

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**PUCP**

**MAPEO Y REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LOS  
ALGORITMOS DE GUÍA, NAVEGACIÓN Y  
CONTROL PARA EL DESARROLLO DE  
SOFTWARE DE AERONAVES**

Tesis para optar el grado de:

**MAGISTER EN CIENCIAS DE LA  
COMPUTACIÓN**

Presentada por:

**CESAR VLADIMIR SOTO TORRES**

Dirigido por:

**JOSE ANTONIO POW SANG PORTILLO**

LIMA – PERÚ

2016

**Resumen.** Los sistemas para la Guía, Navegación y Control (GNC) es una rama de la ingeniería que trata del diseño de sistemas para el control de movimiento de vehículos, sobre todo, automóviles, barcos, aviones y naves espaciales.

En este estudio, se desarrolló un mapeo sistemático y una revisión sistemática para presentar una revisión de los estudios primarios relacionados con los algoritmos para el desarrollo de controladores de vuelo de sistemas para la Guía, Navegación y Control de aeronaves. Un mapeo sistemático es una metodología que brinda después de un proceso de investigación sistemática, un mapa resumen visual de sus resultados. Una revisión sistemática es una revisión de la literatura enfocada en un tema de investigación que trata de identificar, evaluar, seleccionar y sintetizar todas las pruebas de investigación de alta calidad relevante a una pregunta específica.

El procedimiento de mapeo sistemático identificó 13 014 estudios, de los cuales 179 fueron identificados como relevantes para responder la pregunta de investigación en referencia a los algoritmos para guía, navegación y control de aeronaves más usados por los investigadores aeroespaciales.

Sobre la base del mapeo sistemático, se realizó el procedimiento de búsqueda sistemática, de este procedimiento se seleccionaron 12 estudios relevantes para responder la pregunta de investigación en referencia a lo que se sabe actualmente sobre los algoritmos usados para el desarrollo de sistemas de control no lineal y sistema de control adaptativo de aeronaves.

Basado en la respuesta del mapeo sistemático realizado, los algoritmos de investigación usados para los Controladores de vuelo de sistemas para la Guía, Navegación y Control de Aviones (GNC) se concentran en 3 ejes principales: Guía, Navegación y Control; de estos ejes de estudio los investigadores mayormente se enfocan en el desarrollo de algoritmos para control de aviones.

Basado en la respuesta de la revisión sistemática realizada, se llegó a la conclusión que los investigadores aeronáuticos están enfocados en el desarrollo de Controladores Adaptativos no lineales basados en el algoritmo de Lyapunov y/o en el algoritmo Dynamic Inversion para sistemas con comportamiento no lineal, y el algoritmo de Redes Neuronales para sistemas con comportamiento adaptativo.

El documento está destinado a profesionales y académicos que investigan en el campo del desarrollo de software para la Guía, Navegación y Control de Aviones (GNC). Contribuye a resumir el conjunto de conocimientos en el campo y los esfuerzos directos para las investigaciones futuras en el desarrollo de software para GNC de Aeronaves

**Palabras clave:** Sistemas para la Guía, Navegación y Control, control no lineal, control adaptativo, Revisión sistemática, Mapeo Sistemático.



**Abstract.** Guidance, Navigation and Control System (GNC) is a branch of engineering dealing with the design of systems to control the movement of vehicles, especially, automobiles, ships, aircraft, and spacecraft.

In this study, we undertake a systematic mapping study and systematic review study to present a wide review of primary studies related on algorithms for the development of airborne flight controllers for Guidance, Navigation and Control of Aircrafts . Systematic mapping is a methodology that gives, after a systematic research process, a visual summary map of its results. A systematic review is a literature review focused on a research question that tries to identify, appraise, select and synthesize all high quality research evidence relevant to that question.

The search systematic mapping procedure identified 13 014 studies, of which 179 were identified as relevant to answer a research question related to the most used algorithms for the development of flight controllers for the Guidance, Navigation and Control of airplanes systems by the aerospace researchers.

Based on the Systematic Mapping, A systematic review procedure was performed and 12 relevant studies were selected to answer the research question of what is currently know about algorithm's research status of the Nonlinear Control Systems and Adaptive Control System.

Based on the Systematic Mapping answer, the research algorithms for the Guidance, Navigation and Control Controllers are concentrated in 3 main areas: Guidance, Navigation and Control in which the researchers are more focused on the Control System research.

Based on the Systematic Review answer , the aerospace researchers are focused on the development of Nonlinear Adaptive Controllers based on Lyapunov algorithm and/or Dynamic Inversion algorithm for a nonlinear behavior ,and a Neural Network Algorithm for an Adaptive behavior.

The paper is intended to practitioners and academics who do research in software development for the Guide, Navigation and Control System. It contributes to summarize the body of knowledge in the field and direct efforts for future research in GNC Aircraft software.

**Keywords:** Guidance, Navigation and Control System, Nonlinear Control, Adaptive Control, systematic review study, systematic mapping study.

## ÍNDICE

<b>1.0 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2.0 RESUMEN DE LOS ALGORITMOS PARA LA GUÍA, NAVEGACIÓN Y CONTROL PARA EL DESARROLLO DE SOFTWARE DE DISEÑO DE AERONAVES .....</b>	<b>4</b>
2.1 Aviónica .....	4
2.1.1 Definición .....	4
2.1.2 Instrumentos de Vuelo .....	5
2.1.3 Sistemas de Navegación .....	6
2.1.3.1 Navegación Aérea .....	6
2.1.3.2 Métodos de Navegación Aérea .....	6
2.2 Definición de un Sistema para la Guía, Navegación y Control de Aviones .....	6
2.3 Algoritmos para la Guía, Navegación y Control de Aviones aceptados por la American of Aeronautics and Astronautics ( AIAA) .....	7
2.3.1 Teoría de Control, Análisis y Diseño .....	8
2.3.2 Nuevos Métodos de Navegación, Estimación y Seguimiento .....	9
2.3.3 Guía, Navegación y Control de Aeronaves .....	9
2.3.4 Guía, Navegación y Control de Naves Aeroespaciales .....	10
2.3.5 Guía, Navegación y Control de Misiles .....	10
2.3.6 Guía, Navegación y Control para Sistema de Sensores .....	10
2.3.7 Guía, Navegación y Control para Mini y Micro Vehículos Aéreos .....	11
2.4 Actuadores Mecánicos para el Control de Vuelo .....	12
2.5 Algoritmos de Control No lineal y Control Adaptativo .....	16
2.5.1 Control de vuelo adaptativo no lineal .....	17
2.5.2 Redes Neuronales para Control de Vuelo .....	19
<b>3.0 DEFINICIÓN DEL SISTEMA Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>20</b>
3.1 Resumen .....	20
3.2 Objetivo Específicos .....	20
3.3 Normas de Referencia para la certificación del software requerida por la Federal Aviation Administration (FAA) .....	20
3.4 Alcances del Procedimiento del Mapeo Sistemático y Revisión Sistemática de la Literatura .....	21
3.5 Mapeo Sistemático .....	22
3.5.1 Objetivo del Estudio .....	23
3.5.2 Criterios de búsqueda para el Mapeo Sistemático .....	23
3.6 Formulación de las preguntas de búsqueda para el Mapeo Sistemático .....	23
3.6.1 Estrategia y Selección del Mapeo Sistemático .....	24
3.6.1.1 Términos de Búsqueda .....	24
3.6.1.2 Fases de Proceso de Búsqueda .....	24
3.6.1.3 Proceso de búsqueda y Selección .....	25
3.6.2 Esquema de Clasificación del Mapeo Sistemático .....	25
3.6.3 Extracción de Datos y Estudio de Mapeo (Mapeo Sistemático) .....	28
3.6.4 Resultados del Mapeo Sistemático .....	31
3.6.5 Observaciones .....	32
3.6.6 Conclusiones .....	34
3.7 Búsqueda Sistemática .....	35
3.7.1 Objetivos del Estudio .....	35
3.7.2 Diseño de la Revisión Sistemática .....	35
3.7.2.1 Preguntas de Investigación .....	35
3.7.2.2 Estrategias de Búsqueda para estudios primarios .....	35
3.7.2.3 Fases del Proceso de Búsqueda .....	35
3.7.2.4 Criterios de Inclusión y Exclusión para la Selección del Estudio .....	36
3.7.2.5 Selección de los Estudios .....	36
3.7.2.6 Evaluación de la Calidad del Estudio .....	36

3.7.2.7 Extracción de Datos .....	37
3.7.2.8 Síntesis y Análisis de los datos Extraídos .....	37
3.7.3 Realización de la revisión sistemática .....	38
3.7.3.1 Definición de las Preguntas de Investigación .....	38
3.7.4 Estrategia de Búsqueda usada para los estudios primarios.....	39
3.7.4.1 Términos de Búsqueda .....	39
3.7.5 Proceso de Búsqueda .....	40
3.7.5.1 Proceso de Búsqueda Primaria .....	40
3.7.5.2 Proceso de Búsqueda Secundaria .....	40
realizados iterativamente hasta que ningún nuevo estudio fuera identificado.	40
3.7.6 Criterios de Inclusión y Exclusión para la selección del estudio.....	41
3.7.7 Selección del Estudio .....	41
3.7.8 Evaluación de la Calidad del Estudio .....	43
3.7.9 Resultados .....	44
3.7.9.1 Resultados Estadísticos del proceso de Búsqueda Primaria y Secundaria.....	44
3.7.9.2 Resultados de Selección de los estudios .....	46
3.7.10 Interpretación de los datos y Conclusiones .....	48
<b>4.0 CONCLUSIONES .....</b>	<b>50</b>
<b>5.0 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>51</b>

## ANEXOS

ANEXO1- LISTADO DE ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN DE CONTROL NO LINEAL y CONTROL ADAPTATIVO DEL PROCESO DE BUSQUEDA PRIMARIA Y SECUNDARIA.

## 1.0 INTRODUCCIÓN

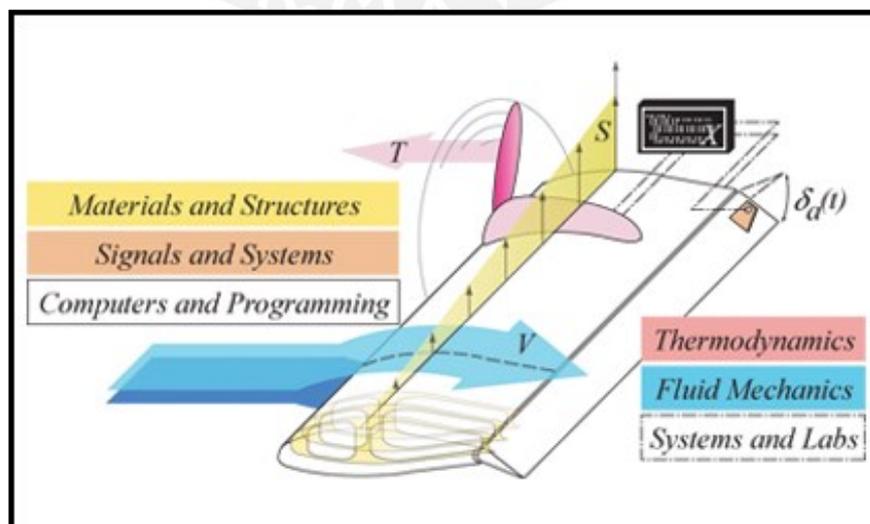
Actualmente las ciencias de la computación abarcan el estudio de las bases teóricas de la información y la computación y su aplicación en sistemas computacionales [38]. Existen diversos campos dentro de la disciplina de las ciencias de la computación; algunos enfatizan los resultados específicos del cómputo (como los gráficos por computadora), mientras que otros (como la teoría de la complejidad computacional) se relacionan con propiedades de los algoritmos usados al realizar cómputos [38]. Otros por su parte se enfocan en los problemas que requieren la implementación de cómputos [38].

Segmentando nuestro ámbito de estudio, nos enfocaremos en el mapeo y búsqueda sistemática de las Sistemas para la Guía, Navegación y Control en el campo de la ingeniería aeroespacial. Este mapeo y búsqueda sistemática tomará en cuenta las siguientes disciplinas de ingeniera:

- Mecánica de Fluidos
- Materiales y Estructura
- Termodinámica y Propulsión
- Computadores y Programación
- Señales y Sistemas

Por tanto el sistema para la Guía Navegación y Control de Aviones (Señales y Sistemas) hará uso de conceptos para formar un sistema de acuerdo a lo que propone la Figura 1-1:

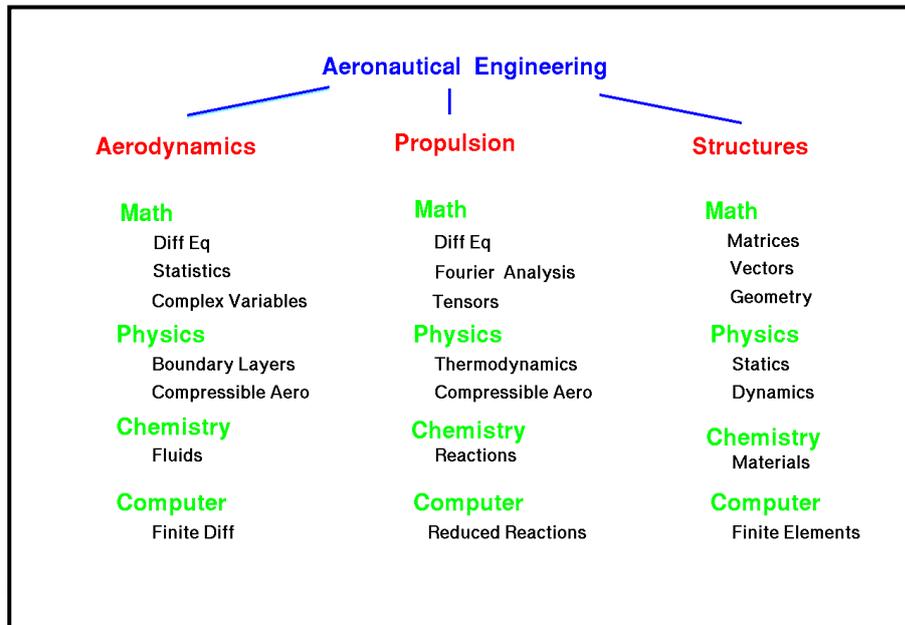
Figura 1-1 Disciplinas de Estudio en el alcance de la Ingeniería Aeronáutica



Nota. Tomado del Curso: "Unified Engineering I, II, III, & IV" del MITOPENOURSEWARE del MIT.

La ingeniería aeronáutica se basa en las ciencias básicas como: las matemáticas, física, química y ciencias de la computación. Ciertos conceptos de las ciencias para ingeniería forman parte del alcance de nuestro estudio de acuerdo a lo que propone la siguiente Figura 1-2.

Figura 1-2 Alcance de las Ciencias para el desarrollo de Algoritmos en la Ingeniería Aeronáutica



Nota. Tomado del Curso: "Unified Engineering I, II, III, & IV" del MITOPENCOURSEWARE del MIT.

