

Análisis, Modelamiento y Construcción del Sistema de Control Embebido DSP/FPGA Fuzzy Logic de Vuelo Autónomo para una Aeronave no tripulada UAV Efigenia basado en Matlab Simulink Aerospace and Real Time Workshop Toolbox

Mario Andrés Córdoba G.*

Abstract— Este artículo pretende describir parte del trabajo de investigación científica desarrollado alrededor del proyecto *EFIGENIA EJ-1: Una Aeronave Robot, autónoma, no tripulada UAV, de despegue y aterrizaje vertical, o en pistas cortas S/VTOL, autocontrolada mediante la combinación de una red neuronal digital y un sistema Fuzzy Logic, focalizando la mayor parte de la atención en el diseño y desarrollo del sistema computacional digital adaptivo reconfigurable de guía, navegación y control de vuelo.*

I. INTRODUCCIÓN

La aeronave no tripulada UAV EFIGENIA EJ-1B MOZART es un “robot aéreo” con características aerodinámicas especiales que le permiten el despegue y el aterrizaje vertical, o en una pista muy corta S/VTOL, con excepcionales características, capaz de actuar por sí solo (autónomo), tomar sus propias decisiones durante el vuelo, y con la misión de prestar ayuda en labores de búsqueda y rescate, investigación científica, la prevención y aviso de incendios forestales. También como ayuda en la organización del tránsito vehicular en las ciudades y carreteras, o como soporte para las emisoras de TV y Radio en la Transmisión de noticias “en vivo”.

II. EFIGENIA UAV EJ-1B MOZART

La configuración básica de este aerovehículo autónomo, no tripulado, UAV totalmente robotizado ha fusionado una gran variedad de áreas de la tecnología Electrónica y Aeronáutica (Figura 1).

* EFIGENIA Aerospace Robotics, Unmanned Aerial Vehicles UAV Research / Popayán, Colombia, cordoba@efigenia-aerospace.com
www.efigenia-aerospace.com

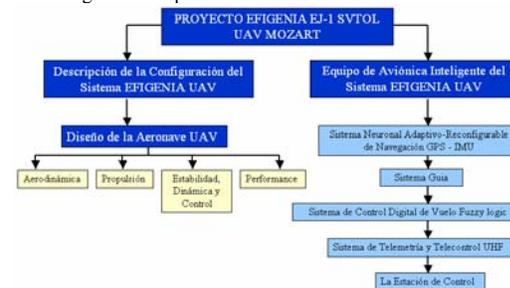


Fig. 1. Áreas tecnológicas incluidas en el diseño del EFIGENIA

Todos los componentes que lo integran son de total autoría personal tanto en su diseño como en la fabricación (alas, fuselaje, equipo electrónico, algoritmos de navegación, guía y control autónomo de vuelo, etc.). Parte de éste trabajo apoyado por software CAD, y la continuación fue el resultado de constantes cálculos y pruebas teórico-prácticas las cuales me llevaron a obtener el prototipo final. Si algo no salía conforme lo planeado, los ensayos de cada una de las partes me permitían rediseñarlas o que algunas veces hiciera un cambio total del concepto Figura 2.

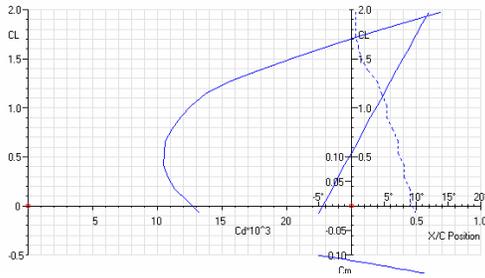


Fig. 2. Software CAD sobre el cual se diseño la aeronave UAV EFIGENIA EJ-1B MOZART

Uno de los principales objetivos tecnológicos y científicos para los cuales el EFIGENIA fue diseñado y desarrollado es el de validar y demostrar las cualidades de vuelo y características en cuanto a desempeño del concepto aerodinámico de aeronave de despegue y aterrizaje vertical, o en pistas cortas, (S/VTOL), con el cual se pretendió dotar al aero-vehículo de las capacidades de vuelo vertical del helicóptero (maniobrabilidad, vuelo a baja velocidad), fusionadas con las de una aeronave convencional (vuelo horizontal a gran velocidad).

