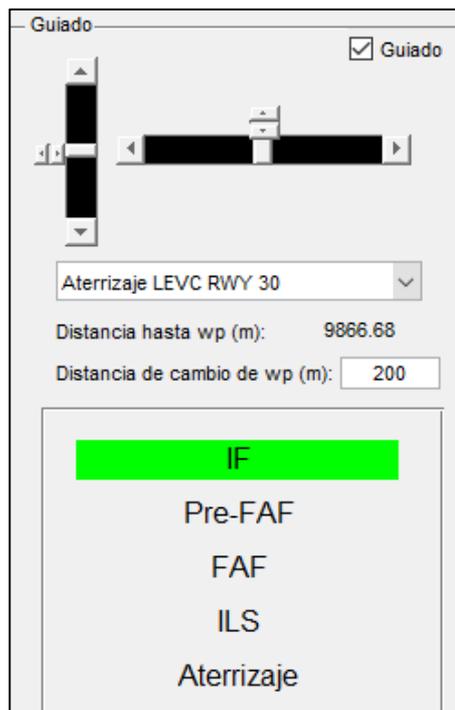


Ilustración 5. Interfaz Gráfica de Guiado

4.4. Seguimiento

Por último, el bloque de seguimiento muestra un mapa con la posición y recorrido actuales de la aeronave, permitiendo, además, variar el valor del “zoom” según se requiera mostrar más terreno o mayor detalle.

Adicionalmente, con una trayectoria activada, se puede “plotear” la posición de los “waypoints” en el mapa.

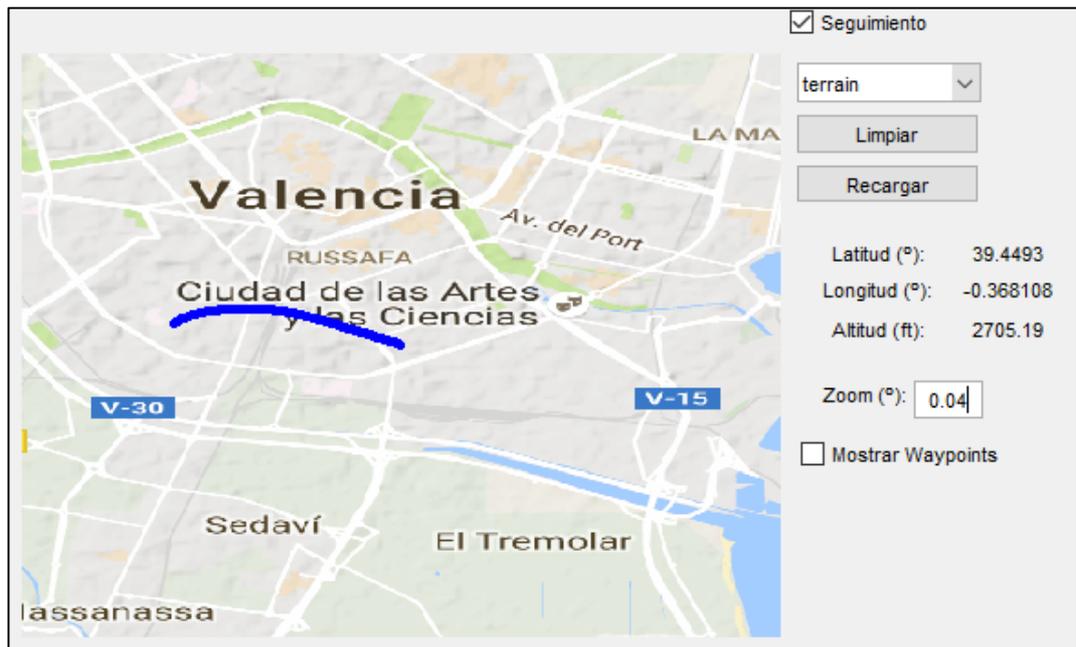


Ilustración 6. Interfaz Gráfica de Seguimiento

5. Resultados

A continuación se muestran los perfiles de velocidad y de altura obtenidos para tres diferentes maniobras programadas:

1. Aterrizaje en LEVC 30
2. Aterrizaje en LEVC 12
3. Despegue por LEVC RWY 12

En las gráficas se muestran los valores – objetivo (en azul) frente a los valores reales (en rojo), con resultados altamente satisfactorios.