Los sistemas para la guía navegación y control de aviones que por sus características deben brindar seguridad y confiabilidad, forman parte de los llamados Sistemas Críticos Seguros (Safety Critical System), como los siguientes sistemas: El sistema de señales de los trenes, dispositivos médicos, controladores nucleares, entre otros.

En la actualidad no se ha podido certificar un software basado en algoritmos de control no lineal y adaptativo, para los sistema de control a bordo del avión, que cumplan los requisitos propuestos en norma 178C de la Federal Aviation Administration (FAA)[46] ,debido a este problema la presente tesis propone una búsqueda sistemática de los algoritmos de control adaptivo y no lineal estudiados en base a simulaciones numéricas y estudios en aviones a escala por la comunidad científica mundial para el desarrollo de software de los sistemas de control de aviones seguros y críticos.

Para completar esta revisión sistemática se plantea el desarrollo de un mapeo sistemático de los Algoritmos para la Guía, Navegación y Control que actualmente son más usados por los investigadores e institutos aeronáuticos, discretizando las características propias de cada algoritmo y enfoque de uso.

Para este mapeo sistemático y revisión sistemática se hará uso del criterio de

PICOC (Population, Intervention, Comparison, Outcome, Context) con lo cual podremos identificar, evaluar e interpretar toda investigación relevante (estado del arte) referente a preguntas de investigación tópico o fenómeno de interés que se investiga.

En el Segundo Capítulo, se presenta un resumen del estado del arte de los sistemas de guía, navegación y control de aeronaves tomando como referencia los estudios priorizados en la última Conferencia 2016 para la Guía, Navegación y Control promovida por el Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica de Norteamérica (AIAA). Esta conferencia es el foro más grande dedicado a la Guía, Navegación y Control al servicio de la comunidad aeroespacial; junta a los expertos de la Industria, Gobierno y académicos de primer nivel para que presenten y discutan todas las áreas técnicas relacionadas a las aplicaciones para la Guía, Navegación y Control Aeroespacial.

En el Tercer Capítulo, se describe el mapeo sistemático de los algoritmos para la Guía, Navegación y Control de Aviones para identificar y conocer el estado del arte de estos algoritmos. En base a la identificación de estos algoritmos realizados en el mapeo sistemático, se realiza una revisión sistemática de los algoritmos de control adaptivo y control no lineal para el control de aviones.

El Cuarto Capítulo, se darán las conclusiones a que ha llegado el estudio en torno a la revisión del mapeo sistemático y búsqueda sistemática realizada.

En la actualidad no se han identificado estudios similares de mapeos sistemáticos de algoritmos para sistemas para la guía, navegación y control de aviones así como no se han identificado estudios similares de revisiones sistemáticas de algoritmos para el control adaptativo no lineal de aviones. Lo más aproximado a la búsqueda del estado del arte de estos algoritmos para la guía, navegación y control de aviones son exámenes de los estados de arte de estos algoritmos y sus enfoques de estudio (Survey) sin embargo el desarrollo de estos documentos de investigación [48] son del tipo matemático y no brinda una metodología para realizar el mapeo o revisión sistemática del estado del arte de estos algoritmos.

## 2.0 RESUMEN DE LOS ALGORITMOS PARA LA GUÍA, NAVEGACIÓN Y CONTROL PARA EL DESARROLLO DE SOFTWARE DE DISEÑO DE AERONAVES

En el presente capítulo se revisa la relación entre los controles mecánicos de la Aeronave y su aviónica (instrumentos y sistemas electrónicos) teniendo en cuenta los siguientes objetivos específicos:

- Revisión de los algoritmos existentes desarrollados para los sistemas de guía, navegación y control de aeronaves y su relación con los controles mecánicos y aviónica de la aeronave.
- Revisión de los algoritmos de control no lineal y control adaptativo más representativos y estudiados por la American Institute of Aeronautic and Astronautic (AIAA) y los investigadores aeronáuticos.

### 2.1 Aviónica

#### 2.1.1 Definición

La aviónica es la aplicación de la electrónica a la aviación. Es un término procedente de la palabra inglesa avionics, formada con la contracción de aviation (aviación) y de electronics (electrónica) [40]. Hace referencia a los sistemas electrónicos usados en aeronaves, satélites artificiales y naves espaciales, tanto en sistemas de comunicación y navegación como sus indicadores y elementos de manejo [40]. También incluye los sistemas que se aplican a los aviones para realizar tareas individuales, tan sencillas como complejas.

La parte delantera de la un avión es la ubicación de estos aparatos electrónicos, que incluye [41]:

- Sistema de Comunicaciones
- Sistema de Navegación
- Sistema de Monitoreo
- Sistema de Control de Vuelo del Aeronave
- Sistema anticollisiones
- Cajas Negras
- Sistemas Meteorológicos
- Sistemas de Gestión del Vuelo

Existen diferentes vendedores de Avionica como: Panasonic Aviation Corporation, Honeywell, Rocket Collins, Thales Group, GE Aviation Systems, Garmin, Parker Hammifin, UTC Aerospace System, Avidyne Corporation.

### 2.1.2 Instrumentos de Vuelo

Es el conjunto de mecanismos que equipan a una aeronave y que permiten al piloto una operación de vuelo en condiciones seguras [42]. Dependiendo de su tamaño o grado de sofisticación, una aeronave puede contar con un número variable de instrumentos [42]. Se pueden clasificar en tres grupos básicos de pilotaje, de control de motor y de navegación [42]:

#### Instrumentos de pilotaje

- Anemómetro
- Altímetro
- Indicador de velocidad vertical o variómetro
- Inclinómetro y coordinador de giro
- Horizonte artificial

#### Instrumentos de control del motor

- Indicadores de potencia
- Indicadores de estado de funcionamiento de motor

#### Instrumentos de navegación

- Brújula
- Indicador de rumbos o HI (heading indicator)
- ADF (Automatic Direction Finder)
- DME (Distance measuring equipment)
- CDI (Course Deviation Indicator)
- ILS (Instrumental Landing System)
- INS (Inertial Navigation System)
- Piloto automático (AUTOPILOT ó Automatic pilot)
- Sistema de gestión de vuelo (Flight Management System)

### 2.1.3 Sistemas de Navegación

#### 2.1.3.1 Navegación Aérea

La Navegación aérea (NAV) es el proceso de direccionar el movimiento de una aeronave de un punto a otro. Esto implica el control de las posición, dirección y velocidad de una aeronave con respecto al tiempo [42].

#### 2.1.3.2 Métodos de Navegación Aérea

Los métodos de navegación aérea son los que a continuación se exponen [42]:

- **Pilotaje:** Método primario de navegación basada en una referencia visual a un punto de referencia.
- **Estimación Fija (Dead Reckoning):** La navegación aérea basada en la extrapolación. Esto se obtiene, determinando la posición presente a través del conocimiento de la posición de referencia previa.
- **Radio Navegación:** La navegación aérea se realiza a través de señales de comunicación inalámbrica emitidas desde el suelo (GND) o estaciones de radio navegación aérea.
- **Navegación Estelar:** en referencia a objetos pesados como: luna, marte, estrellas.
- **Navegación Inercial:** La navegación aérea basada en la integración de la navegación medida por equipos aerotransportados (airborne equipment).
- **Navegación Satelital** haciendo uso de los datos emitidos por un transmisor satelital (SAT).

### 2.2 Definición de un Sistema para la Guía, Navegación y Control de Aviones

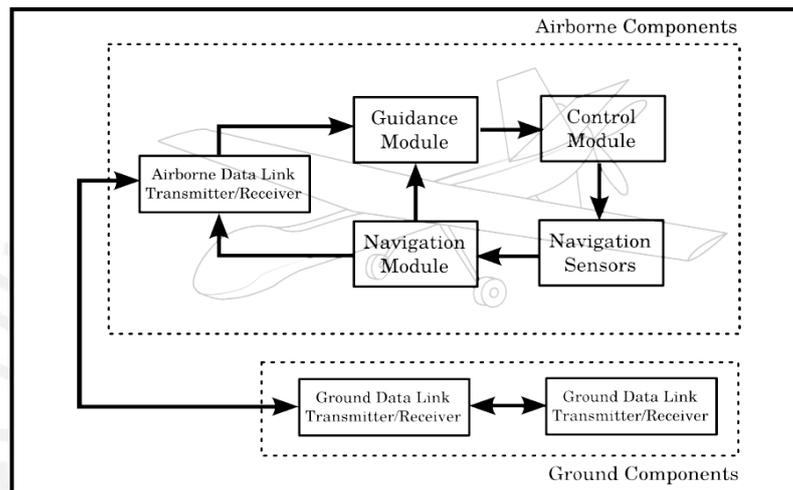
Es una rama de la ingeniería que se encarga del diseño del sistema de control para el movimiento de vehículos especialmente como: automóviles, barcos, aviones y aeronaves espaciales[39].

La aplicación de la teoría de control puede ser dividida en cuatro áreas [39]:

- **Planificación del Vuelo:** Determinación de una trayectoria nominal de vuelo y los controles históricos asociados para una aeronave dada para alcanzar objetivos específicos con restricciones específicas.
- **Guía:** Determinación de la estrategia para seguir la trayectoria nominal por la presencia de fuera de las condiciones nominales, disturbios por viento e incertidumbres de navegación.

- **Navegación:** Determinación de la estrategia para estimar la posición del vehículo a través de trayectoria de vuelo, tomando las salidas de los sensores específicos.
- **Control:** Determinación de una estrategia para mantener la orientación angular del vehículo durante el vuelo que es consistente con la estrategia de orientación.

Figura 2-3 Componentes de tierra y Aire de un Sistema de Guía, Navegación y Control



Nota. Tomado de la Figura 1 del Artículo de Investigación: "Principles of Guidance, Navigation and Control of UAVs". de G. Elkaim, F. , Pradipta , D. Egziabher.

### 2.3 Algoritmos para la Guía, Navegación y Control de Aviones aceptados por la American of Aeronautics and Astronautics ( AIAA)

El Comité Técnico de la Guía, Control y Navegación de la AIAA invita a participar anualmente en la Conferencia para la Guía, Navegación y Control de la AIAA [1]. Esta conferencia es parte del Foro y Exposición de Ciencia y Tecnología que se realiza todos los años; un evento que provee al mundo el principal foro para la presentación, discusión y colaboración de ciencia, investigación y tecnología relacionado a la industria aeroespacial [1]. Junta a los expertos de la industria, Gobierno, académicos de Nivel Internacional para presentar y discutir todas las áreas técnicas relacionadas las aplicaciones aeroespaciales [1].

Los algoritmos del presente estudio deben describir técnicas analíticas nuevas, aplicaciones y desarrollo tecnológicos en áreas como: guía, navegación y control de aviones; naves aeroespaciales, misiles, robots y otros sistemas aeroespaciales; arquitectura de sistemas de vuelo y componentes; conceptos

en Guía, Navegación y Control en sistemas de control de tráfico aéreo y vuelos en altas velocidades [1].

### 2.3.1 Teoría de Control, Análisis y Diseño

Los artículos de investigación que prioriza la AIAA son los que desarrollan nuevas teorías, generan nuevos algoritmos, derivan nuevas técnicas de análisis o herramientas de diseño, o modifican y mejoran técnicas existentes para aplicaciones de control de vehículos aeronáuticos [1]. Tópicos de interés incluyen: control robusto, control no lineal, control óptimo, control multivariable, control adaptativo e inteligente, detección de fallas, gestión de la redundancia y control bio-inspirado [1]. Ejemplos de tópicos específicos dentro de la amplia área de estudio incluye [1]:

- Control Robusto: Técnicas para control de sistemas con incertidumbre; estabilidad retroalimentada, Análisis Mu y Ganancia programada; márgenes de estabilidad multi variable y teoría multiplicadora; Síntesis Mu y Control H-Infinito-Óptimo.
- Control No lineal: Técnicas y métodos para control de modelos no lineares; Técnicas Lyapunov y sus extensiones; matrices lineares desiguales; aplicaciones de métodos de control no lineal, como el modo deslizamiento o técnicas de linearización retroalimentada.
- Control Óptimo: Algoritmos de optimización; control óptimo de sistemas no lineares; programación dinámica; métodos de solución; casos de estudio en análisis y diseño de controladores óptimos para plantas MIMO; márgenes de estabilidad y robustez; compensaciones del diseño.
- Control Adaptativo: Modelo de referencia del Control Adaptivo y variantes, Análisis de estabilidad Lyapunov de acuerdo a las leyes de control adaptativo; Control adaptativo directo e indirecto para sistemas lineares y no lineares; retos computacionales; reglas de adaptación; verificación de los márgenes para sistemas de vuelos críticos; modelos y reglas de aprendizaje en redes neuronales artificiales; redes neuronales en sistemas de identificación y control
- Detección de Falla y Reconfiguración: Algoritmos para detector fallas de sensores y actuadores; conmutación de leyes de control; simulaciones con fallas de entrada y performance de recuperación.

- Control Asignativo: Leyes de control asignativo incluyendo la gestión de múltiples actuadores; verificación y validación de la gestión de los métodos de redundancia; implementación del software en tiempo real.

### 2.3.2 Nuevos Métodos de Navegación, Estimación y Seguimiento

Los artículos de investigación que prioriza la AIAA son los que desarrollan nuevas teorías, enfoques y aplicaciones asociadas con la navegación, estimación y seguimiento [1]. La extensión de las áreas temáticas incluyen las técnicas de estimación y navegación; planificación de la trayectoria; métodos de seguimiento [1]. Ejemplos de tópicos específicos dentro de la extensión de las áreas temáticas incluyen [1]:

- Estimación: Estimación de parámetros; filtros adaptativos y robusto; estimación distribuida; estimación híbrida; estimación integrada/control.
- Navegación: Navegación Bio-Inspirada; Navegación basada en la visión; Navegación basada en fuente de rayos X; navegación basada en el terreno; radio navegación; navegación autónoma y control (Incluye GS integrado y navegación inercial); localización simultánea y mapeo.
- Planificación de la trayectoria: Optimización de la trayectoria; predicción de la trayectoria; planificación de la formación y determinación.
- Seguimiento: Seguimiento No lineal y Multi hipótesis; asociación de datos; detección/seguimiento combinado; gestión de los sensores; conocimiento de la situación; relocalización.

### 2.3.3 Guía, Navegación y Control de Aeronaves

Los artículos de investigación que prioriza la AIAA son los que direccionan el desarrollo, simulación testeado de vuelo de sistemas para guía, navegación y control de aviones y helicópteros [1]. Las áreas de interés en el amplio campo de la guía, navegación y control de aplicaciones para vuelo incluyen [1]:

- Sistemas de Control Aumentado: Estabilidad aumentada; trayectoria de vuelo automática y control de vuelo; control auto piloteado; guía y control integrado; generación de la trayectoria y gestión de la energía ; control de vuelo interdisciplinario y performance del vehículo; no linealidades; control estructural y supresión de la vibración; aeroservoelasticidad; saturación del control de los actuadores.
- Sistemas Tolerantes a la falla y recuperación: Auto reparado o sistema reconfigurable; situación de alerta; decisión de soporte; protección del

desarrollo del vuelo; recomputación de la trayectoria y reconfiguración; detección de falla y aislamiento.