El EFIGENIA se caracteriza por su avanzado diseño aerodinámico; para ello he desarrollado 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, al nivel de maniobrabilidad, como las de los aviones en cuanto a velocidad se refiere, obteniendo como resultado, alta velocidad en vuelo de crucero, estabilidad gran maniobrabilidad en vuelo estacionario, y rendimiento en el consumo de combustible Figura 3.



Fig. 3. La aeronave no tripulada UAV EFIGENIA EJ-1 MOZART

Su característica especial: el despegue y aterrizaje vertical, o de manera convencional convierten al UAV EFIGENIA en un equipo muy útil en el desarrollo de tareas de búsqueda y rescate, ante un costo de operación y mantenimiento bastante económico.

La aeronave es propulsada por dos motores de dos caballos de fuerza (2 HP) cada uno, adaptados para

conformar una unidad propulsora diseñada bajo el concepto de **EMPUJE VECTORIAL** en la que sea permisible el manejo de los flujos de aire provenientes de cada motor, logrando así obtener características particulares favorables en lo que se refiere a estabilidad y control tanto en vuelo estacionario como de crucero.

A. Diseño del Sistema de Avionica (Autopilot)

La combinación de la Lógica Difusa (Fuzzy Logic) y las Redes Neuronales han hecho posible el desarrollo de un efectivo método que permitió la implementación de una técnica de control autónoma de navegación y control de vuelo de este robot aéreo totalmente diseñado y construido en Colombia. Una de las grandes ventajas que se vislumbro desde un comienzo fue la alta capacidad de paralelismo del dispositivo en cuanto a procesamiento se refiere, la habilidad del aprendizaje, y un buen margen de tolerancia a las fallas.

En este orden de ideas, el sistema electrónico esta dividido en dos subsistemas importantes: El computador adaptivo, reconfigurable, neuronal para guía y aeronavegación, y el sistema de control Fuzzy de vuelo

En este sentido, la idea con el desarrollo de todos sus sistemas de avionica basado en inteligencia artificial, particularmente la utilización de técnicas *Fuzzy Logic* y *Redes Neuronales*, hacen del EFIGENIA un UAV que incorpora técnicas novedosas para implementar los procesos de navegación, guía y control electrónico de vuelo autónomo.

La orientación y la posición de una aeronave pueden ser definidos en términos de un conjunto de ejes fijos de referencia. Esta orientación puede ser descrita mediante tres rotaciones consecutivas cuyo orden es importante. A estas rotaciones se les ha denominado ángulos de Euler.

Es así que el comportamiento espacial de una aeronave lo podemos describir mediante seis parámetros: tres de naturaleza translacional representados en las aceleraciones sobre sus tres ejes X, Y, Z, y otros tres componentes de orden rotacional relacionados a la velocidad angular (Figura 4).

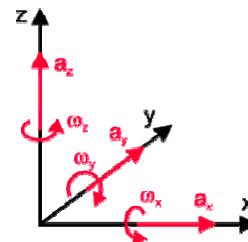
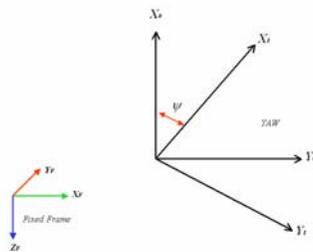


Fig. 4. Descripción de los movimientos translacionales y rotacionales del sistema.

Para hacer posible la medición de estos parámetros se ha dotado al sistema de tres sensores de aceleración (acelerómetros) y tres giroscopios los cuales están especialmente dispuestos dentro del aero-vehículo. Representemos entonces mediante los ángulos de Euler el comportamiento, definiendo los ejes así: movimiento del **Roll** (balanceo), el **Pitch** (cabeceo) y el **Yaw** (guiñada) ϕ, θ, ψ respectivamente.