Adicionalmente, se muestra el resultado de un caso en el que se pone al límite la aplicación, donde se puede observar que, a pesar de que funciona con gran precisión, se produce un fallo si se pide a la aeronave que realice maniobras por encima de sus especificaciones.

5.1. Aterrizaje en LEVC 30

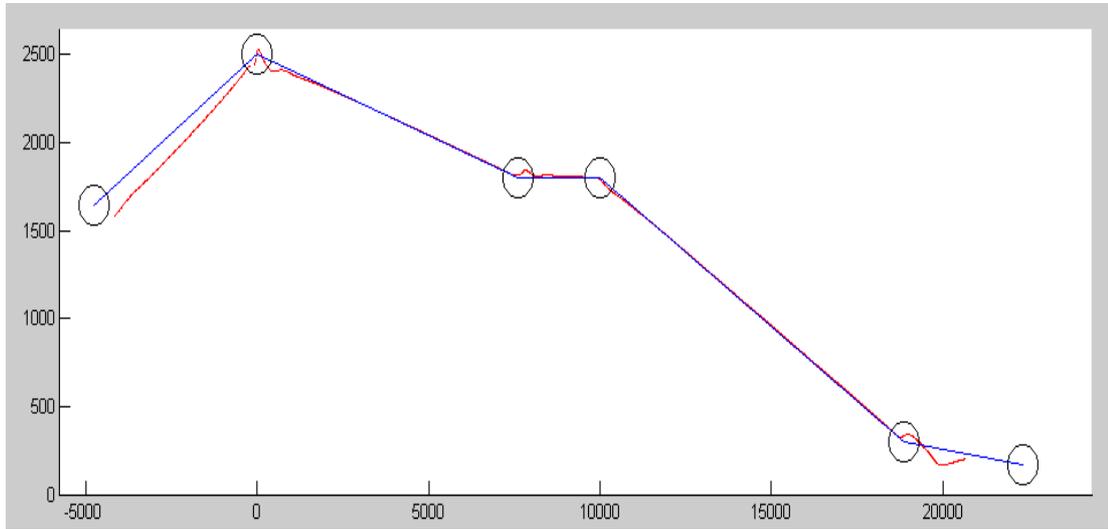


Ilustración 7. Perfil vertical – Altura (ft) vs Distancia recorrida (m)

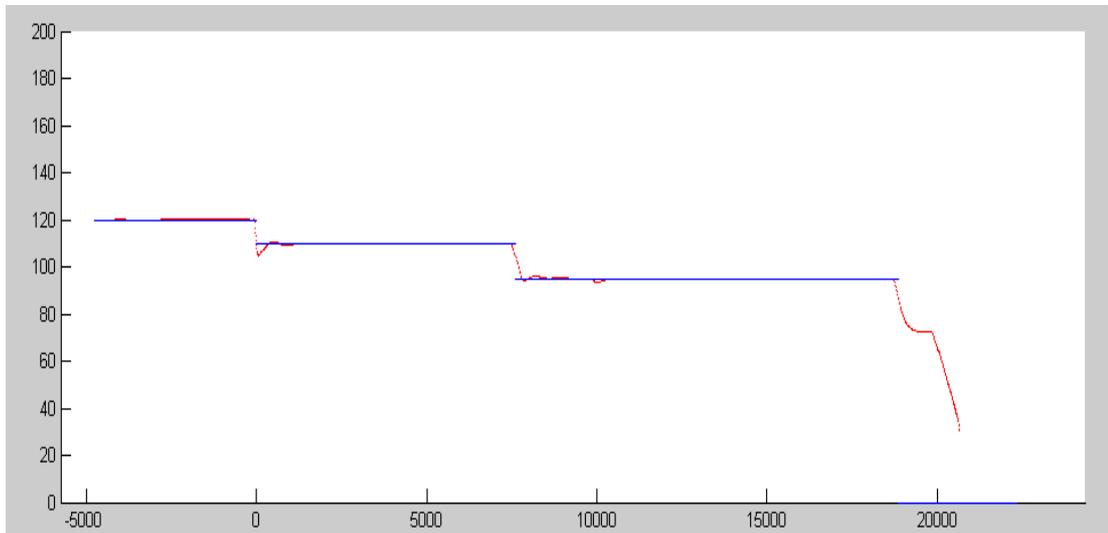


Ilustración 8. Perfil de velocidad - Velocidad verdadera (mph) vs Distancia recorrida (m)