- Sistemas de Navegación y Gestión de Vuelo: Algoritmos de navegación; posicionamiento GNSS; sensores alternativos de navegación; Performance del GPS y Status; diseño de la trayectoria; diseño del director de vuelo.
- Análisis de Control de Vuelo y Evaluación de la prueba de vuelo: Calidad del manejo de aeronaves; interface humano-máquina; piloto-en el lazo; testeo integrado del vehículo en el piso; testeo de vuelo en el suelo; análisis de performance en sistemas de control de vuelo.
- Control de formación del vuelo con incertidumbres: Formación del vuelo de aeronaves para contrarrestar arrastre; adaptación a las incertidumbres atmosféricas en el control de formación.

#### **2.3.4 Guía, Navegación y Control de Naves Aeroespaciales**

Los artículos de investigación que prioriza la AIAA son los que se ocupan de los campos específicos del vuelo en órbita de uno o varios vehículos espaciales [1]. Las áreas de interés incluyen [1]:

- Dinámica en Altitud y Órbita.
- Técnicas Innovadoras para mejorar el performance.
- Sistemas de Guía, Navegación y Control de Misiones Espaciales.
- Control de Formación de Naves aeroespaciales.

#### **2.3.5 Guía, Navegación y Control de Misiles**

Los artículos de investigación que priorizan la AIAA son relacionados a la guía, navegación y control de misiles, vehículos de lanzamiento y vehículos de reingreso. Los campos incluyen el análisis, diseño, simulación y testeo de sistemas completos y subsistemas [1]. Ejemplos de tópicos específicos dentro de la extensión de las áreas temáticas incluyen [1]:

- Piloto automático moderno/ Enfoques para Guía.
- Estimación y algoritmos de filtro.
- Optimización de la trayectoria.
- Diseño basado en computadora y técnicas de análisis.

#### **2.3.6 Guía, Navegación y Control para Sistema de Sensores**

Los artículos de investigación que priorizan la AIAA son los que describen nuevos sensores autónomos, sistemas de sensores integrados, técnicas de

sensado innovadoras para la Guía, Control, Navegación de vehículos de superficie, marinos, aéreos y aeroespaciales [1]. El sistema de sensores en estudio incluirá vehículos tripulados y no tripulados [1].

Ejemplos de tópicos específicos dentro de la extensión de las áreas temáticas incluyen [1]:

- Diseño de Sensores, testeo y mejora de la performance: Testeo y resultados de la evaluación del funcionamiento del hardware actual; conceptos de nuevos sensores para Guía, Navegación y Control; nuevas técnicas para el diseño, modelado y simulación y sensores prototipo; sensores o técnicas de calibración in situ; trabajo en campo de sistemas de Sensores para la Guía.
- Miniaturización de los sistemas de sensores: Miniaturización del hardware y aplicaciones relevantes para Navegación y Control en micro y nano tecnología; set de sensores integrados.
- Gestión de la redundancia: Gestión de redundancia de múltiples sensores en sistemas de aviónica a bordo.
- Áreas de Aplicación: Navegación autónoma en ambientes donde el GPS no funciona; nuevos sensores inerciales para la guía y control; redes móviles para vehículos tripulados; red de sensores para control y navegación de vehículos; visión por computadora para navegación autónoma, evitar obstáculos y aterrizaje autónomo.

### **2.3.7 Guía, Navegación y Control para Mini y Micro Vehículos Aéreos**

Los artículos de investigación que prioriza la AIAA son los que direccionan los desafíos y misiones asociados a mini y micro vehículos aéreos (MAV-vehículos que son lo suficientemente pequeños para que puedan ser llevados por personas) [1]. El desarrollo de alas fijas, alas rotatorias o alas para aletear son de interés [1]. Áreas temáticas principales [1]:

- Nuevos Diseños y Capacidades: Diseño de nuevos vehículos, y la interacción entre el diseño del vehículo y el proceso de la síntesis del control; procesamiento de los sensores y algoritmos de control que permitan posarse automáticamente y acoplarse en vuelo; colección de energía atmosférica.
- Sensores y Fusión de datos: Algoritmos de estimación de estado adecuado para la implementación de vehículos MAV; navegación en ambientes donde el GPS no funcione; visión basada en la autonomía MAV.

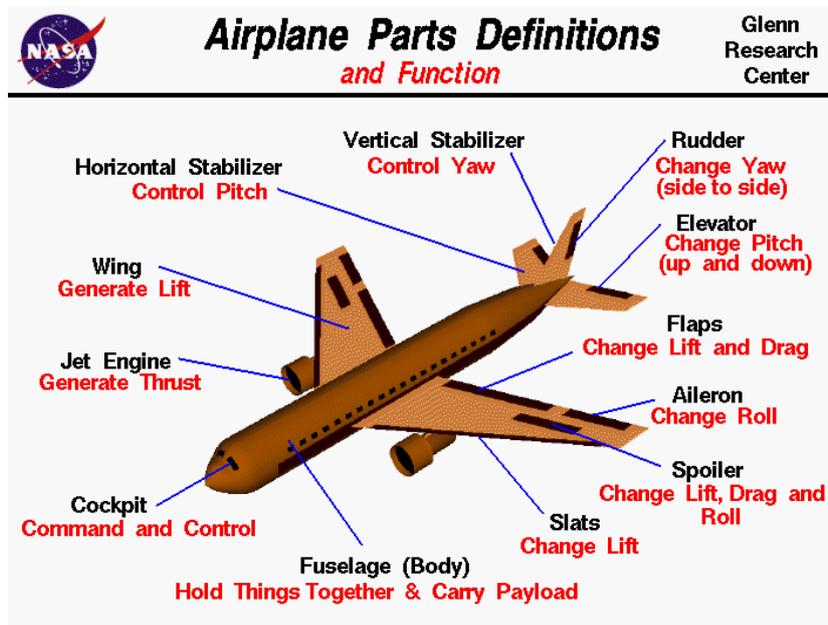
- Sistemas de poder y actuadores: alto voltaje, conversión de potencia de baja corriente para actuadores piezo eléctricos para MAV; mejoras de baterías.
- Dinámica y Control de Vuelo: Modelado dinámico de alas tipo fijas, rotativas o flaps para MAV; efectos de condiciones atmosféricas realistas en modelado y control de vuelo; arquitecturas de control de vuelo para MAV; Vuelo inspirado en pájaros e insectos.
- Planificación de la trayectoria: Algoritmos planificados adecuados para la implementación de mini y micro vehículos aéreos; operación en ambientes restrictivos, obstáculos cercanos; efectos de condiciones atmosféricas realistas en trayectorias de vuelo.
- Experimentos: modelos aerodinámicos no estacionarios empíricos nuevos; Fuerzas aerodinámicas en números de Reynolds bajos y caracterización del momento; identificación del actuador y características del vuelo del vehículo; caracterización de la Interacción del fluido-estructura e implicaciones para el diseño de control.

#### 2.4 Actuadores Mecánicos para el Control de Vuelo

Los aeroplanos están compuestos de diferentes partes que toman diferentes funciones (Ver Figura 2.4-1) [43]:

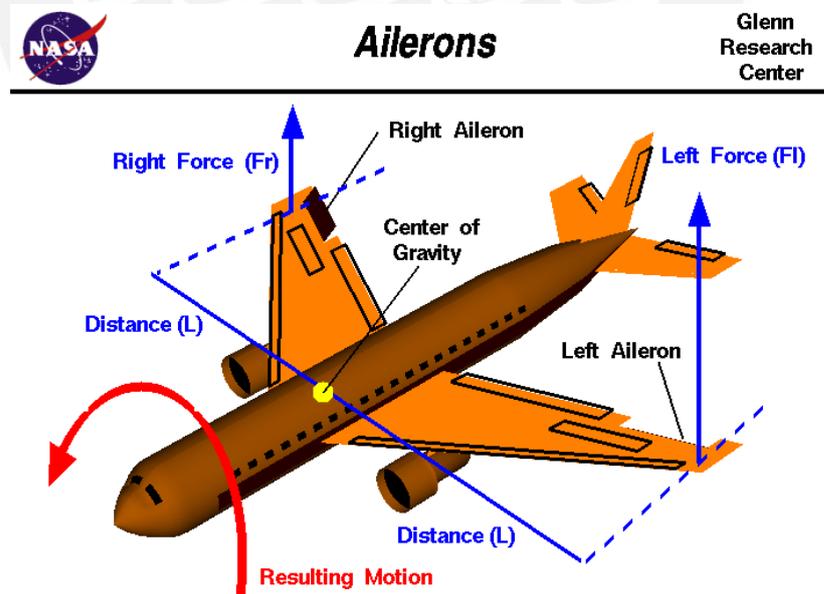
- Fuselaje (Fuselaje): Mantiene todas las partes juntas y soporta el peso total de todos los elementos.
- Motor (Jet Engine): A Gas o tipo Propel, es el que genera el empuje requerido.
- Alas (Wing): Generan gran parte de la sustentación para volar.
- Alerones (Ailerons): Produce el movimiento de rodadura (Roll). Estos trabajan en oposición, mientras uno está arriba el otro está abajo. (Ver Figura 2.4-2)
- Spoiler: Usado para rodar (roll) la nave o para incrementar y reducir el arrastre (Lift or drag) durante los aterrizajes. (Ver Figura 2.4-3)

Figura 2.4-1 Definiciones de la partes de un Avión para el Control de Vuelo



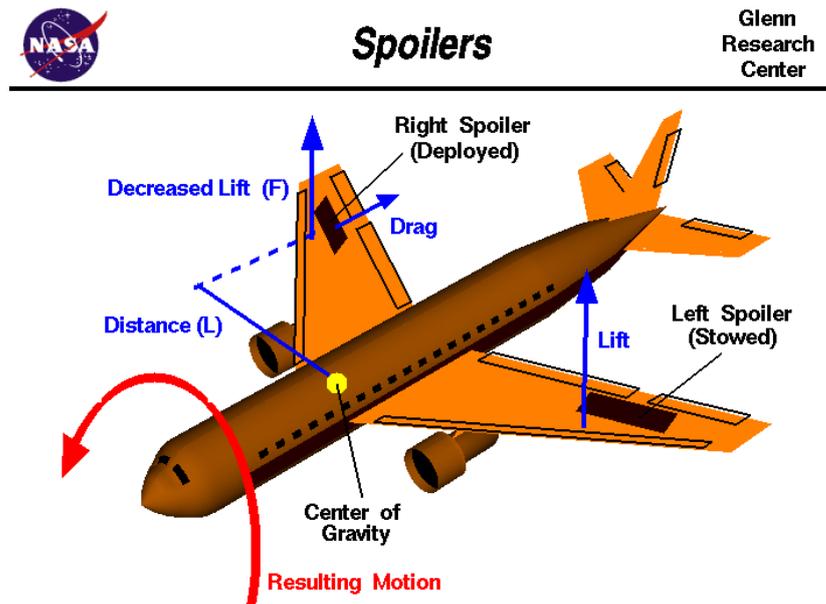
Nota. Tomado de la Página Web "Beginner's Guide to Aerodynamics " de la National Aeronautic and Space Administration(NASA) con el siguiente enlace: "<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/airplane.html>".

Figura 2.4-2 Uso de Alerones



Nota. Tomado de la Página Web "Beginner's Guide to Aerodynamics " de la National Aeronautic and Space Administration(NASA) con el siguiente enlace: "<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/airplane.html>".

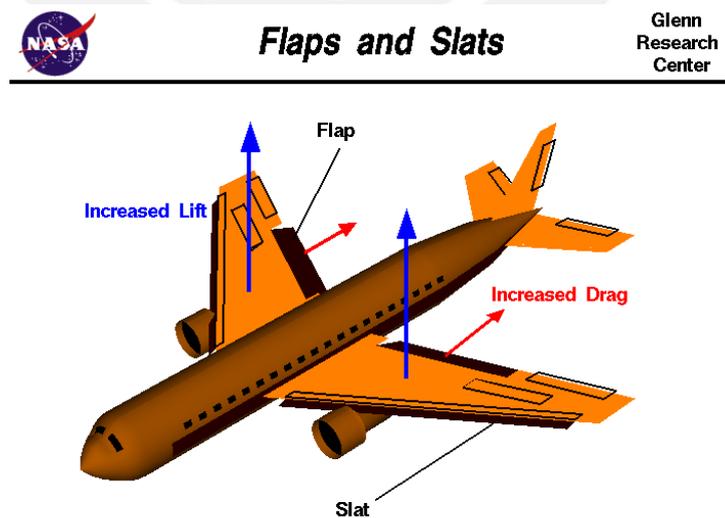
Figura 2.4-3 Uso de Spoiler



Nota. Tomado de la Página Web "Beginner's Guide to Aerodynamics " de la National Aeronautic and Space Administration(NASA) con el siguiente enlace: "<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/airplane.html>".

- Slat & Flat: Durante el despegue y el aterrizaje las velocidades son bajas. Para mantener las sustentación alta (proporcional a la velocidad, perfil, envergadura del ala), los diseñadores tratan de incrementar el área del ala y cambiar la forma del perfil colocando algunas partes móviles en los bordes de entrada y salida [43]. (Ver Figura 2.4-4)

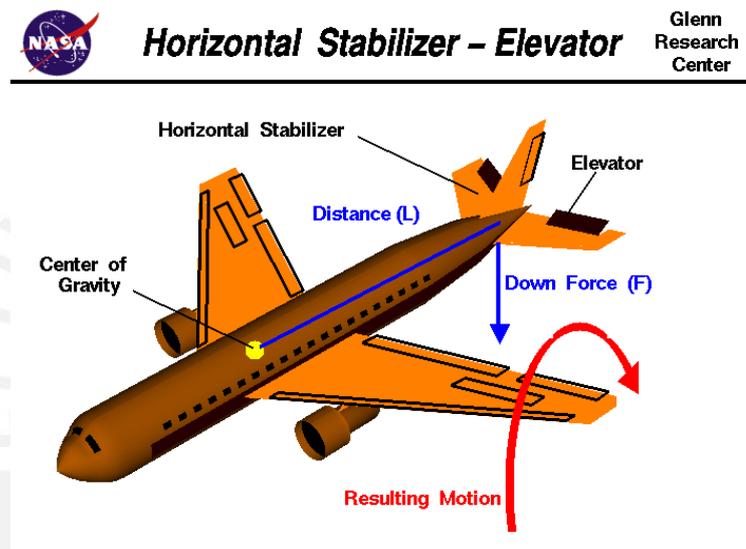
Figura 2.4-4 Uso del Slat and Flat



Nota. Tomado de la Página Web "Beginner's Guide to Aerodynamics " de la National Aeronautic and Space Administration(NASA) con el siguiente enlace: "<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/airplane.html>".