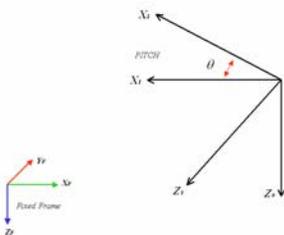
La orientación del aero-vehículo la obtendremos entonces referenciada a un conjunto de ejes fijos posicionados en la superficie terrestre en la siguiente manera: Imaginémonos que la aeronave exhibe una posición determinada en la que su sistema de ejes es paralelo respecto de la referencia. Aplicamos entonces la secuencia ordenada de rotaciones:

Primera Rotación ψ :



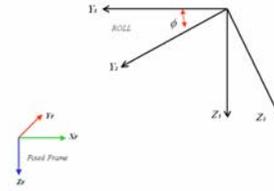
$$\begin{bmatrix} i_1 \\ j_1 \\ k_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ j_0 \\ k_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Segunda Rotación θ :



$$\begin{bmatrix} i_2 \\ j_2 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ j_1 \\ k_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Tercera Rotación ϕ :



$$\begin{bmatrix} i_3 \\ j_3 \\ k_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_2 \\ j_2 \\ k_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Obtendremos entonces la siguiente matriz de transformación:

$$T = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \cos \theta \sin \psi & -\sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

Determinamos la aceleración respecto del sistema de referencia (X, Y, Z) y por medio de la transformación matemática basada en los ángulos de Euler llegamos a que:

$$T^* = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi \sec \theta & \cos \phi \sec \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

Donde los valores angulares según Euler están dados por:

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = T^* \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (6)$$

Basado en un sensor de posicionamiento global GPS, sensores inerciales, y de datos aéreos, EFIGENIA puede captar información importante durante el vuelo, lo que le permite operarse de forma autónoma Figura 5.

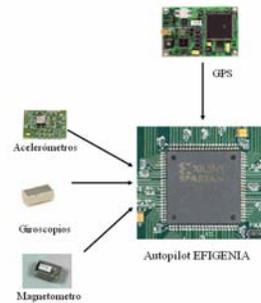


Fig. 5. Instrumentación electrónica diseñada para el UAV EFIGENIA.

Todas las leyes de control del EFIGENIA son ejecutadas por un mini-computador especialmente diseñado para este propósito, el cual basa su construcción en un sistema multiprocesador conformado por 10 microprocesadores DSP , dsPIC30F6014 y dsPIC30F3013 de 16 bits cada uno, y que en conjunto alcanzan 400 millones de instrucciones por segundo (*MIPS*). Individualmente, cada chip realiza una tarea independiente y paralela en tiempo real, permitiendo así una mayor velocidad de proceso y optimizando el desempeño de la aeronave Figura 6.

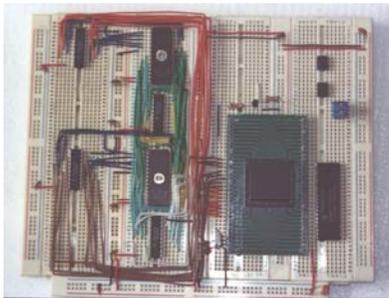


Fig. 6. Fotografía de uno de los computadores del autopilot diseñado para el EFIGENIA.

B. Sistema de Telemetria

En el desarrollo de cada tarea realizada por el EFIGENIA, según su objetivo, se recolectan datos e imágenes que son enviadas a través de un equipo en radio-frecuencia, diseñado en base a la combinación de un DSP y una FPGA con el propósito de hacer de este sistema un dispositivo reconfigurable que opera en tiempo real, y 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.

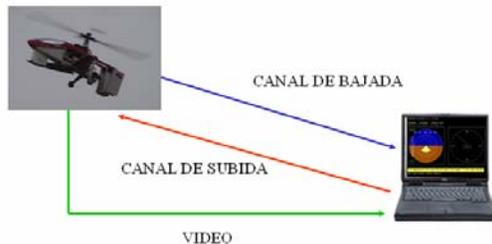


Fig. 7. Diagrama en bloques del sistema de telemetría.