5.2. Aterrizaje en LEVC 12

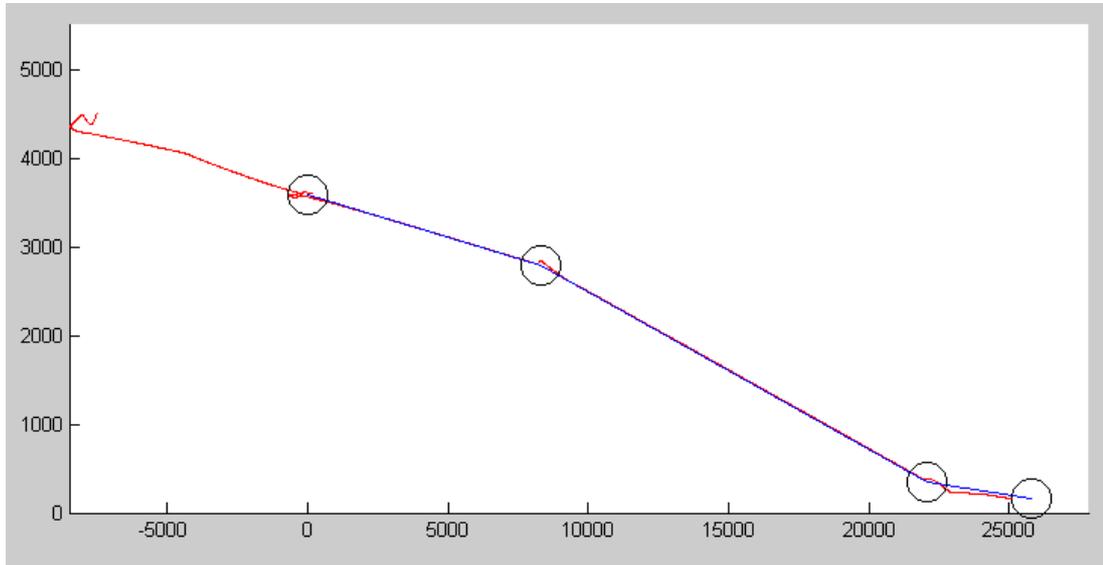


Ilustración 9. Perfil vertical – Altura (ft) vs Distancia recorrida (m)

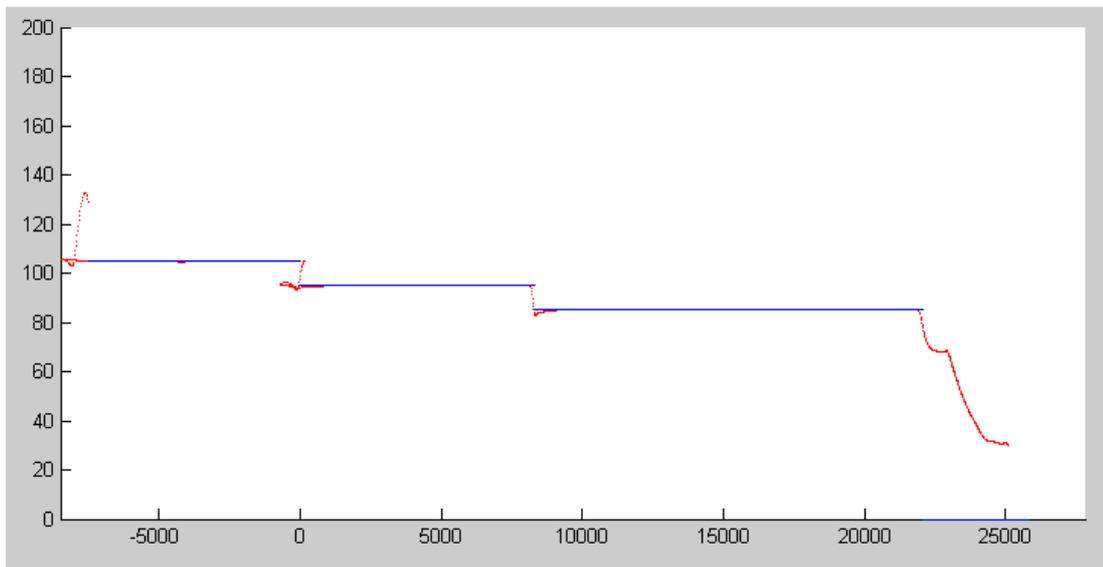


Ilustración 10. Perfil de velocidad - Velocidad verdadera (mph) vs Distancia recorrida (m)