- Estabilizador horizontal y Elevador: El estabilizador es un ala fija que provee estabilidad a la aeronave, para mantener la trayectoria lo más recta posible. El estabilizador horizontal previene el movimiento de subida y bajada de la nariz. El elevador es un pequeña sección móvil en la parte trasera del estabilizador, la cual al moverse varia la fuerza generada por la superficie y es generada para controlar el movimiento de cabeceo (Pitch) de la aeronave [43]. (Ver Figura 2.4-5)

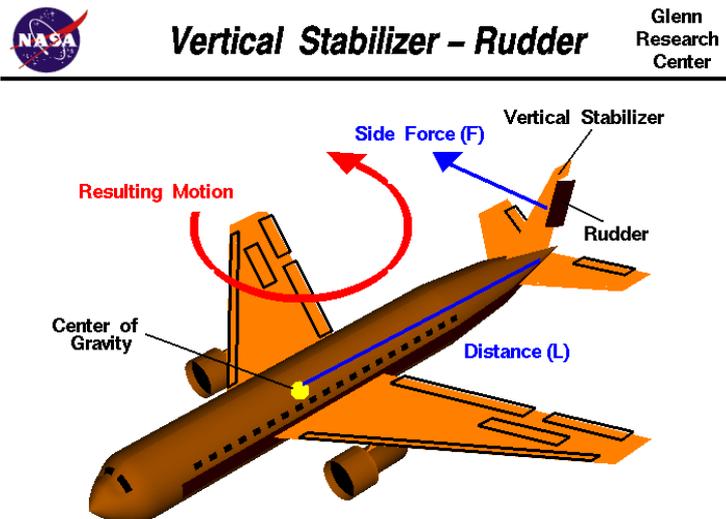
Figura 2.4-5 Uso de Estabilizador y Elevador



Nota. Tomado de la Página Web "Beginner's Guide to Aerodynamics " de la National Aeronautic and Space Administration(NASA) con el siguiente enlace: "<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/airplane.html>".

- Estabilizador Vertical y Timón (Rudder): El estabilizador vertical previene el movimiento de lado a lado o movimiento de guiñado (yawing). El timón es una pequeña sección en la parte trasera del estabilizador que varia la fuerza generada por la superficie de la cola y es usada para generar y controlar el movimiento del lado a lado de la aeronave [43]. (Ver Figura 2.4-6)

Figura 2.4-6 Uso de Estabilizador y Timón



Nota. Tomado de la Página Web "Beginner's Guide to Aerodynamics " de la National Aeronautic and Space Administration(NASA) con el siguiente enlace: "<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/airplane.html>".

## 2.5 Algoritmos de Control No lineal y Control Adaptativo

La linearización con realimentación y redes neuronales adaptativa proveen una arquitectura de control poderosa [29].

El deseo por mejorar la agilidad y funcionalidad, demanda que la aeronave trabaje sobre un rango incrementado de condiciones de operación, caracterizada por variaciones dramáticas en presión dinámica y los fenómenos de aerodinámica no lineal [29]. Además, el uso de sistemas de actuación no lineal incrementa la complejidad del diseño de control [29]. Por tanto actualmente hay un gran interés en el desarrollo de métodos adaptativos de control en tiempo real que son aplicables a los problemas de control de vuelo donde las características de la aeronave son pobremente comprendidas [29].

En ángulos de ataque altos, la aerodinámica es pobremente entendida y es muy difícil modelar [29]. Alternativamente variaciones en la respuesta dinámica puede ocurrir, debido a defectos o falla de componentes, requiriendo reconfiguración en línea de los sistemas de control para mantener estable el vuelo y tener niveles razonables de calidad en el manejo [29].

Los controles tradicionales de diseño de vuelo toman en cuenta la linearización de la dinámica del vehículo, teniendo en cuentas las condiciones de operación a través de toda su envergadura, diseñando controles lineares para cada

condición, y mezclando estos puntos de diseño con esquema de interpolación [29]. Este acercamiento a ganancia planificada, la cual tiende a ser algo tedioso, puede producir una ley de control que no posee las propiedades deseadas exhibidas localmente por sus puntos de diseño [29]. Sin embargo la ganancia planificada ha probado históricamente un éxito en aplicaciones variadas, los diseños futuros podrían beneficiarse de estos métodos más avanzados los cuales explícitamente toman en cuenta los sistemas intrínsecamente no lineares [29].

Las técnicas de control no lineares, tales como la linearización con retroalimentación, se fundamentan sólidamente sobre un conocimiento exacto de la dinámica de planta [29]. Sin embargo, algunos efectos aerodinámicos son muy difíciles para modelar [29]. Por ejemplo desprendimientos de vórtices libres causados por altos ángulos de ataque [2]. La dirección en las cuales los vórtices se desprenden es impredecible, y dependen de la robustez de las imperfecciones en la superficie del vehículo [29]. Tomando en cuenta estos efectos de incertidumbre, usar controles robustos, es en general, una aproximación conservativa y puede sacrificar una performance exitosa [29].

En contraste, un sistema de control que se adapta a la dinámica no lineal de varios regímenes de vuelo tiene la posibilidad de adquirir performance superior a través de toda su envergadura [29]. A la fecha, muchos controles de vuelo adaptativos han direccionado el tema del efecto aerodinámico de la incertidumbre dentro del contexto del control lineal [29]. Aeronaves del futuro se beneficiarán de un sistema control adaptativo basándose en la dinámica no lineal de un vehículo mientras se evita la compleja ganancia proyectada [29].

Redes neuronales artificiales, las cuales tienen la habilidad de aproximarse a funciones continuas no lineares, son ideales para las aplicaciones de control de vuelo adaptativo [29]. Una ventaja sobre otras técnicas es el reducido monto de memoria y el tiempo de computabilidad requerido [29]. Además, pueden proveer interpolación entre puntos tal que no se adicione esfuerzos computacionales [29]. Además, la experiencia ha demostrado que las redes neuronales funcionan como elementos de control no lineal adaptativo y ofrecen distintas ventajas sobre otros controladores en adquirir un funcionamiento deseado [29].

### 2.5.1 Control de vuelo adaptativo no lineal

El acercamiento más estudiado al control no lineal envuelve el uso de técnicas de transformación no lineares y geometrías diferenciales [29]. Esta metodología

transforma el estado y/o el control de un sistema no lineal tal que el sistema resultante exhibe una dinámica lineal [29].

Las herramientas lineales pueden ser aplicadas y subsecuentemente reconvertidas en coordenadas originales vía una transformación inversa [29]. Estas clases de técnicas son mayormente conocidas como linearización retroalimentada. Isidori provee un tratamiento comprensivo a las técnicas de control de transformaciones lineales [3].

La teoría de la linearización retroalimentada ha encontrado muchas aplicaciones en la investigación de técnicas de vuelo [29]. Meyer y Cicolani incluían el concepto de transformaciones no lineales en su estructura formal para controles avanzados de vuelo [4].

Menon et-al usa un acercamiento a dos escalas de tiempo para simplificar las transformaciones lineales [5]. Un caso específico de linearización retroalimentada, conocido como inversión dinámica, ha sido investigado en gran amplitud para aplicaciones en aviones súper vulnerables [6, 7, 8]. Estos estudios muestran que la inversión dinámica es una manera efectiva de compensar las no linealidades asociadas con los altos ángulos de ataque [29].

Como ha ilustrado Brinker and Wise, la inversión dinámica puede ser vulnerable para modelar los errores [9]. Por tanto una variedad de poderosos controles no lineales han sido esquematizados. Estas técnicas son robustas para escenarios con poca certeza, cuando típicamente se incluyen modelos no dinámicos, de poca certeza paramétrica y no lineales [9,10,11].

Una aproximación al control de sistemas no lineales, las cuales no se basan en las conversiones, es la clase llamada técnica del paso atrás [29]. “Backstepping” emplea la síntesis de L-Yapunov para recursivamente determinar un controlador lineal para sistemas no lineales que tienen la particularidad de una estructura en cascada [29]. El paradigma del paso atrás ofrece al diseñador de control gran libertad en escoger la forma de control realimentado [13,14].

Mucho de los resultados de control adaptativo son derivados de la teoría de estabilidad de Lyapunov [15,29]. Aunque el control adaptativo tiene una larga historia, no ganó mérito hasta 1980, cuando los resultados en estabilidad a lazo cerrado fueron obtenidos [16,29].

Esquemas de controles adaptativos no lineales son divididos en métodos directos e indirectos [29]. Controles adaptativos indirectos envuelven

identificación en línea de parámetros de planta, basado sobre cuáles leyes de control son implementadas [29]. En caso controles adaptativos directos, los parámetros que definen el controlador son actualizados directamente [29]. Muchos esfuerzos se concentran específicamente en el control adaptativo de sistemas lineares retroalimentado [17,18, 29].

La sensibilidad de muchos esquemas adaptativos para disturbios y dinámica no modelada motivan a muchos investigadores a investigar controles robustos adaptativos para sistemas lineares [29]. Las herramientas posibles incluyen el uso de zonas muertas para mantener delimitados los errores en la presencia de ruido [19,29].

### 2.5.2 Redes Neuronales para Control de Vuelo

Debido a sus habilidades bien conocidas para aproximar mapeos no lineares de poca certeza hacia altos niveles de precisión, las redes neuronales han llegado a ser una potencial solución a muchos problemas sobresalientes en control adaptativo y/o robusto de sistemas no lineares [20,21,29]. La literatura incluye numerosas aplicaciones de redes neuronales para sistemas de control [29]. Baron emplea redes polinómicas para detectar fallas y reconfigurar los controles de vuelo [22,29]. Linse y Stengel demostraron que las redes neuronales pueden ser usadas para identificar los coeficientes aerodinámicos [23,29].

Aplicaciones en las cuales las redes neuronales son usadas para controlar aviones súpervulnerables son descritas por Baker & Farrel [24] y por Steck & Rokhasz [25]. El artículo de investigación que toma en cuenta el rol de las redes neuronales en el diseño de sistemas de control de vuelo ha sido una contribución de Werbos [26] & Steinberg [27, 28].

El uso de una arquitectura de control adaptativo por redes neuronales que compensan las no linealidades desconocidas en un esquemas de control lineal retroalimentado ha sido contribución de Calise & Rysdyk [29].

### 3.0 DEFINICIÓN DEL SISTEMA Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

#### 3.1 Resumen

En el presente capítulo se presenta un mapeo sistemático como herramienta de segmentación de la población de estudio en referencia a los algoritmos para la guía, navegación y control de aviones. Posteriormente, con esa muestra de estudio, se presenta una revisión sistemática de los algoritmos de control no lineal y adaptivo más usados por los investigadores e institutos de investigación.

En el punto 3.5 del presente capítulo se presenta el mapeo sistemático de los algoritmos usados para los sistemas de guía, navegación y control de aeronaves, usando la base de datos de Scopus [35] como motor de búsqueda primaria. Se sustentará, en base al mapeo sistemático de la población de algoritmos para la guía, navegación y control de aeronaves, que existen más investigaciones relacionados al desarrollo de algoritmos para el sistema de control de aeronaves que algoritmos para los sistemas de guía y navegación de aviones.

En la actualidad no se ha podido certificar un software basado en algoritmos de control no lineal y adaptativo, para los sistemas de control a bordo del avión, que cumplan las consideraciones propuestas en norma 178C de la Federal Aviation Administration (FAA) por tal sentido en el punto 3.6 del presente capítulo se presenta una búsqueda sistemática de los algoritmos de control adaptivo y no lineal más usados por la comunidad científica mundial tomando como motores de búsqueda las siguientes bases de datos: Scopus [35], IEEE Xplore [31], ACM Digital Library [32] y Aerospace Research Central [33].

#### 3.2 Objetivo Específicos

- Realizar un resumen del estado del arte de los algoritmos que actualmente son más usados para el sistema Guía, Navegación y Control de Aeronaves.
- Realizar un resumen del estado del arte de los algoritmos de control no lineal y adaptativo que actualmente son más usados para el control de vuelo de una aeronave, teniendo en cuenta los requerimientos de la Federal Aviation Administration (FAA).

#### 3.3 Normas de Referencia para la certificación del software requerida por la Federal Aviation Administration (FAA)

El advenimiento de aeronaves autónomas y la expansión de la capacidad de control adaptativo ha incrementado el deseo de desarrollar sistemas de control seguros y confiables para la próxima generación de aeronaves y naves espaciales [46].

La implementación del software deberá ser verificada y validada para proveer suficiente garantía de su funcionalidad prevista, seguridad, y ausencia de funcionalidades no deseadas [46].

Actualmente, no existe una forma establecida para verificar y validar un software de control de vuelo crítico, seguro, autónomo y adaptativo que lleven a una certificación [46]. Para que cualquier software de vuelo pueda ser certificado por la Autoridad Federal de Aviación (FAA), este debe ser desarrollado de acuerdo a un proceso de desarrollo de software detallado y bien documentado, que es extremadamente lento y costoso [46]. Los requisitos específicos para los sistemas adaptativos, no son fácilmente discernible [46].

Los requisitos solicitados por la FAA para certificar software de control de vuelo adaptivo no lineal son los siguientes:

- RTCA DO- Software Considerations 178C, in Airborne Systems and Equipment Certification, dated December 13, 2011.
- RTCA DO-330, Software Tool Qualification Considerations, dated December 13, 2011.
- RTCA DO-331, Model-Based Development and Verification Supplement to DO178C and DO-278A, dated December 13, 2011.
- RTCA DO-332, Object-Oriented Technology and Related Techniques Supplement to DO-178C and DO-278A, dated December 13, 2011.
- RTCA DO-333, Formal Methods Supplement to DO-178C and DO-278A, dated December 13, 2011.

La validación y verificación son procesos importantes para asegurar la seguridad y confiabilidad de un software [47]. Los ratios de calidad de manejo de aeronaves de Cooper-Harper es uno de las técnicas usadas y desarrolladas por los investigadores de la NASA para verificar y validar sistema de control para aeronaves [47].

### **3.4 Alcances del Procedimiento del Mapeo Sistemático y Revisión Sistemática de la Literatura**

De acuerdo a Kitchenham y Charters [30] los estudios de mapeos sistemáticos son diseñados para proveer una mirada amplia a un área de investigación, para establecer si existe una evidencia investigadora en un tema y proveer una indicación de la cantidad de esa evidencia. Por otro lado la revisión sistemática es utilizada para identificar, analizar e interpretar toda la evidencia disponible en relación a una pregunta de investigación específica de una manera que es imparcial y repetible.

Un mapeo sistemático de la literatura [36]: es un método que tiene como propósito mostrar el estado del arte de un área a analizar a través de un mapa general, presentando usualmente diagramas, gráficos y estadísticas.

El procedimiento del mapeo Sistemático deberá contener el siguiente alcance [30]:

- Definición de la Pregunta de Investigación
- Revisión del Alcance
- Revisión de los Artículos de Investigación más relevantes.
- Palabras Guía usando los resúmenes de Investigación.
- Clasificación del Esquema
- Extracción de la Data y Proceso de Mapeado.
- Mapeo Sistemático

Una revisión sistemática de la literatura significa [30]: identificar, evaluar e interpretar toda investigación relevante (estado del arte) referente a una pregunta de investigación, tópico o fenómeno de interés.

