

MONOGRAFÍA DE AVANCES EN LA AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE VUELO EN AERONAVES

(septiembre de 2024)

Pablo Andrés Moros Solano, Tutor Luis Fernando Perico Remolina
Facultad de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Santo Tomás Bucaramanga, Colombia,
pams2007@hotmail.com, luis.perico@ustabuca.edu.co

Resumen - Este documento presenta una investigación exhaustiva sobre la tecnología detrás del control de vuelo moderno. Explora los primeros pasos en la automatización de los sistemas de vuelo y los avances críticos que han llevado al desarrollo de aeronaves modernas y estables. Se explica claramente el funcionamiento de los motores de aeronaves comunes y cómo los sistemas de control modernos permiten a los pilotos concentrarse principalmente en la aceleración del motor. Además, se analizan los componentes clave de las aeronaves actuales, incluidos los materiales de construcción y los sistemas de propulsión. Se describe la tecnología de control digital de motor de autoridad total (FADEC), que optimiza el control del motor y mejora la eficiencia y la seguridad del vuelo. Finalmente, se discuten las aplicaciones y los beneficios de esta tecnología en la aviación moderna.

Palabras claves: FADEC, control, turborreactor, avión.

Monograph on advances in automation and flight control in aircraft

Abstract - This document presents a comprehensive investigation into the technology behind modern flight control. It explores the early steps in the automation of flight systems and the critical advances that have led to the development of modern, stable aircraft. The functioning of common aircraft engines and how modern control systems allow pilots to focus primarily on engine acceleration are clearly explained. Additionally, the key components of current aircraft, including construction materials and propulsion systems, are analyzed. The Full Authority Digital Engine Control (FADEC) technology, which optimizes engine control and enhances flight efficiency and safety, is described. Finally, the applications and benefits of this technology in modern aviation are discussed.

Keywords: FADEC, control, turbojet, aircraft.

Artículo científico presentado como opción de grado para optar por el título de ingeniero mecatrónico.

Autor: Pablo Andrés Moros Solano. Estudiante de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Santo Tomás Bucaramanga. Correo electrónico: pams2007@hotmail.com.

I. INTRODUCCIÓN

En este documento puede encontrarse el resultado de una investigación exhaustiva a cerca de la tecnología detrás del control de vuelo moderno. Contiene información desde los primeros pasos en la automatización de los sistemas de vuelo de la historia relatando avances importantes que han ayudado a la creación de los aviones modernos y estables que conocemos hoy en día. Se explicará de una manera clara el funcionamiento de los motores de aviones más comunes y como un sistema de control moderno es capaz de hacer que el piloto de la aeronave sólo tenga que preocuparse por la aceleración del motor. Por último, se realiza un análisis de las tendencias futuras en la tecnología de control de vuelo, incluyendo la integración de inteligencia artificial y aprendizaje automático para mejorar la autonomía y la capacidad de respuesta de los sistemas de vuelo, contribuyendo a la evolución continua de la aviación moderna hacia una mayor eficiencia y seguridad.

II. HISTORIA

La historia de la automatización de vuelo es una crónica de innovaciones tecnológicas que han transformado la aviación desde sus inicios. En los primeros días de la aviación, los pilotos controlaban manualmente todos los aspectos del vuelo, una tarea agotadora y compleja. La necesidad de aliviar esta carga condujo al desarrollo de los primeros pilotos automáticos a principios del siglo XX. En 1912, Lawrence Sperry demostró el primer piloto automático funcional, que podía mantener un avión en vuelo nivelado.[1] Durante la Segunda Guerra Mundial, la automatización se expandió con la creación de sistemas más avanzados de piloto automático y navegación, como el uso de giroscopios y radio ayudas.[2] En la década de 1920, los avances en la electrónica permitieron la introducción de sistemas de control de vuelo más sofisticados, como los sistemas de aterrizaje por instrumentos (ILS), que guiaban a los aviones durante la aproximación y el aterrizaje en condiciones

Director: Luis Fernando Perico Remolina. Ingeniero de sistemas, Universidad Industrial de Santander. Correo electrónico: luis.perico@ustabuca.edu.co.

de baja visibilidad.[3] La llegada de la era digital en las décadas de 1970 y 1980 marcó un salto significativo con la introducción de los sistemas de gestión de vuelo (FMS), que integran y automatizan la navegación, el control del motor y otros sistemas de vuelo[4]. Estos sistemas permiten a los aviones volar rutas óptimas y ajustar automáticamente los parámetros de vuelo en tiempo real. En la actualidad, la automatización de vuelo ha alcanzado niveles avanzados con el uso de la tecnología fly-by-wire, donde los comandos del piloto son interpretados electrónicamente y transmitidos a los actuadores, mejorando la precisión y la seguridad [5]. Además, los aviones modernos están equipados con sistemas de prevención de colisiones, autoland y otros sistemas avanzados que permiten a las aeronaves operar de manera casi autónoma en muchas fases del vuelo. La continua evolución de la automatización promete aún mayores avances, con el desarrollo de aviones completamente autónomos en el horizonte, transformando aún más la aviación y mejorando la seguridad y la eficiencia en el transporte aéreo.