5.3. Ascenso – Despegue por LEVC RWY 12

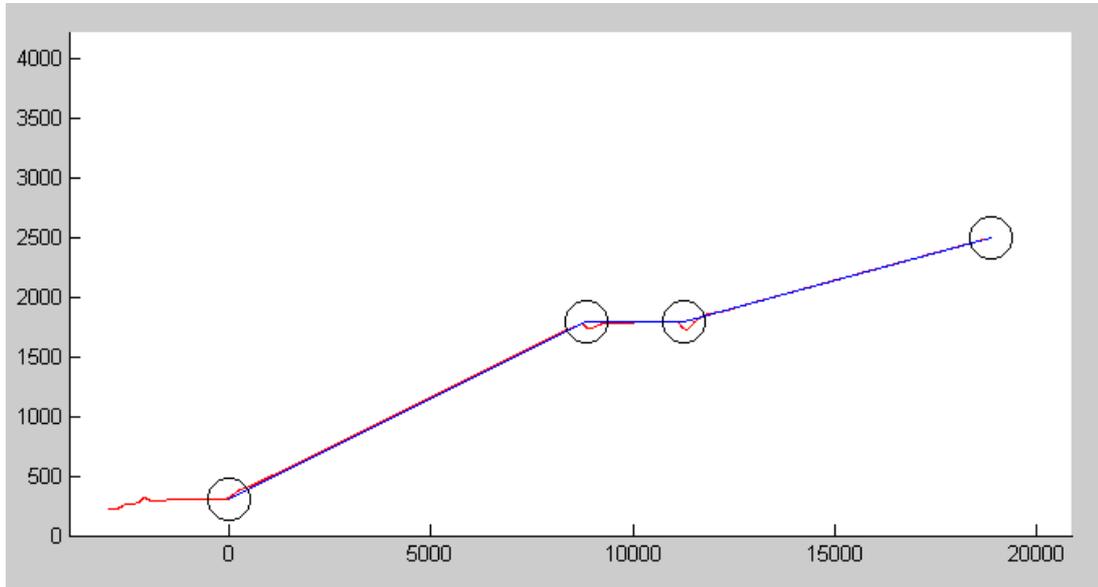


Ilustración 11. Perfil vertical – Altura (ft) vs Distancia recorrida (m)

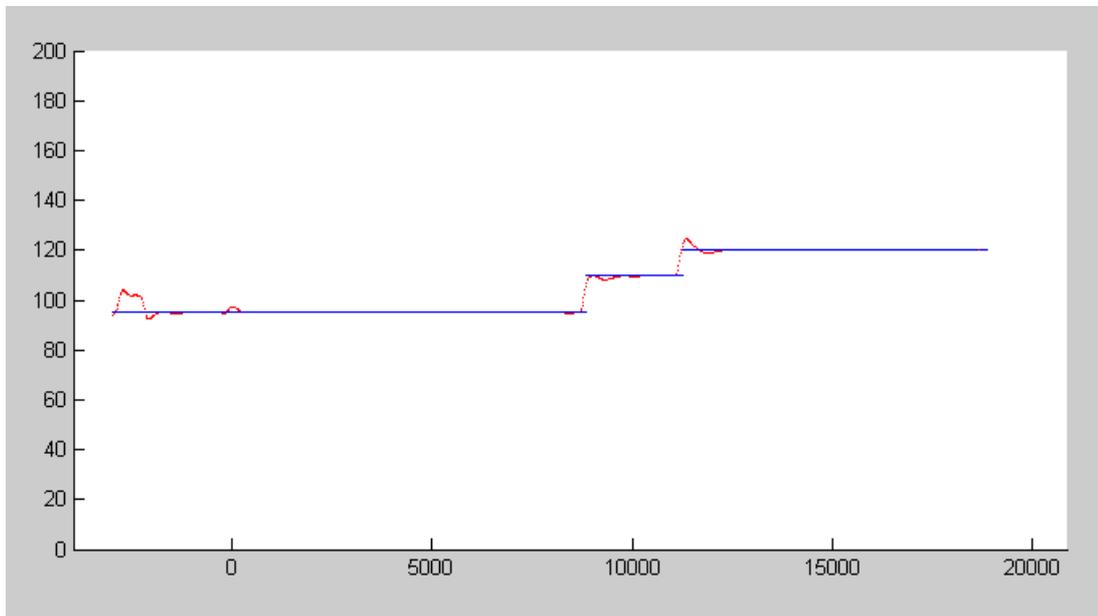


Ilustración 12. Perfil de velocidad - Velocidad verdadera (mph) vs Distancia recorrida (m)