El procedimiento de búsqueda Sistemática deberá contener el siguiente alcance [36]:

- Formulación de las preguntas de búsqueda.
- Desarrollo del Protocolo de estudio.
- Identificación de la literatura relevante.
- Determinación de los criterios de inclusión y exclusión.
- Selección de los estudios
- Evaluación de la calidad del estudio.
- Extracción de los datos de los estudios seleccionados.
- Síntesis de los datos y resumen de resultados.
- Interpretación de los resultados.
- Conclusiones.

### 3.5 Mapeo Sistemático

Un mapeo sistemático es un método para construir un esquema de clasificación de un campo de interés. El análisis de los resultados se centran en

las frecuencias de las publicaciones dentro de los esquemas. Facetas diferentes de los esquemas pueden ser combinados para responder más de una pregunta de investigación [36].

### 3.5.1 Objetivo del Estudio

- Realizar un resumen del estado del arte de los algoritmos que actualmente son más usados para la Guía, Navegación y Control de Aeronaves.

### 3.5.2 Criterios de búsqueda para el Mapeo Sistemático

Identificar las preguntas de investigación es un componente importante para el mapeo sistemático de la literatura. Para la formulación de las preguntas de búsqueda, se usará el criterio de PICOC (Population, Intervention, Comparison, Outcome, Context).

Tabla 3.5.2-1 Criterios de Búsqueda según PICOC

CRITERIOS PICOC	DESCRIPCIÓN	ALCANCE DEL ESTUDIO (SI/NO)
<b>Population</b>	• Sistemas de Guía, Navegación y Control para el desarrollo de software para el Diseño de Aviones.	Si
<b>Intervention</b>	• Algoritmos para el desarrollo de Sistemas Guía, Navegación y Control de aviones	Si
<b>Comparison</b>	• Algoritmos para el desarrollo de Sistemas Guía, Navegación y Control de aviones más usados.	Si
<b>Context</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigadores Aeronáuticos</li> <li>• Institutos de Investigación Aeronáutica</li> <li>• Autoridad Competente (FAA)</li> <li>• Empresas desarrolladoras de Software de Ingeniería Aeronáutica</li> <li>• Empresas Constructoras de Aviones.</li> </ul>	Si

### 3.6 Formulación de las preguntas de búsqueda para el Mapeo Sistemático

Las preguntas de investigación a realizar son las siguientes:

Q1: *De los investigaciones para la Guía, Navegación y Control de aeronaves o aviones, ¿cuál de los algoritmos, son usados por los investigadores*

Aeronáuticos, Institutos de Investigación Aeronáutica (AIAA) o Autoridad Competente (FAA) ?

- Q1-Pop: Sistemas de Guía, Navegación y Control de Aviones.
- Q1-Int: Algoritmos para Guía, Navegación y Control de Aviones.
- Q1-Com: Algoritmos para Guía, Navegación y Control de Aviones más usados.
- Q1-Cont: Investigadores Aeronáuticos, Institutos de Investigación Aeronáutica o Autoridad Competente (FAA).

### 3.6.1 Estrategia y Selección del Mapeo Sistemático

#### 3.6.1.1 Términos de Búsqueda

Considerando la información obtenida a través del método PICOC, se definieron los términos de búsqueda que se describen en la tabla 3.5.4.1-1. Los términos empleados están en inglés.

Tabla 3.5.4.1 -1 Términos de Búsqueda

CRITERIOS PICOC	DESCRIPCIÓN	TÉRMINOS DE BÚSQUEDA
<b>Population</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas para la Guía, Navegación, Control para el diseño de software. Aviones.</li> </ul>	Guidance Navigation Control Aircraft
<b>Intervention</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Algoritmos para la Guía Navegación y Control para el diseño de software. Aviones.</li> </ul>	(Computer Science) (Math) (Engineering)
<b>Comparison</b>	Algoritmos Más usados.	
<b>Context</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigadores Aeronáuticos</li> <li>• Institutos de Investigación Aeronáutica</li> </ul>	

La cadena de búsqueda que se emplearía en las búsquedas es la siguiente:

GUIDANCE AND NAVIGATION AND CONTROL AND AIRCRAFT AND

((LIMIT-TO (SUBJAREA,"ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"COMP" ) OR LIMIT-TO(SUBJAREA,"MATH" ))

#### 3.6.1.2 Fases de Proceso de Búsqueda

El proceso de búsqueda comprendió dos fases:

La primera fase fue la búsqueda primaria, en la cual se empleó la base de datos Scopus [35].

La segunda fase fue la búsqueda secundaria, en la cual se emplearon los esquemas de clasificación, extracción de datos y proceso de mapeo sistemático.

### 3.6.1.3 Proceso de búsqueda y Selección

Se realizó la búsqueda en la base de datos, con la cadena de búsqueda escogida y se obtuvieron en total 13 014 artículos de investigación. En la tabla 3.5.4.3-1 se detalla la cantidad de estudios primarios encontrados y seleccionados, categorizados de acuerdo la base de dato empleada para realizar las búsquedas.

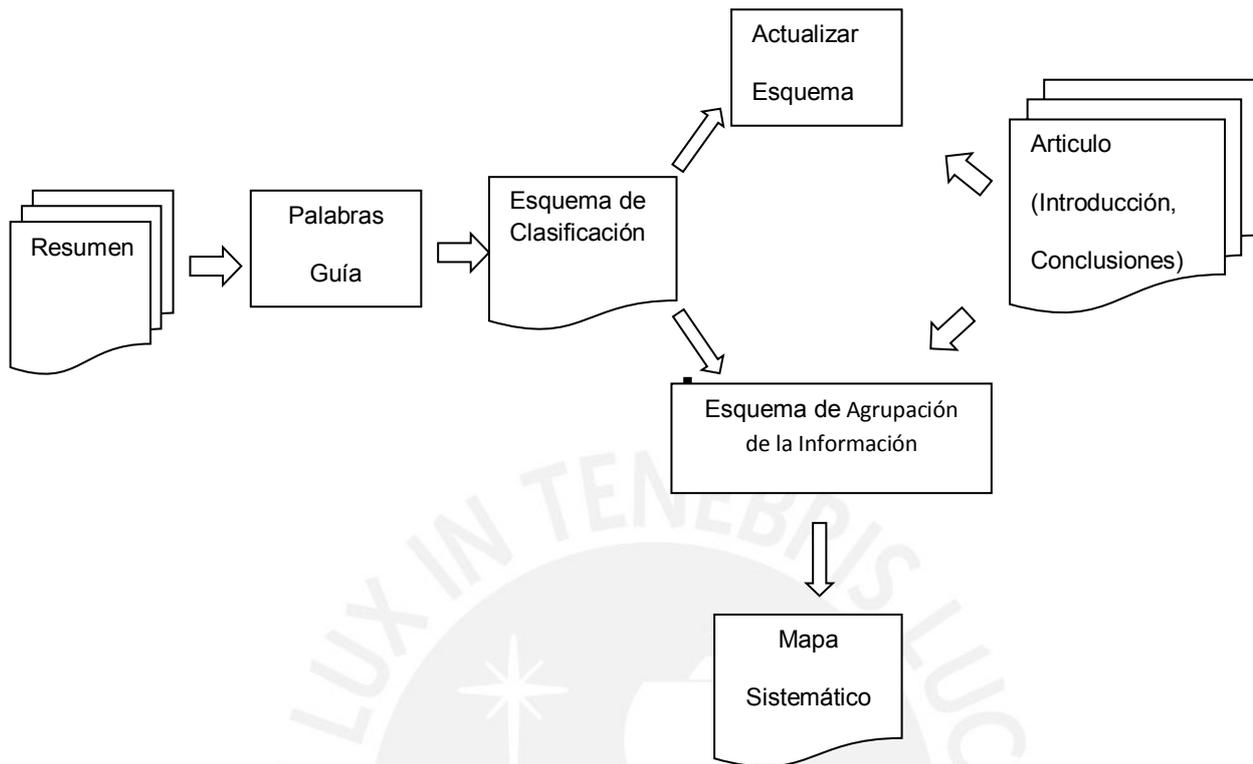
Tabla 3.5.4.3-1 Resumen de los resultados de búsqueda Primaria

ÍTEM	NOMBRE DE LA BASE DE DATOS	NUMERO DE RESULTADOS	NÚMERO DE ARTÍCULOS RELEVANTES
1	Scopus [35]	13014	13014
TOTAL			13014

### 3.6.2 Esquema de Clasificación del Mapeo Sistemático

Luego de la selección de la población de estudio que cuenta con 13 014 artículos de investigación, se procederá a realizar el mapeo sistemático que consiste en una búsqueda sistemática por medio de palabras guía ("Keywording"). Esta búsqueda se realizara en dos etapas [36]. Primera etapa: leer el resumen ("abstract") y buscar palabras guías y conceptos que refleje la contribución de artículo [36]; mientras se realiza eso también se identifica el contexto del artículo [36]. Esto a ayuda a definir un grupo de categorías que es representativo en la población de estudio [36]. Segunda Etapa: cuando los resúmenes son de pobre calidad para obtener palabras guías significativas, se optara por revisar la introducción o las conclusiones del artículo de investigación [36]. Cuando un grupo final de palabras guías han sido escogidas, estas podrán ser agrupadas y usadas para formar las categorías del mapa [36]. Ver esquema de clasificación en la figura 3.5.5-1.

Figura 3.5.5-1. Construyendo el esquema de Clasificación



De acuerdo a la segmentación de la población propuesta en Tabla 3.5.4.3-1, la búsqueda primaria inicial ha dado como resultados 13104 artículos de investigación, que en su contexto o aspecto generales son artículos de investigación referentes a guía, navegación y control en áreas de ingeniería, matemáticas y ciencias de la computación.

Para realizar el mapeo sistemático, se estudiara y clasificara esta población de 13 104 artículos de investigación referente a la Guía Navegación y Control; en las siguientes tres Facetas:

- Faceta de Contexto General: Esta faceta estructura el tema o área de enfoque.(Ver Tabla 3.5.5-1)
- Faceta de Contribución: El tipo de contribución: Metodología, proceso, operación, herramienta, entre otras.(Ver Tabla 3.5.5-2)
- Faceta de Investigación: Refleja el enfoque de la investigación del artículo de investigación (Ver Tabla 3.5.5-3)

Las categorías mencionadas se tomaron en cuenta para facilitar la interpretación y usadas para clasificar sin evaluar cada artículo de investigación en detalle.

Tabla 3.5.5-1 Facetas De Contexto General

<b>FACETA DE CONTEXTO GENERAL</b>	
<b>Palabra Guía</b>	<b>Descripción</b>
Navigation	Navegación
Guidance	Guía
Control	Control
Algorithm	Algoritmo

Tabla 3.5.5-2 Facetas De Contribución

<b>FACETA DE CONTRIBUCION</b>	
<b>Palabra Guía</b>	<b>Descripción</b>
Navigation	Navegación
Guidance	Guía
Control	Control
Navigation System	Sistema de navegación
Guidance System	Sistema Guía
Control System	Sistema de Control
flight	Vuelo
Aircraft/Airplane	Aeronave
UAV	Vehículo Aéreo No tripulado
missile	Misil
helicopter	Helicóptero
controller	Controlador
actuator	Actuador
sensor	Sensor
Trajectory	Trayectoria
path	Camino
landing	Aterrizaje
Take off	Despegue
track	Seguimiento
maneuver	Maniobra
autopilot	Piloto Automático

Tabla 3.5.5-3 Facetas de Investigación

FACETA DE INVESTIGACION: ALGORITMOS	
Palabra Guía	Descripción
Fault	Falla-Control tolerante a la Falla
Fuzzy	Fuzzy-Control Adaptivo
Non linear	Control No lineal
robust	Control Robusto
Dynamic inversion	Inversión Dinámica-Control No Lineal
adaptive	Control Adaptativo
Allocation	Asignación-Control Robusto
network	Red-Control Adaptativo
neural	Neuronal-Control adaptativo
attitude	Posición-Control
Genetic	Genético-Control Robusto
Filter	Filtro
Kalman	Kalman-Filtro de Kalman
Feedback	Retro alimentación-Control No lineal
backstep	Paso atrás-Control No lineal
sliding	Deslizante-Control No lineal
reconf	reconfiguración
simulation	Simulación

### 3.6.3 Extracción de Datos y Estudio de Mapeo (Mapeo Sistemático)

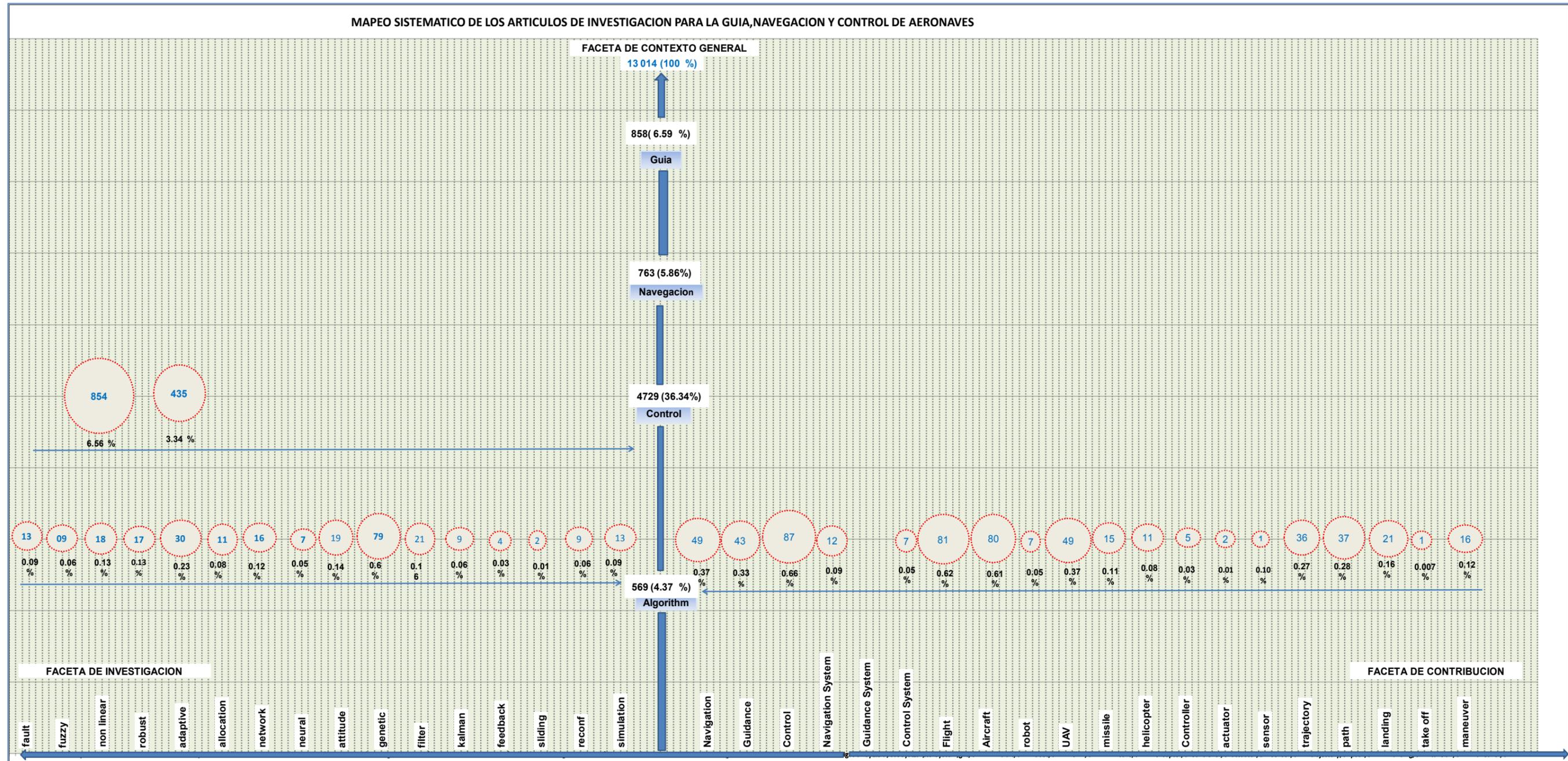
Teniendo el esquema de clasificación definido, los artículos son agrupados en el esquema [36]. Como se muestra en la Tabla 3.5.6-1, el esquema de clasificación evoluciona mientras se realiza la extracción de los datos, como: añadiendo nuevas categorías o uniendo o dividiendo categorías existentes. En este paso, se usa la Tabla para documentar el proceso de extracción de datos. La Tabla contiene cada categoría del esquema de clasificación [36]. Cuando se ingresan la data de un artículo en el esquema, se sustentan porque el artículo debería estar en cierta categoría [36]. Para finalizar la Tabla, las frecuencias de las publicaciones en cada categoría deben ser calculadas [36].