III. COMPONENTES Y TECNOLOGÍA EN UN AVIÓN MODERNO

A. Introducción a la Aviación Moderna

La aviación ha pasado por grandes cambios en el último siglo, desde los primeros días de la aviación pioneros como los hermanos Wright han inspirado a los expertos apasionados por el tema creando avances que han ido mejorando en seguridad, fiabilidad, eficiencia energética, entre otras características tras el paso de los años.

En esta sección del documento se busca mostrar a nivel general las partes y los componentes principales de un avión comercial moderno desde la física e ingeniería concentrándose en el diseño de las aeronaves, sistemas de propulsión, innovaciones en la industria aeroespacial y el papel que juega la inteligencia artificial en el tema.

B. Materiales de construcción.

La evolución de la aviación en el transcurso de los años también se le debe agradecer al estudio de los materiales de fabricación y sus aleaciones, la creación de estructuras más ligeras con tecnologías de fabricación avanzadas ha ayudado a crear aeronaves más ligeras y por consecuencia con una mayor capacidad de carga, además que suelen ser más resistentes. [7]

C. Sistemas de propulsión en aviones modernos.

Los sistemas de propulsión han tenido muchos cambios innovadores comenzando desde un sencillo motor de pistón el cual es común verlos en las avionetas pequeñas de entre 4 y 6 pasajeros [8] y en mayor escala se encuentran los motores turbofan comúnmente encontrados en los aviones comerciales de grandes empresas como por ejemplo en el Boeing 737 [9] ambas tecnologías de propulsión se han adaptado a la tecnología FADEC (full authority digital engine control), para los aviones con motor de pistón se tiene de ejemplo al Cessna 172 Skyhawk TD [10] el cual utiliza un motor Thielert Centurion 2.0 single-piston engine [11], independientemente al sistema de propulsión, con la llegada de la tecnología faDEC se ha mejorado en gran medida muchos aspectos en los sistemas de propulsión los cuales se hablarán más adelante en esta monografía.

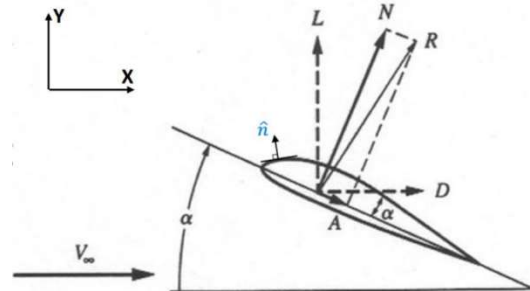
IV. SISTEMAS DE PROPULSIÓN Y PRINCIPIOS DETRÁS DEL FUNCIONAMIENTO DE LAS AERONAVES

A. Principios de vuelo.

Para conocer los fundamentos para el funcionamiento de un sistema FADEC se debe conocer los principios que utilizan los aviones para volar. En una primera instancia se tiene un principio físico denominado principio de la sustentación, que desempeña un papel crucial en el proceso de elevación de la aeronave gracias a la diferencia de presiones localizadas en las alas debido a su forma y el ángulo en el cual “choca” el aire contra el ala lo que se conoce como ángulo de ataque.

Como se puede apreciar en la Figura 1 la sustentación (L) se encuentra perpendicular a la velocidad relativa del flujo (V)

Figura 1. Fuerzas equivalentes sobre un perfil alar

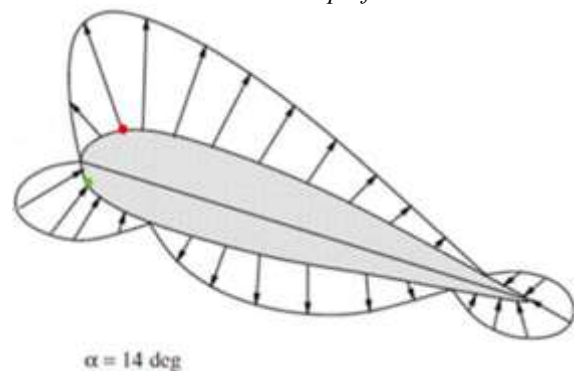


Tomado de [30]

Que para el caso de una aeronave es el sentido contrario al peso lo cual genera una fuerza que hace que el avión se eleve en el aire. [19]

En la explicación anterior es una clara referencia a la utilización de la tercera ley de Newton pero no es la única ley física que interviene en este proceso, también se aplica la ley de Bernoulli.

Figura 2. Presión relativa sobre el perfil alar



Tomado de [30]

La ley de Bernoulli establece que a medida que la velocidad de un fluido aumenta su presión disminuye, así que, como se puede apreciar en la Figura 2 el perfil alar está diseñado para que el aire que se encuentra en la parte superior del ala tenga que recorrer una distancia mayor lo que implica una mayor velocidad en comparación a la parte inferior del perfil alar y da como resultado una diferencia de presiones por lo tanto se podría decir que el aire a baja presión de la parte superior del

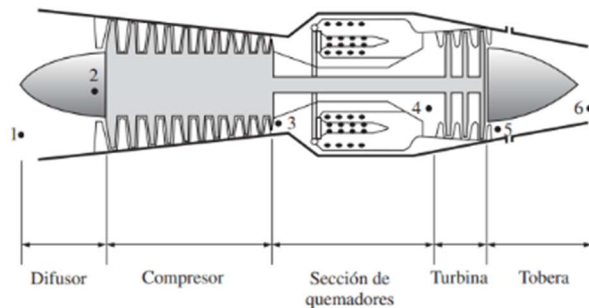
ala “succiona” el ala y el aire debajo del ala “impulsa” el ala hacia arriba lo que crea la fuerza de sustentación.