5.4. Caso "límite"

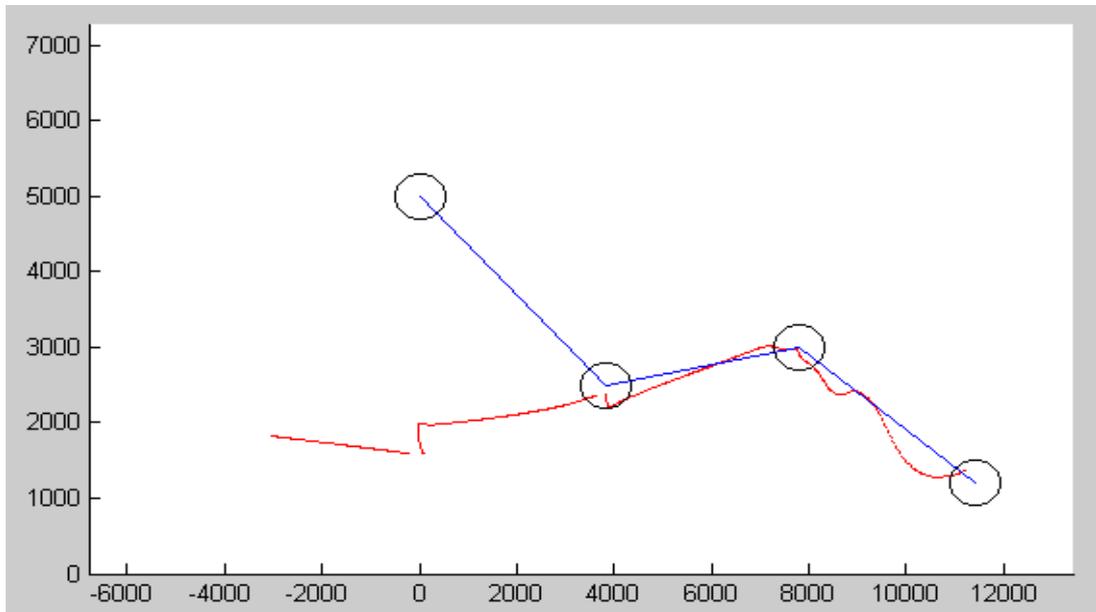


Ilustración 13. Perfil vertical - Altura (ft) vs Distancia recorrida (m)

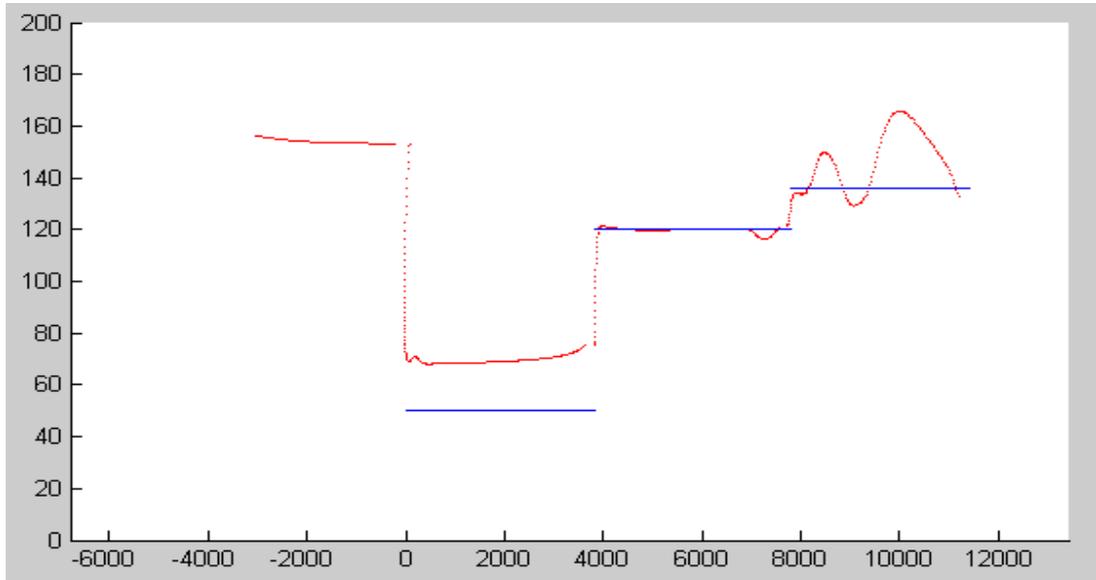


Ilustración 14. Perfil de velocidad - Velocidad verdadera (mph) vs Distancia recorrida (m)