El análisis de los resultados se enfocan en presentar las frecuencias de las publicaciones en cada categoría [36]. Esto hace posible ver cual categoría ha sido enfatizada en investigaciones pasadas y así identificar las brechas y oportunidades para futuras investigaciones [36]. Los dos mapas usan diferentes maneras de presentar y analizar los resultados [36].

El mapa de diseño orientado a objetos es ilustrado usando un resumen de estadísticas en forma de tablas, mostrado las frecuencias de las publicaciones en cada categoría [36]. El tipo de intervención fue usada en el mapa de diseño orientado a objetos para estructurar el tema y contar el número de artículos de investigación para cada tipo de intervención [36]. En el estudio, se usa un gráfico de burbujas para reportar las frecuencias como se muestra en la Tabla 3.5.6-1.

Esto es básicamente dos gráficos de dispersión x-y con burbujas en las intersecciones de cada categoría [36]. El tamaño de la burbuja es proporcional al número de artículos que están en par de categorías que corresponden a las coordenadas de las burbujas [36]. La misma idea es usada dos veces, en diferentes cuadrantes del mismo diagrama para mostrar la intersección de la tercera faceta [36]. Si el mapeo sistemático tiene más de tres facetas, gráficos de burbuja adicionales pueden ser añadidos en el mismo diagrama o se puede tener múltiples diagrama con diferentes combinaciones de facetas [36].

Tabla 3.5.6-1 Mapeo Sistema de los Artículos de Investigación para la Guía, Navegación de Superficies Aerodinámicas



### 3.6.4 Resultados del Mapeo Sistemático

De acuerdo a los resultados realizados en la búsqueda primaria propuestos el criterios de selección de PICOC, que se describen la cual está en la Tabla 3.5.4.1-1; se realizó el mapeo sistemático de acuerdo a lo facetas propuestas en el esquema de clasificación (Ver 3.5.5-1). Por tanto se adjunta el resumen de los resultados obtenidos en la Tabla 3.6.4-1 y Tabla 3.6.4-2:

Tabla 3.6.4-1 Resumen de las Facetas de Investigación más usadas para los artículos de Investigación para la Guía, Navegación y Control de Aeronaves

ÍTEM	FACETAS DE INVESTIGACIÓN	CANTIDAD	FRECUENCIA (%)
1	Genetic	79	0.6
2	adaptive	30	0.23
3	Filter	21	0.16
4	attitude	19	0.14
5	Non linear	18	0.13
6	Robust	17	0.13
7	Network	16	0.12
8	Fault	13	0.09
9	Allocation	11	0.08
10	fuzzy	09	0.06
11	reconf	09	0.06
12	Kalman	09	0.06
13	neural	07	0.05
14	feedback	4	0.03
15	sliding	2	0.01
<b>TOTAL DE ARTÍCULOS DE INVESTIGACION ESTUDIADOS</b>		569	4.37

Tabla 3.6.4-2 Resumen de las Facetas de Contribución más usadas para los artículos de Investigación para la Guía, Navegación y Control de Aeronaves

ÍTEM	FACETAS DE CONTRIBUCIÓN	CANTIDAD	FRECUENCIA (%)
1	Control	87	0.66
2	Flight	81	0.62
3	Aircraft	80	0.61
4	Navigation	49	0.37
5	UAV	49	0.37
6	Guidance	43	0.33
7	Path	37	0.28
8	Trajectory	36	0.27
9	Landing	21	0.16
10	Maneuver	16	0.12
11	Missile	15	0.11
12	Navigation System	12	0.09
13	Helicopter	11	0.08
14	Sensor	11	0.1
15	Control System	7	0.05
16	Robot	7	0.05
17	Controller	5	0.03
18	Actuator	2	0.01
19	Take off	1	0.007
20	Guidance System	0	0
<b>TOTAL DE ARTÍCULOS DE INVESTIGACION ESTUDIADOS</b>		569	4.37

### 3.6.5 Observaciones

A. De una población total de estudio de 13 014 artículos de investigación:

- 569 artículos de investigación hacen referencia a la palabra Algoritmos. Esto es 4.37% de la población total de estudio.
- 4729 artículos de investigación hacen referencia a la palabra Control. Esto es 36.34% de la población total de estudio.

- 763 artículos de investigación hacen referencia a la palabra Navegación. Esto es 5.86% de la población total de estudio.
  - 858 artículos de investigación hacen referencia a la palabra Guía. Esto es 6.69% de la población total de estudio.
- B.** De una población de 569 artículos de investigación que hace referencia a la palabra algoritmo:
- 87 artículos son algoritmos para Control. Esto es 0.66 % de la población total de estudio.
  - 49 artículos son algoritmos para la Navegación. Esto es 0.37 % de la población total de estudio.
  - 43 artículos son algoritmos para la Guía. Esto es 0.33 % de la población total de estudio.
- C.** De una población de 4729 artículos de investigación que hace referencia a la palabra control:
- 854 artículos son de Control Adaptativo. Esto es 6.56 % de la población total de estudio.
  - 435 artículos son de Control No lineal. Esto es 3.34 % de la población total de estudio.
- D.** De una población de 569 artículos de investigación que hace referencia a la palabra algoritmo:
- 79 artículos son de Control Genético-Robusto. Esto es 0.6 % de la población total de estudio.
  - 30 artículos son de Control Adaptativo. Esto es 0.23 % de la población total de estudio.
  - 18 artículos son de Control No lineal. Esto es 0.13 % de la población total de estudio.
  - 17 artículos son de Control Robusto. Esto es 0.13 % de la población total de estudio.
  - 13 artículos son de Control tolerable a la Falla. Esto es 0.09 % de la población total de estudio.

### 3.6.6 Conclusiones

- A. Los resultados muestran que los artículos de investigación usadas con mayor frecuencia, por la comunidad aeronáutica, son para el Control (36.34%), Guía (6.59%), navegación (5.86 %) de una población de 13 014 artículos de investigación.
- B. Actualmente se han desarrollado más artículos de investigación para sistemas de control (36.34%), que para los sistemas de guía (6.59%), y navegación (5.86 %) de aeronaves. Se hace la observación que a la fecha, la FAA tiene problemas en certificar (Ver 3.3.) el software de los controladores de vuelo de gran confiabilidad a diferentes condiciones de vuelo. Por tanto, a raíz de este problema actual, se está focalizando nuestro estudio a realizar una búsqueda sistemática de los algoritmos de control no lineal y adaptativo más citados, usados y aceptados por la comunidad aeronáutica, teniendo en cuenta los términos de referencia de la Conferencia 2016 para la guía, navegación y control (Ver 2.3)
- C. De los 569 artículos de investigación que hace referencia la palabra algoritmo sobre una población de 13 014 artículos de investigación, 87 artículos (0.66%) son artículos de investigación para sistemas de Control de Aeronaves. De estos 87 artículos de investigación (0.66%), 30 son de control adaptivo (0.23 %) y 18 de control no lineal (0.13%). Teniendo en cuenta que la información de estos 87 artículos de investigación, no es representativa para una búsqueda sistemática de los algoritmos de control no lineal y control adaptivo más citados, usados por la comunidad aeronáutica, se ha estado considerando utilizar otra población más representativa.
- D. Teniendo en cuenta que de los 4729 Artículos de Investigación (36.34%) que hace referencia la palabra Control sobre una población de 13 014 artículos de investigación, 854 artículos son de control Adaptativo (6.56 %) y 435 son de Control No lineal (3.34%). Por tanto se está optando por utilizar esta población para realizar la búsqueda sistemática de los algoritmos de control no lineal y control adaptativo más citados, usados por la comunidad aeronáutica.

### 3.7 Búsqueda Sistemática

Esta parte del estudio contiene el detalle del protocolo de revisión, el cual será la base para realizar la revisión sistemática de los artículos de investigación de intereses, y que tiene los siguientes objetivos específicos:

#### 3.7.1 Objetivos del Estudio

- Realizar un resumen del estado del arte de los algoritmos de control no lineal y control adaptativo que actualmente han sido estudiados usando simulaciones numéricas y testeos a escala por los investigadores Aeronáuticos, Institutos de Investigación Aeronáutica o Autoridad Competente (FAA).

#### 3.7.2 Diseño de la Revisión Sistemática

La revisión sistemática se realiza con la finalidad de resumir toda la información que existe acerca de las preguntas de investigación propuestas. Los métodos que son empleados para facilitar la realización de una revisión sistemática se especifican en el siguiente protocolo de revisión [37,44]:

##### 3.7.2.1 Preguntas de Investigación

Formulación de las preguntas de investigación en base al método PICOC, el cual significa Population (población), Intervention (intervención), Comparison (comparación), Outcome (resultado) y Context (contexto) [37].

##### 3.7.2.2 Estrategias de Búsqueda para estudios primarios

Los términos de búsqueda usados en nuestra revisión sistemática fueron desarrollados usando los siguientes pasos [44]:

- a) Derivar los principales términos de búsqueda de las preguntas de investigación identificando la Población, Intervención, Comparación, resultado y contexto.
- b) Identificar las palabras guías en los documentos de investigación relevantes.
- c) Identificar palabras alternativas y sinónimos de los términos de búsqueda con la ayuda de un diccionario de sinónimos.
- d) El uso del booleano "O" para construir cadenas de búsqueda de los términos de búsqueda con similar significado.
- e) El uso del booleano "y" para concatenar los términos de búsqueda y restringir la búsqueda.

##### 3.7.2.3 Fases del Proceso de Búsqueda

El proceso de búsqueda empleado para la presente revisión sistemática consistió en dos fases: la búsqueda primaria y la búsqueda secundaria [44].

La fase de búsqueda primaria se realizó en las base de datos bibliográficas de resúmenes y citas de artículos de revistas científicas y técnicas, actas de congresos e informes técnicos [44].

En la fase de búsqueda secundaria consiste en dos subprocesos [44]:

- 1.-Revisar las referencias de los estudios primarios seleccionados para encontrar algún artículo relevante.
- 2.-Revisar las citas de los estudios primarios seleccionados para encontrar algún artículo relevante.

#### **3.7.2.4 Criterios de Inclusión y Exclusión para la Selección del Estudio**

Se definen los criterios de selección de estudios con el objetivo de seleccionar aquellos estudios que ayuden a responder a las preguntas de investigación propuestas. Se definen criterios de inclusión y de exclusión [44].

#### **3.7.2.5 Selección de los Estudios**

La selección del estudio comprende dos procesos: selección inicial y selección final [44]. Durante la fase de selección inicial, se revisa los títulos y resúmenes de los estudios primarios potenciales teniendo en cuenta los criterios de inclusión y exclusión [44]. La selección final comprende examinar todo los artículos de investigación, examinando el contenido de todos los artículos de investigación, para tomar una decisión [44].

#### **3.7.2.6 Evaluación de la Calidad del Estudio**

Para la evaluación de la calidad del estudio, se desarrollaron listas de chequeo cuantitativas. Las listas de chequeo son un medio para evaluar la cualidad de los estudios seleccionados y por tanto su importancia como evidencia para responder las preguntas de investigación [44]. Estas listas de chequeo también pueden proveer un mejor criterio para los estudios de inclusión; de aquellos con puntuación baja son candidatos para ser excluidos debido a que no proveen evidencia confiable. Las listas de chequeo de calidad fueron compiladas de las preguntas integradas por Rias, Mendez y Tempero y rephraseadas de acuerdo a nuestras necesidades [44]. Esto resulta en 8 preguntas y cada pregunta evalúa una faceta de la calidad del estudio usando un escala de tres puntos: "Sí", "No" o "Parcialmente", con los puntos 1, 0 y 0.5 respectivamente. Por lo tanto, un estudio puede tener una calificación de 0 a 8 [44]. Una calificación del 3 se ha seleccionado como punto de corte por lo tanto, cualquier estudio por debajo es excluido de la lista de estudios seleccionados [44].

A continuación se presenta en Tabla 3.6.2.6-1 la lista de chequeo para realizar la evaluación cualitativa del presente estudio [45]:

Tabla 3.6.2.6-1 Listas de Chequeo de Calidad

ÍTEM	PREGUNTA	RESPUESTA
p1	¿Están las preguntas de investigación absueltas en los artículos de estudio?	Si/No/Parcialmente
p2	¿El estudio se basa sobre un cuerpo del conocimiento existente, es decir, explícitamente discute su contribución a la luz de un trabajo previo?	Si/No/Parcialmente
p3	¿Son las variables y métricas usadas en el estudio adecuadamente validadas y verificadas por ratios de calidad de manejo de las aeronaves (Cooper-Harper)?	Si/No/Parcialmente
p4	¿Son los resultados negativos presentados?	Si/No/Parcialmente
p5	¿Se puede replicar el estudio?	Si/No/Parcialmente
p6	¿Son sustentados los resultados?	Si/No/Parcialmente
p7	¿Está el algoritmo de Control no Lineal o Control Adaptativo descrito a fondo?	Si/No/Parcialmente
p8	¿Consigue los Siguietes resultados?: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aprendizaje en Línea.</li> <li>• Buen seguimiento de Error.</li> <li>• Rápida Adaptación.</li> </ul>	Si/No/Parcialmente

### 3.7.2.7 Extracción de Datos

La extracción de datos de todos los artículos seleccionados es el diseño de los formularios de extracción de datos para registrar con precisión la información obtenida a partir de los estudios seleccionados [44]. El contenido del formulario de extracción se desarrolló tal como sigue [44]:

- Ítem o Identificación del estudio de investigación.
- Algoritmos de estudio de acuerdo a los términos de inclusión y exclusión.
- Descripción.
- Año.
- Número de Citas.