C. Diseño de la Estacion de Control

Las operaciones de vuelo y el control de misión del EFIGENIA son determinados y supervisados desde una

estación de control. Desde aquí se mantiene comunicación permanente con el UAV, y se muestra toda la información referente al desarrollo de la misión, datos de vuelo y estado de la aeronave. El software diseñado para dichas labores ofrece una serie de opciones y ayudas de manera tal que pueda ser muy fácil y amigable su manejo Figura 8.

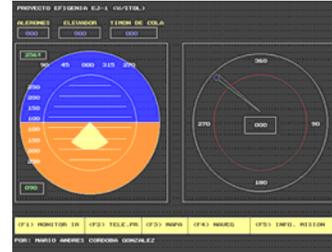


Fig. 8. Estación de control del UAV EFIGENIA.

III. ESQUEMA PRINCIPAL DEL CONTROLADOR FUZZY

El control y la estabilidad de los aviones esta regida por lo que conocemos según la fisica como momentos. Estos están referenciados al centro de gravedad de las aeronaves y como respuesta a estos fenómenos se presentan en ellas unos movimientos rotacionales, objeto de especial interés.

Para facilitar el trabajo al sistema de control de vuelo, este se vale de algunos de los datos del conjunto de sensores inercial, y por supuesto, de los datos de salida ofrecidos por el computador neuronal para la navegación, los cuales permiten procesar por medio del algoritmo de lógica difusa (Fuzzy Logic) la información para la buena ejecución del plan de vuelo, al igual que conocer con exactitud a cada instante el rumbo, la posición y actuación real de aero-vehículo.

El sistema de control fuzzy se encarga de “gobernar” todo; generando comunicación permanente con todos los sistemas del aero-robot, lo que optimiza el desempeño de cada dispositivo a bordo. Esto le asegura al aerovehículo el autocontrol o lo que es igual: volar de manera autónoma.

En la figura 9 Es posible identificar los parámetros utilizados para la implementación del controlador Fuzzy logic del Efigenia.

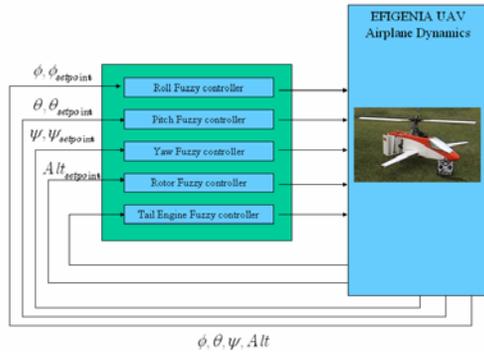


Fig. 9. Diagrama en bloques del controlador Fuzzy del Efigenia UAV

El procedimiento utilizado fue el de aplicar comandos sobre los tres ejes de la aeronave UAV para realizar el control autónomo según los datos obtenidos en el sistema de guía y navegación para controlar los ángulos de actitud ϕ, θ, ψ , y la altitud deseada h .

IV. IMPLEMENTACION DEL CONTROLADOR FUZZY

A. Controlador Longitudinal

La figura 10 muestra el eje de control vertical-longitudinal del Efigenia EJ-1B Mozart.



Fig. 10. Lateral view of the EFIGENIA UAV in hover flight mode

Sobre este eje longitudinal se implementó un loop de control fuzzy en un procesador DSP de 16 bits que permite gobernar la actitud en pitch y la altitud mediante el movimiento del disco de sustentación generado como resultado de la aceleración del rotor principal y sus movimientos y mecánica / posición asociados. Figura 11.