6. Conclusiones

La principal conclusión a la que se llega es que, a pesar de la gran complejidad de mantener y dirigir una aeronave en el aire, no son necesarios grandes computadores ni algoritmos extremadamente complicados para llevarlo a cabo. Unas leyes sencillas pero sólidas de guiado y control pueden ser más que suficientes para obtener unos resultados excelentes.

Sin embargo, a la hora de diseñar un sistema crítico como el anterior, si se quisiera llegar a poner en funcionamiento, se requiere un desarrollo crítico de precisión, eficiencia y gestión de errores, y no olvidar ninguna variable a tener en cuenta.

Por otra parte, es necesario que el contenido sea accesible para el público al que va dirigido. En el caso del presente trabajo, el “usuario” de diseño elegido disponía de escasos conocimientos en aeronáutica, por lo que la aplicación debía ser clara e intuitiva y guiar al usuario durante su funcionamiento.

En general, puede decirse que el resultado del proyecto ha superado ampliamente las expectativas en cuanto a objetivos y precisión.

6.1. Propuestas de ampliación

Aunque funcional, la aplicación diseñada podría ampliarse en determinados aspectos, por lo que se proponen distintos proyectos de mejora, como podrían ser los siguientes:

- ✓ Modelado de los movimientos en el plano horizontal
- ✓ Adaptación para un correcto funcionamiento con otros tipos de aeronave
- ✓ Análisis y mejora de los mecanismos de control y aumento de su complejidad, teniendo en cuenta factores integrales y derivativos
- ✓ Gestión de errores
- ✓ Gestión de los límites de actuación de la aeronave

7. Presupuesto

El coste total del proyecto se divide en el coste de personal, el coste de equipos y software y los costes indirectos asociados.

7.1. Coste de personal

En función del tiempo de trabajo requerido. Se ha estimado un coste de 15 euros por hora para el trabajo realizado por el autor y de 30 euros por hora para el trabajo del profesor tutor y/o cotutores. La duración del proyecto ha sido de 2 meses, trabajando una media de 25 h semanales, por lo que se estima una dedicación total de 200 h de trabajo del autor. El tiempo empleado en tutorías se estima en 10 horas.

Consecuentemente, el cálculo del coste de personal del proyecto arroja el siguiente valor:

Concepto	Horas	Coste/hora (€)	Precio total (€)
Autor	200	15	3.000
Tutoría	10	30	300
Total	210		3.300

7.2. Coste de equipos y software

Seguidamente se muestra el gasto de amortización de los equipos y el gasto en licencias de software:

Equipo/Licencia	Periodo de amortización	Coste Total (€)	Periodo de utilización	% de uso en el proyecto	Coste en el proyecto (€)
PC y Hardware	60 meses	1.000	2 meses	100%	33
Licencia Estudiante Matlab	-	83	2 meses	80%	83
Licencia Estudiante Mathematica	-	154	2 meses	5%	154
Software X-Plane 10	-	84	2 meses	65%	84
Microsoft Office	-	69	2 meses	15%	69
Total					423

7.3. Costes indirectos

Son aquellos gastos que no son directamente dependientes del alcance y contenido del proyecto, pero que resultan necesarios para su ejecución, tales como los relativos a consumibles, impresión y encuadernación, suministros, desplazamientos, etc. Son gastos complejos de calcular en detalle, por lo que generalmente se estiman en un 5% del resto de costes.

7.4. Coste Total

Consecuentemente, el montante y desglose del coste total del proyecto serían los siguientes:

Concepto	Coste (€)
Personal	3.300
Equipo	423
Indirectos	186
Total	3.909

8. Bibliografía

User manual for the Base of Aircraft Data (BADA) revision 3.9- EUROCONTROL

Algorithms for Motion Planning and Target Capturing- Mangal Kothari

The Avionics Handbook – Randy Wolter

9. Referencias

Plot_google_map – Zohar Bar-Yehuda

Vincenti_distazy - T. Vincenty

Librería para BADA – UPV