### 3.7.2.8 Síntesis y Análisis de los datos Extraídos

La síntesis de los datos recopila y resume los resultados de los estudios primarios empleados en la revisión sistemática [44]. Los datos resumidos han sido relacionados con la pregunta de investigación propuesta en el presente

trabajo [44]. A continuación se presenta el formato de resumen de los resultados en la Tabla 3.6.2.8-1

Tabla 3.6.2.8-1 Formato de Resumen de los Resultados

ESTUDIO ID	TIPO DE ALGORITMO DE CONTROL NO LINEAL	TIPO DE ALGORITMO DE CONTROL ADAPTATIVO	RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS
---------------	---	--	-------------------------------

### 3.7.3 Realización de la revisión sistemática

#### 3.7.3.1 Definición de las Preguntas de Investigación

Identificar las preguntas de investigación es un componente importante de cualquier revisión sistemática de la literatura. Para la formulación de las preguntas de búsqueda, se usó el criterio de PICOC (Population, Intervention, Comparison, Outcome, Context).

Tabla 3.6.3.1-1 Aplicación del Método PICOC

CRITERIOS PICOC	DESCRIPCIÓN
<b>Population</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistemas para Control de Aeroplanos</li> </ul>
<b>Intervention</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Métodos y Algoritmos de Control No Lineal y control adaptivo</li> </ul>
<b>Comparison</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Algoritmos de Control no lineal y control adaptivo más usados.</li> </ul>
<b>Outcome</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El uso, aceptación y aprobación de los algoritmos dependen de la exactitud, confiabilidad, tiempos de respuesta reducidos.</li> </ul>
<b>Context</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigadores Aeronáuticos</li> <li>• Institutos de Investigación Aeronáutica</li> <li>• Autoridad Competente (FAA)</li> <li>• Empresas desarrolladoras de Software de Ingeniería Aeronáutica</li> <li>• Empresas Constructoras de Aviones.</li> </ul>

A continuación se muestra cómo se estructuraron la pregunta de investigación del presente trabajo:

Q1: De las investigaciones de control no lineal y adaptativo en aeroplanos, ¿cuál de los algoritmos de control no lineal y control adaptativo han sido estudiados usando simulaciones numéricas y tests a escala por los

*investigadores Aeronáuticos, Institutos de Investigación Aeronáutica o Autoridad Competente (FAA)?*

- Q1-Pop: Sistemas para Control de Aeroplanos.
- Q1-Int: Algoritmos de Control No lineal y Control Adaptativo.
- Q1-Com: Algoritmos de control no lineal y Control adaptativo estudiados y validados usando simulación numéricas y testeos a escala.
- Q1-Out: El rendimiento de estos algoritmos depende de la exactitud, seguridad, tiempos de respuesta reducidos, confiabilidad .
- Q1-Cont: Investigadores Aeronáuticos, Institutos de Investigación Aeronáutica o Autoridad Competente(Federal Aviation Administrator)

### 3.7.4 Estrategia de Búsqueda usada para los estudios primarios

La estrategia de búsqueda es definida en base a la población, intervención y salidas, los cuales son componentes de las preguntas de investigación.

Las siguientes sub-secciones detallan los términos de búsqueda así como las base de datos empleados en la revisión sistemática.

#### 3.7.4.1 Términos de Búsqueda

Considerando la información obtenida a través del método PICOC, se definieron los términos de búsqueda que se describen en la 3.6.4.1-1. Los términos empleados están en inglés.

Tabla 3.6.4.1-1 Términos de Búsqueda derivados del Método PICOC

CRITERIOS PICOC	DESCRIPCIÓN	PALABRAS DE BÚSQUEDA
<b>Population</b>	• Sistemas para el Control de Aviones	AIRPLANE CONTROL
<b>Intervention</b>	• Algoritmos de Control No Lineal y control adaptivo	(ADAPTIVE, NONLINEAR)
<b>Comparison</b>	• Algoritmos de Control no lineal y control adaptivo estudiados usando simulación numérica y testeos a escala.	-----
<b>Outcome</b>	• El rendimiento de estos algoritmos dependen de la exactitud, seguridad, tiempos de respuesta reducidos, confiabilidad.	-----
<b>Context</b>	• Investigadores Aeronáuticos • Institutos de Investigación Aeronáutica	-----

La cadena que se emplearía en las búsquedas, para la Tabla 3.6.4.1-1, es la siguiente:

CONTROL AND (AIRPLANE) AND TITLE- ABS (NONLINEAR) AND TITLE-ABS (ADAPTIVE)

### 3.7.5 Proceso de Búsqueda

Nuestro proceso de búsqueda comprende 2 fases: Búsqueda Primaria y Búsqueda Secundaria.

#### 3.7.5.1 Proceso de Búsqueda Primaria

La primera fase fue la búsqueda primaria, en la cual se emplearon las siguientes bases de datos: scopus, aerospace research central, acm e ieeexplore.

Se obtuvieron en total 239 artículos de las cuatro bases de datos consultadas; de las cuales, la base de datos de Scopus presenta 51 artículos duplicados de las otras tres bases de datos de estudio (IEE Xplore, ACM Digital Library, Aerospace Research Central). De acuerdo a la revisión del resumen y/o el artículo completo, se seleccionaron 173 estudios.

En la Tabla 3.6.5.1-1 se detalla la cantidad de estudios primarios encontrados y seleccionados, categorizados de acuerdo la base de datos empleada para realizar las búsquedas.

Tabla 3.6.5.1-1 Resumen de los resultados de búsqueda Primaria

ÍTEM	NOMBRE DE LA BASE DE DATOS	NÚMERO DE RESULTADOS	NÚMERO DE DUPLICADOS ENCONTRADOS DE OTRAS BASES DE DATOS	NÚMERO DE ARTÍCULOS RELEVANTES /NÚMERO DE ARTÍCULOS NO DUPLICADOS
1	IEEE Xplore[31]	33	33	0
2	ACM Digital library[32]	2	2	0
3	Aerospace Research Central[33]	16	16	0
4	Scopus[35]	188	51	173
Total		239		173

#### 3.7.5.2 Proceso de Búsqueda Secundaria

Notar que el proceso de búsqueda secundaria y el proceso de selección (Ver

3.7.7) fueron realizados iterativamente hasta que ningún nuevo estudio fuera identificado.

En el Anexo 1: "Listado de Artículos de Investigación de Control Adaptativo y Control No Lineal del Proceso de Búsqueda " se presenta el listado de los 173 estudios seleccionados en este proceso de búsqueda primaria y secundaria.

### **3.7.6 Criterios de Inclusión y Exclusión para la selección del estudio**

Cada estudio fue evaluado en la realización de la revisión sistemática para decidir cuál debe ser incluido y cual no. Los estudios encontrados bajo las siguientes condiciones fueron incluidos y excluidos de acuerdo lo siguiente:

#### Criterios de Inclusión:

- Algoritmos de control adaptativo (Adaptive control) y Control no lineal (nonlinear control) que han sido estudiados usando simulación numérica y testeos a escala por los investigadores e Institutos de Investigación Aeronáutica.
- Algoritmos dentro de las Áreas de Ingeniería, Matemáticas y Computación.
- Aeroplanos.

#### Criterios de Exclusión:

- Algoritmos que sirvan solo al Control Robusto
- Algoritmos que sirvan solo al Control Tolerable a la Falla
- Algoritmos que sirvan solo al Filtrado de Señales
- Algoritmos que sirvan solo a los Sistemas de Guía de la Aeroplanos.
- Algoritmos que sirvan solo a los Sistemas de Navegación de la Aeroplanos.
- Misiles, Cohetes, Globos aerostáticos o Aeronaves en General
- Algoritmos fuera de las Áreas de Ingeniería, Matemáticas y Computación.

### **3.7.7 Selección del Estudio**

Durante la fase de selección de los estudios se han identificado 14 artículos de investigación que cumplen los criterios de inclusión y exclusión. La tabla 3.6.7-1 proporciona la lista de los estudios seleccionados.

Tabla 3.6.7-1 Lista de Estudios Seleccionados

ID	AUTORES	TÍTULO DEL DOCUMENTO	AÑO	CITADO
24	Lei X., Ge S.S., Fang J.	Adaptive neural network control of small unmanned aerial rotorcraft	2014	
53	Nguyen N.T.	Optimal control modification for robust adaptive control with large adaptive gain	2012	12
87	Seiler P., Dorobantu A., Balas G.	Robustness analysis of an L 1 adaptive controller	2010	
101	Kaneshige J., Burken J.	Enhancements to a neural adaptive flight control system for a modified F-15 aircraft	2008	
114	Chowdhary G., Johnson E.N.	Flight test validation of a Neural Network based Long Term Learning Adaptive Flight Controller	2009	
117	Nguyen N.T., Ishihara A.K.	Robust adaptive optimal control modification with large adaptive gain	2009	6
126	Haga R., Matsuura A., Suzuki S., Kono M., Sakaguchi A.	Neural network based adaptive flight control using feedback error learning	2006	
142	Yu C., Zhu J., Sun Z.	Nonlinear adaptive internal model control using neural networks for tilt rotor aircraft platform	2005	3
143	Rysdyk R., Calise A.J.	Robust nonlinear adaptive flight control for consistent handling qualities	2005	47
147	Broderick R.L.	Adaptive verification for an on-line learning neural-based flight control system	2005	
149	Hageman J., Smith M., Stachowiak S.	Integration of online parameter identification and neural network for in-flight adaptive control	2003	
158	Fei J., Chen S., Tao G., Joshi S.M.	Robust adaptive control scheme for discrete-time system with actuator failures	2005	2
165	Rysdyk R., Calise A.J., Chen R.T.N.	Nonlinear adaptive control of tiltrotor aircraft using neural networks	1997	
171	Calise A.J., Rysdyk R.T.	Nonlinear adaptive flight control using neural networks	1998	210

### 3.7.8 Evaluación de la Calidad del Estudio

A continuación se presenta el resumen de la evaluación de la calidad del estudio en la Tabla 3.7.8-1:

Tabla 3.7.8-1 Evaluación de la Calidad de Estudio

ID	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	TOTAL
24	1	1	0,5	0	1	1	1	1	6,50
53	1	1	0,5	0	1	1	1	1	6,50
87	0	1	0	0	1	1	0	0	3,00
101	1	1	0,5	0	1	1	1	1	6,50
114	1	1	0,5	0	1	1	1	1	6,50
117	1	1	0,5	0	1	1	1	1	6,50
126	1	1	0,5	0	1	1	1	1	6,50
142	1	1	0,5	0	1	1	1	1	6,50
143	1	1	0,5	0	1	1	1	1	6,50
147	1	1	0,5	0	1	1	1	1	6,50
149	1	1	0,5	0	1	1	1	1	6,50
158	0	1	0	0	1	1	0	0	3,00
165	1	1	0,5	0	1	1	1	1	6,50
171	1	1	0,5	0	1	1	1	1	6,50

### 3.7.9 Resultados

#### 3.7.9.1 Resultados Estadísticos del proceso de Búsqueda Primaria y Secundaria

A continuación se hace un resumen del porcentaje de incidencia de los algoritmos de control no lineal y adaptivo en una población de 173 artículos de investigación seleccionados en el estudio primario (Ver Anexo 1: Listado de Artículos de Investigación de Control Adaptativo y No lineal del proceso de Búsqueda Primaria y Secundaria). El porcentaje que se muestra en la tabla 3.7.9.1-1 se ha calculado en base al número de estudios en los que se ha empleado o usado un determinado algoritmo sobre el total de los mismos.

Tabla 3.7.9.1-1 Algoritmos de Control no lineal y Control adaptivo estudiados seleccionados más usados o empleados

ÍTEM	MÉTODO ELEGIDO DE CONTROL ADAPTATIVO NO LINEAL	CANTIDAD	PORCENTAJE
1	MIMO-Nonlinear Control.	6	3.47%
2	Active Disturbance Rejection-nonlinear control	2	1.16%
3	Dynamic Surface Control-nonlinear control	7	4.05%
4	Feedback linearization -nonlinear control	4	2.31%
5	Lyapunov-nonlinear control	44	25.43%
6	High gain observer -nonlinear control	1	0.58%
7	Asymptotic Tracking Position-nonlinear control	8	4.62%
8	Dynamic inversion-non linear control	26	15.03%
9	Sliding Mode-nonlinear control	17	9.83%
10	Backstepping-nonlinear control	21	12.14%
11	Immersion and invariance (I&I)-Adaptive Control	1	0.58%
12	Neural Network-Adaptive Control	88	50.87%
13	Fuzzy-Adaptive Control	26	15.03%
14	Model Reference -Adaptive Control	7	4.05%

ÍTEM	MÉTODO ELEGIDO DE CONTROL ADAPTATIVO NO LINEAL	CANTIDAD	PORCENTAJE
15	Nussbaum gain method- Adaptive Control	3	1.73%
16	Allocation-Robust Control	6	3.47%
17	Robust $H^\infty$ -Robust Control	4	2.31%
18	Fault tolerant Control	17	9.83%
19	Robust Control	90	52.02%
20	Non linear Control	78	45.09%
21	Adaptive Control	173	100.00%
<b>TOTAL</b>		<b>173</b>	<b>100.00%</b>

En la Tabla 3.7.9.1-2 se exponen las posibles respuestas, en torno al método de control no lineal más usados:

Tabla 3.7.9.1-2 Métodos de Control No lineal

ÍTEM	MÉTODO	CANTIDAD	PORCENTAJE
1	Non linear Control	78	45.09%
2	Lyapunov-nonlinear control	44	25.43%
3	Dynamic inversion-non linear control	26	15.03%
5	Backstepping-nonlinear control	21	12.14%
6	Sliding Mode-nonlinear control	17	9.83%
8	Asymptotic Tracking Position-nonlinear control	8	4.62%
9	Dynamic Surface Control-nonlinear control	7	4.05%
11	MIMO-Nonlinear Control.	6	3.47%
13	feedback linearization -nonlinear control	4	2.31%
16	Active Disturbance Rejection-nonlinear control	2	1.16%
17	high gain observer -nonlinear control	1	0.58%

En la Tabla 3.9.9.1-3 se exponen las posibles respuestas, en torno al método de control adaptativo más usado:

Tabla 3.7.9.1-3 Métodos de Control Adaptativo

ÍTEM	MÉTODO	CANTIDAD	PORCENTAJE
1	Neural Network-Adaptive Control	88	50.87%
2	Fuzzy-Adaptive Control	26	15.03%
3	Model Reference -Adaptive Control	7	4.05%
4	Nussbaum gain method- Adaptive Control	3	1.73%
5	Immersion and invariance (I&I)- Adaptive Control	1	0.58%

### 3.7.9.2 Resultados de Selección de los estudios

A continuación se muestra los resultados de la selección de estudios propuestos en la tabla Tabla 3.7.9.2-1 en respuesta a la pregunta de investigación:

Q1: De las investigaciones de control no lineal y adaptativo en aeroplanos, ¿cuál de los algoritmos de control no lineal y control adaptativo han sido estudiados usando simulaciones numéricas y tests a escala por los investigadores Aeronáuticos, Institutos de Investigación Aeronáutica o Autoridad Competente (FAA)?