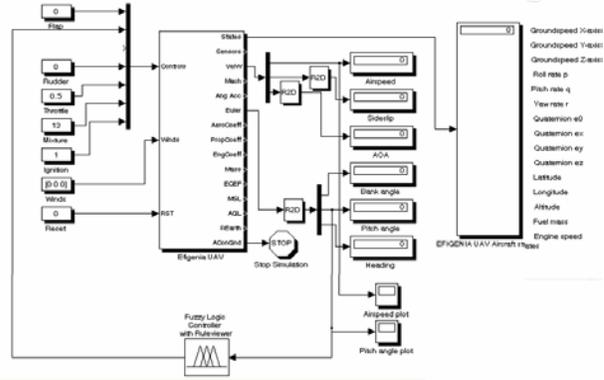


Fig. 11. Esquema del controlador fuzzy longitudinal

B. Controlador Lateral

El loop de control fuzzy lateral realiza el manejo de todos los servomecanismos asociados al movimiento de Roll de la aeronave. Para este efecto se trabajó la implementación sobre un procesador digital de señal dsPIC30F6014. Figura 12.

Dada la configuración del EFIGENIA, y su característica de ser una aeronave sin cola vertical, sus alas están provistas de dos pares de alerones/flaps.

Los alerones son superficies de control aerodinámico primario que proporcionan el manejo de la inclinación sobre su eje longitudinal, también llamado Roll.

Este movimiento hace variar la cuerda del ala respectiva con la rotación del alerón hacia abajo, incrementándola, y por ende la sustentación. Análogamente, el movimiento contrario (hacia arriba) decremanta la cuerda, y de igual forma la sustentación disminuye.

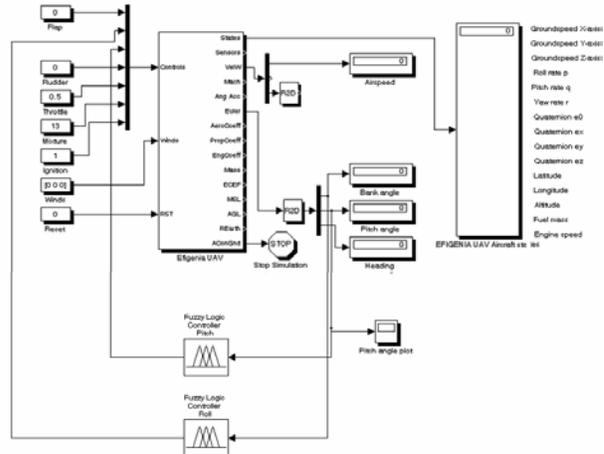


Fig. 12. Diseño del controlador lateral fuzzy del Efigenia

C. Controlador Direccional

El controlador direccional asocia todos los movimientos referidos al eje del Yaw. Para tal efecto tanto los mecanismos de la unidad de control vectorial de la cola del UAV como los servos que controlan los flaperones se han asociado a esta unidad de control fuzzy. Figura 13.

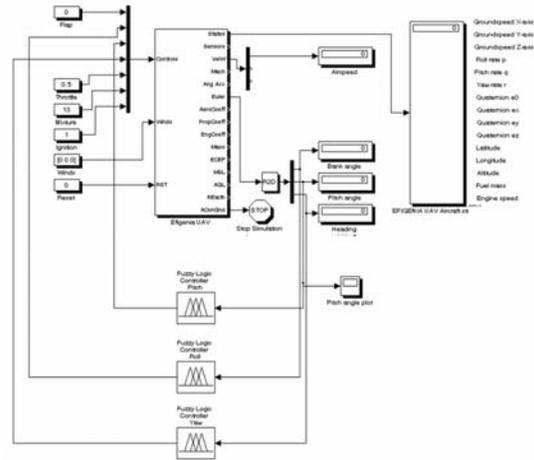


Fig. 13. Control direccional Fuzzy en el EFIGENIA

V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una vez se integran los sistemas de avionica (navegación, guía, y control de vuelo autónomo), diseñados para el EFIGENIA, se esboza un plan de pruebas tanto en el laboratorio como en vuelo (vuelos de prueba).