Los 12 estudios seleccionados en la tabla Tabla 3.7.9.2-1 cumplen con los requerimientos propuestos en la lista de chequeo propuesto en la Tabla 3.7.8-1

Tabla 3.7.9.2-1 Resultados de la Selección de Estudios

ESTUDIO ID	TIPO DE ALGORITMO DE CONTROL NO LINEAL	TIPO DE ALGORITMO DE CONTROL ADAPTATIVO	RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS
24	Lyapunov	Neuronal Network	<ul style="list-style-type: none"> <li>Redes Neuronales con aprendizaje en línea.</li> <li>Control con retroalimentación.</li> <li>Buen rendimiento de seguimiento.</li> </ul>
53	Dynamic Inversion	Optimal Control Modificaction	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adaptación rápida sin pérdida de robustez(estabilidad)</li> <li>Reducir al mínimo la norma L2 de seguimiento.</li> </ul>
101	Dynamic Inversion	Neuronal Network	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adaptado para cualquier cambio aerodinámico por falla o pérdida de superficie.</li> <li>Seguimiento del error para cambiar la ley de control</li> </ul>

114	Dynamic Inversion Concurrent learning adaptive law	Neuronal Network	<ul style="list-style-type: none"> <li>La ley de aprendizaje simula la memoria a largo plazo mediante el uso de un arreglo histórico de datos para la adaptación al instante.</li> </ul>
117	Dynamic Inversion	Neuronal Network optimal control modification	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducir al mínimo la norma L2 de seguimiento.</li> <li>utilizado para un mejor seguimiento y proporcionar suficiente estabilidad robusta.</li> <li>La falta de métricas de estabilidad para el control adaptativo es vista como una barrera para el desarrollo de la tecnología de control adaptativo certificable para los sistemas de seguridad crítica.</li> <li>El equilibrio entre la estabilidad y la adaptación</li> </ul>
126	Dynamic Inversion	Neuronal Network	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estos resultados muestran que el sistema de control propuesto es capaz de mejorar todo el rendimiento de control.</li> </ul>
142	Dynamic Inversion Lyapunov	Neuronal Network	
143	Lyapunov	Neuronal Network	<ul style="list-style-type: none"> <li>El diseño de control proporcionar un piloto de rotor basculante con cualidades de manejo consistentes durante la conversión de vuelo de ala fija a vuelo suspendido.</li> </ul>
147		Neuronal Network	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verificación de un IFCS (Intelligent Flight Control System ) basado en redes neurales es actualmente un tema de investigación y caso de ingeniería urgente y significativa.</li> </ul>
149		Neuronal Network	<ul style="list-style-type: none"> <li>Óptima y Estocástica alimentación anticipada y técnica de retroalimentación.</li> <li>IFCS algoritmo de control.</li> <li>Sistema de aprendizaje en línea.</li> </ul>
165	Lyapunov	Neuronal Network	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aprendiendo mientras se controla</li> </ul>
171		Neuronal Network	<ul style="list-style-type: none"> <li>La acotación de las señales de error y control de seguimiento está garantizado</li> </ul>

A continuación se presentan los resultados estadísticos en la Tabla 3.7.9.2-2 de los algoritmos de control no lineal y control adaptativo que hacen referencia los 12 estudios seleccionados para responder la pregunta de investigación y que han sido estudiados usando simulaciones numéricas y testeos a escala por los investigadores Aeronáuticos, Institutos de Investigación Aeronáutica o Autoridad Competente.

Tabla 3.7.9.2-2 Resultados Estadísticos de la Selección de Estudios

TIPO ALGORITMO	ALGORITMO	CANTIDAD	PORCENTAJE
Adaptativo	Neuronal Network	11	92 %
No lineal	Lyapunov	4	33.33 %
No lineal	Dynamic Inversion	6	50 %
Adaptativo	Optimal Control Modification	2	16.66 %
Total		12	100 %

### 3.7.10 Interpretación de los datos y Conclusiones

- A.** De una población de 173 artículos de investigación de la búsqueda primaria y secundaria, los algoritmos utilizadas con mayor frecuencia son: Control Robusto (52.02%), Redes Neuronales (50.87%), Control no lineal (45.09%), Control no lineal con el método de Lyapunov (25.43%), Control Adaptivo con el Método Fuzzy (15.03%), Control no Lineal con el Método Paso atrás (12.14%), entre otros.
- B.** En la presente tesis, de acuerdo a la información procesada de la Búsqueda Primaria y Secundaria (Ver Anexo 1), se puede concluir estadísticamente que los investigadores aeronáuticos toman como línea base para el desarrollo sus aplicaciones o investigación la técnica de Lyapunov (25.43%) para el control no lineal y el desarrollo de redes neuronales (50.87%) y método fuzzy (15.03%) para el control adaptativo; los cuales han sido validados por la evaluación del estado del arte propuestos en la Tabla 3.7.9.1-2 y Tabla 3.7.9.1-3.
- C.** En la presente tesis, respondiendo la pregunta de investigación de la presente Revisión Sistemática objeto de estudio:

De los investigaciones de control no lineal y adaptativo en aeroplanos, ¿cuál de los algoritmos de control no lineal y control adaptativo han sido estudiados usando simulaciones numéricas y testeos a escala por los investigadores Aeronáuticos, Institutos de Investigación Aeronáutica o Autoridad Competente (FAA)?

Respondiendo a la interrogante anterior se concluye que los algoritmos de control no lineal para control de vuelo estudiados usando simulaciones numéricas y testeos a escala más usados son:

- Lyapunov (92%).

- Dynamic Inversion(50%).

Respondiendo a la interrogante anterior se concluye que los algoritmos de adaptativos para control de vuelo estudiados usando simulaciones numéricas y testeos a escala más usados son:

- Neuronal Network (33.33%).
- Optimal Control Modification (16.66%).



## 4.0 CONCLUSIONES

- A. De acuerdo al mapeo sistemático realizado, los resultados muestran que los artículos de investigación utilizados con mayor frecuencia son para el Control (36.34%), Guía (6.59%), navegación (5.86 %) de una población de 13 014 artículos de investigación. Por tanto se puede afirmar que los investigadores se centran en el desarrollo de sistemas para control de aviones.
- B. De acuerdo a la información procesada obtenida de la búsqueda primaria y secundaria de la revisión sistemática, se obtuvieron 173 artículos de investigación de estudio, de los cuales se concluye estadísticamente que los algoritmos para control No lineal más usados por los investigadores para el desarrollo de softwares en los sistemas de Control de Aviones, son los siguientes:
- Lyapunov Method (25.43%)
  - Dynamic inversion Method (15.03%)
  - Backstepping Method (12.14%)
  - Sliding mode Method (9.83%)
- C. De acuerdo a la información procesada obtenida de la búsqueda primaria y secundaria de la revisión sistemática, se obtuvieron 173 artículos de investigación de estudio, de los cuales se concluye estadísticamente que de los algoritmos para control Adaptativo , más usados por los investigadores para el desarrollo de software en los sistemas de Control de Aviones, son el siguientes:
- Neural Network-Adaptive Control (50.87%)
  - Fuzzy-Adaptive Control (15.03%)
- D. En la presente tesis, de acuerdo a lo pregunta de investigación realizada se concluye que de la información extraída de los 12 estudios de investigación seleccionados; los investigadores aeronáuticos toman como línea base para el desarrollo de controladores de vuelo no lineal y adaptativo los siguientes algoritmos: la técnica de Lyapunov (92%) para el control no lineal y redes neuronales (33.33%) para el control adaptativo; los cuales han sido validados en las tablas:Tabla 3.7.9.2-1 y Tabla 3.7.9.2-2 .

## 5.0 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] "AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference Call for Papers," *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, 2016
- [2] K.A.Wise and D.J.Broy, "Agile Missile Dynamics and Control," AIAA 96-3912, *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, 1996.
- [3] A.Isidori, *Nonlinear Control Systems*, Springer-Verlag, Berlin, 1989.
- [4] G.Meyer and L.Cicolani, "Application of Nonlinear Systems Inverses to Automatic Flight Control Design System Concepts and Flight Evaluations," *AGARDograph AG-251 on Theory and Applications of Optimal Control in Aerospace Systems*, NATO, pp. 10-1 to 10-29, 1980.
- [5] P.K.A.Menon, G.B.Chatterji and V.H.L.Cheng, "A Two-Time-Scale Autopilot for High Performance Aircraft," *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 1991.
- [6] D.J.Bugajski, D.F.Enns and M.R.Elgersma, "A Dynamic Inversion Based Control Law With Application to the High Angle of Attack Research Vehicle," *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, pp. 20-22, 1990.
- [7] S.A.Snell, D.F.Enns and W.L.Garrard, "Nonlinear Inversion Flight Control for a Supermaneuverable Aircraft," *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 15, No. 4, pp. 976-984, 1992.
- [8] J.M.Buffington, A.G.Sparks and S.S.Banda, "Full Conventional Envelope Longitudinal Axis Flight Control with Thrust Vectoring," *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 415-419, 1993.
- [9] J.S.Brinker and K.A.Wise., "Stability and Flying Qualities Robustness of a Dynamic Inversion Aircraft Control Law," *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 19, No. 6, pp. 1270-1277, 1996.
- [10] R.J.Adams and S.S.Banda, "An Integrated Approach to Flight Control Design Using Dynamic Inversion and *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 1385-1389, 1993.
- [11] J.M.Buffington, R.J.Adams and S.S.Banda, "Robust Nonlinear High Angle of Attack Control Design for a Supermaneuverable Vehicle," *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, pp. 690-700, 1993.

- [12] M.Krstic, I.Kanellakopoulos and P.V.Kokotovic, *Nonlinear and Adaptive Control Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.
- [13] M.Krstic, J.Sun and P.V.Kokotovic, "Control of Feedback Linearizable Systems with Input Unmodeled Dynamics," *Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control*, pp. 1633-1638, 1994.
- [14] P.V.Kokotovic, "The Joy of Feedback: Nonlinear and Adaptive," *IEEE Control Systems*, Vol. 12, No. 3, pp. 7-17, 1992.
- [15] H.Khalil, *Nonlinear Systems*, Macmillan Publishing Company, New York, 1992.
- [16] Narendra, et-al., *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 25, pp. 433-461, 1980.
- [17] S.S.Sastry and A.Isidori, "Adaptive Control of Linearizable Systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 34, No. 11, pp. 1123-1131, 1989.
- [18] I.Kanellakopoulos, P.V.Kokotovic and A.S.Morse, "Systematic Design of Adaptive Controllers for Feedback Linearizable Systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 36, No. 11, pp.1241-1253, 1991.
- [19] B.B.Peterson and K.S.Narendra, "Bounded Error Adaptive Control," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 27, No. 6, pp. 1162-1168, 1982.
- [20] K.Hornik, M.Stinchcombe and H.White, "Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators," *Neural Networks*, Vol. 2, No. 5, pp. 359-366, 1989.
- [21] R.M.Sanner and J.E.Slotine, "Gaussian Networks for Direct Adaptive Control," *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 3, No. 6, pp. 837-863, 1992.
- [22] R.L.Barron *et al.*, "Applications of Polynomial Neural Networks to FDIE and Reconfigurable Flight Control," *Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, pp. 507-519, 1990.
- [23] D.J.Linse and R.F.Stengel, "Identification of Aerodynamic Coefficients Using Computational Neural Networks," *Proceedings of the AIAA Aerospace Design Conference*, Irvine, CA, 1992.
- [24] W.L.Baker and J.A.Farrell, "Learning Augmented Flight Control for High Performance Aircraft," *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, pp. 347-358, 1991.

- [25] J.E.Steck and K.Rokhasz, "Use of Neural Networks in Control of High Alpha Maneuvers," *30th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, 1992.
- [26] P.J.Werbos, "Neural Networks and Flight Control: Overview of Capabilities and Emerging Applications," *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, pp. 912-919, 1995.
- [27] M.Steinberg, "Potential Role of Neural Networks and Fuzzy Logic in Flight Control Design and Development," *Proceedings of the AIAA Aerospace Design Conference*, Irvine, CA, 1992.
- [28] M.Steinberg, "An Initial Assessment of Neural Network and Fuzzy Logic Technology for Flight Control Systems," *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 173-177, 1994.
- [29] Rysdyk, R.T., Calise, A.J., " Nonlinear Adaptive Flight Control using Neural Networks," School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology.
- [30] Kitchenham, B.A. and S. Charters, "Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering," Technical Report EBSE-2007-01, School of Computer Science and Mathematics, Keele University, 2007.
- [31] IEEE XPLORE, <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>, 2015
- [32] ACM DIGITAL LIBRARY, <http://dl.acm.org/>, 2015
- [33] AEROSPACE RESEARCH CENTRAL, <http://arc.aiaa.org/>, 2015
- [34] GOOGLE SEARCH, <http://www.google.com>, 2015.
- [35] SCOPUS, <http://www.scopus.com/>, 2015
- [36] K. Petersen, R. Feldt, S. Mujtaba, M. Mattsson, " Systematic Mapping Studies in Software Engineering," *Proceedings of the 12th International Conference on Evaluation and Assesment in Software Engineering*, pp. 68-77, 2008.
- [37] B. Kitchenham, "Procedures for performing systematic reviews," Keele, UK, Keele University, vol. 33, 2004.
- [38] ELSEVIER, <http://www.journals.elsevier.com/journal-of-computational-science/>.
- [39] Debasish Ghose, "Navigation, Guidance and Control," *Department of Aerospace Engineering Indian Institute of Science Bangalore, India*, pp. 1-2,

2013.

[40] FAA, Advanced Avionics Handbook, [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aviation/advanced\\_avionics\\_handbook/](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/advanced_avionics_handbook/)

[41] FAA, Flight Navigator Handbook, [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aviation/media/FAA-H-8083-18.pdf](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/media/FAA-H-8083-18.pdf)

[42] FAA, Instrument Flying Handbook, [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aviation/media/FAA-H-8083-15B.pdf](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/media/FAA-H-8083-15B.pdf).

[43] National Aeronautic and Space Administration (NASA), "Beginner's Guide to Aerodynamics", "<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/airplane.html>", 2015.

[44] M. Riaz, E. Mendes and E. Tempero, "A Systematic Review of Software Maintainability Prediction and Metrics", Department of Computer Science, The University of Auckland, New Zealand, 2007.

[45] M. Riaz, E. Mendes and E. Tempero, "Protocol for Systematic Literature Review of "Maintainability Prediction of Software Applications", The University of Auckland, New Zealand, 2008.

[46] S. Jacklin, M. Lowry, J. Schumann and P. Gupta, "Verification, Validation, and Certification Challenges for Adaptive Flight-Critical Control System Software", NASA Ames Research Center, California, 2008.

[47] Thien-Anh Pham, " Validation and Verification of Aircraft Control Software for Control Improvement", Department of Computer Science, San Jose State University, 2007.

[48] Farid Kendoul, " A survey of advances in guidance, navigation and control of unmanned rotorcraft systems.", Australian Research Centre for Aerospace Automation (ARCAA), Australia, 2011.