Para ello se decidió probar cada loop de control por separado (roll, pitch, yaw) y desarrollar análisis sobre el desempeño del sistema frente a las diferentes condiciones en las que fueron probados

El sistema de control fuzzy desarrollado para la aeronave EFIGENIA fue diseñado y validado en lenguaje C (para procesadores DSP dsPIC30Fxxxx) y VHDL para las FPGA.

En este sentido, el plan de pruebas abarco desde simulaciones que integraron la dinámica de vuelo de la aeronave con los esquemas de control hasta finalizar con los vuelos de prueba.

A. Prueba del Control Longitudinal de Vuelo

El primer paso fue el de probar el controlador longitudinal para vuelo autónomo. En esta prueba se adquirieron datos importantes del comportamiento de la aeronave en vuelo, y de la respuesta del sistema respecto del ángulo de actitud de Pitch a cada situación.

La figura 14 muestra dicho comportamiento del sistema durante una de las pruebas de vuelo.

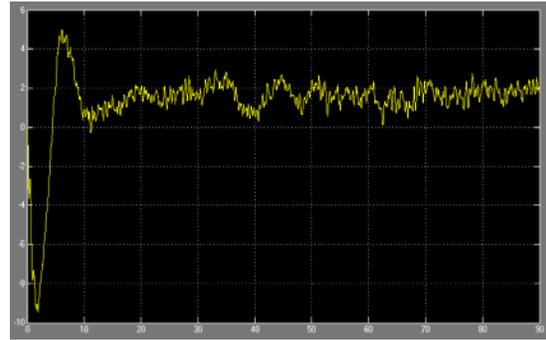


Fig. 14. Resultados de uno de los vuelos de prueba en el controlador fuzzy longitudinal.

B. Prueba en Vuelo del Controlador Lateral Direccional

El segundo paso fue probar el loop de control lateral-direccional de la aeronave referido al ángulo de banco (Roll) y su respuesta en términos de la deflexión de los alerones en cada plano alar y la inclinación del disco-rotor.

La figura 15 permite observar gráficamente las variaciones realizadas en vuelo a lo largo del eje lateral de la aeronave.

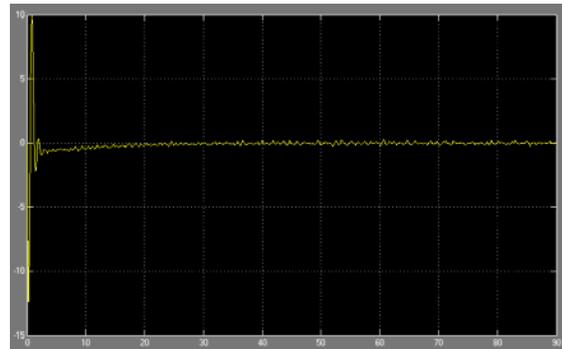


Fig. 15. Comportamiento del controlador lateral-direccional en vuelo

C. Transición en vuelo de modo Estacionario a Crucero y Viceversa

La tercera fase de pruebas de vuelo autónomo se inicia realizando un despegue y manteniendo la aeronave en vuelo estacionario (completamente autónomo) para posteriormente realizar una maniobra de transición a modo de vuelo crucero y seguir el plan de vuelo trazado (de forma autónoma).

Una vez cumplido el seguimiento de los waypoints demarcados desde la estación de control, se procede a ordenar el modo de aterrizaje (también autónomo), en el cual se realiza una maniobra de aproximación, una transición a modo estacionario nuevamente, finalizando con el aterrizaje en las coordenadas programadas. Figura 16.

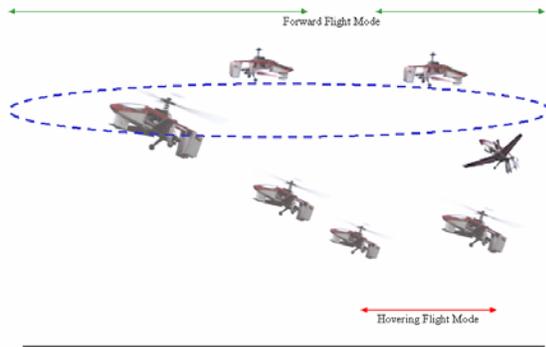


Fig. 16. Prueba de vuelo autónomo (modo estacionario a crucero y viceversa)

VI. CONCLUSION

Este artículo ha presentado el análisis, diseño, simulación e implementación de los sistemas de una aeronave no tripulada de despegue y aterrizaje vertical Efigenia EJ-1B Mozart.

Los resultados obtenidos en las pruebas de vuelo han permitido observar la confiabilidad y robustez de los sistemas de navegación, guía y control de vuelo autónomos basados en técnicas de inteligencia artificial, en particular la lógica difusa (Fuzzy Logic), implementados sobre dispositivos embebidos tales como los procesadores digitales de señal DSP y los dispositivos de lógica programable FPGA.

Se ha logrado demostrar la fiabilidad y viabilidad en cuanto a diseñar, construir, desarrollar y realizar todo un plan de pruebas científicas y técnicas de una aeronave no tripulada UAV, totalmente autónoma y 100% desarrollada en Colombia.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece de manera especial al Señor General José Manuel Sandoval de la Fuerza Aérea Colombiana, a las empresas Analog Devices, Microchip Technology, Byte-Craft Limited, Altera Corporation, Global Majic Technology, y a la Universidad del Cauca.

REFERENCIAS

- [1] D. J. Biezad, *Integrated Navigation and Guidance Systems*. Reston, Virginia, American Institute of Aeronautics and Astronautics AIAA, 1999.
- [2] A. B. Chatfield, *Fundamentals of High Accuracy Inertial Navigation*. Progress in Astronautics and Aeronautics, Volume 174. Reston, Virginia, American Institute of Aeronautics and Astronautics AIAA, 1997.
- [3] R. M. Rogers, *Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems*. Reston, Virginia. American Institute of Aeronautics and Astronautics AIAA, 2000.
- [4] J. Yen and R. Langari, *Fuzzy Logic Intelligence, Control, and Information*. New Jersey, Prentice Hall, 1999.
- [5] T. J. Ross, *Fuzzy Logic Engineering Applications*. University of New Mexico, McGraw Hill, Inc. 1995.
- [6] R. Pratt, *Flight Control Systems*. Progress in Astronautics and Aeronautics. Reston, Virginia, American Institute of Aeronautics and Astronautics AIAA, 2000.
- [7] K. C. Chang, *Digital Systems Design with VHDL and Synthesis: An Integrated Approach*. Los Alamitos, California. IEEE Computer Society, 1999.
- [8] R. G. Bown, P. Y. C. Hawang, *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*, John Wiley & Sons, 1997
- [9] S. Haykin, *Neural Networks*, Toronto, Canada, Macmillan College Publishing Company, 1994
- [10] B. L. Stevens, F. L. Lewis, *Aircraft Control and Simulation*, 2nd edition, John Wiley & Sons, 2003
- [11] A. K. Jain and J. Mao, "Artificial Neural Networks: A Tutorial," *IEEE Computer Magazine*, pp. 31-44, March 1996.
- [12] Altera QuartusII Reference Manual. Available: <http://www.altera.com>
- [13] Microchip dsPIC Digital Signal Controllers Reference Manuals. Available: <http://www.microchip.com>
- [14] Analog Devices Sensor Products. Available: <http://www.analog.com>
- [15] Bytecraft C programming tools. Available: <http://www.bytecraft.com>

BIOGRAFÍA

MARIO ANDRES CORDOBA G. Es egresado de la **Universidad del Cauca** como Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones. Posterior a su graduación, realizó estudios en el área de Diseño de Aeronaves (*Airplane Design*) en la Facultad de Ingeniería Aeroespacial de la **University of Kansas**. De igual forma, Cordoba ha sido *Visiting Scholar Student* en el **Massachusetts Institute of Technology MIT**, y *Short Term Visiting Scientist* en **NASA Langley Research Center**.