Además del principio de sustentación, otros factores como la potencia del motor, el control de vuelo y la estabilidad aerodinámica también son esenciales para el vuelo controlado de una aeronave. Pero la sustentación generada por las alas es el principio fundamental que permite que un avión se mantenga en vuelo, sin ella el avión sólo podría planear.

Las aeronaves suelen utilizar principalmente dos tipos de motores, turboreactor y turbohélice.

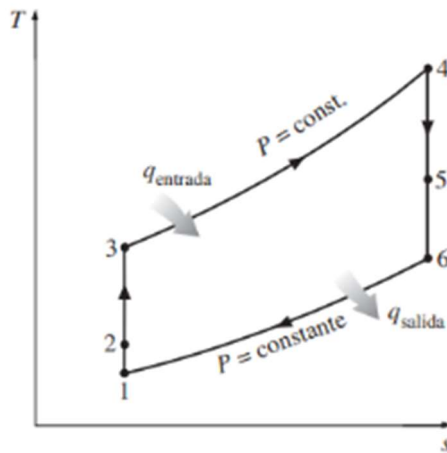
B. Turboreactores.

Figura 3. Estructura básica de un turboreactor



Tomado de [30]

Figura 4. Diagrama temperatura vs entropía de un turboreactor



Tomado de [30]

Los turboreactores a diferencia de los turbohélices como su nombre lo indica es que no posee una hélice, pero el objetivo principal se mantiene el cual es aumentar la velocidad del aire que entra al turboreactor para así crear un empuje utilizando el proceso que se explica a continuación.

C. Funcionamiento de un turboreactor.

En la parte frontal del turboreactor se encuentra el difusor el cual se encarga de recibir el aire a una presión atmosférica, gracias a la forma del difusor el fluido obtiene un aumento en la presión, a continuación se encuentra el compresor el cual

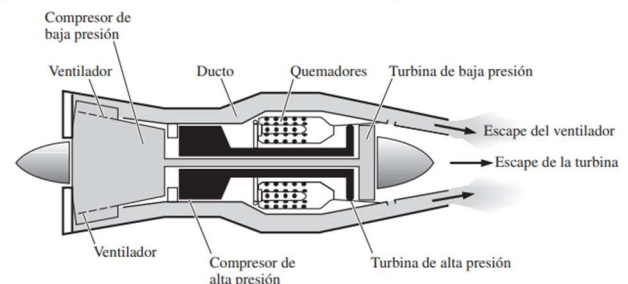
aumenta aún más la presión del fluido aumentando su temperatura como se muestra en la Figura 3, luego pasa por la sección de quemadores, área en la cual se le inyecta combustible al aire y se enciende, en este punto se crean gases calientes a presión constante debido al aumento en el volumen donde se encuentra la mezcla, posteriormente llega a la turbina y a la tobera, al pasar por el sistema de tobera y al disminuir el área de sección transversal se pensaría que el fluido va a sufrir un aumento de presión, pero la presencia de la turbina ocasiona que se realice una disminución de presión y temperatura, y en el resto de la tobera al encontrarse en contacto con el ambiente el fluido tiende a igualar la presión con la ambiental, lo cual da como resultado un aumento en el volumen del fluido y por ende un aumento en la velocidad de salida, de hecho, es gracias a ese aumento en la velocidad de salida lo que ayuda al avión a impulsarse hacia adelante como se describe en la ecuación 1 del libro de termodinámica de Cengel [30].

$$\dot{W}_p = F \cdot V_{\text{avión}} = \dot{m} \cdot (V_{\text{salida}} - V_{\text{entrada}}) \cdot V_{\text{avión}} \quad (\text{KW}) \quad (1)$$

La cual nos indica que la potencia de propulsión depende directamente en la diferencia de la velocidad de salida menos la de entrada, teniendo en cuenta otros factores como el cambio de masa del fluido y la velocidad del avión.

D. Turbofan.

Figura 5. Estructura básica de un turbofan



Tomado de [30]

Los turbofan son motores más comúnmente encontrados en la actualidad, más específicamente hablando en los aviones comerciales, dichos motores tienen ventajas considerables sobre los turboreactores como por ejemplo la considerable reducción de ruido gracias a su mezcla final de un gas a alta velocidad con el aire que sale a una velocidad menor en el área del escape como se aprecia en la figura 5, esto ayuda a ser un tipo de “amortiguación” para la salida de aire, otra característica importante a tener en cuenta es la ayuda que proporciona el paso del aire alrededor del motor en la reducción de la temperatura lo que ha dado cabida a permitir que el gas pueda alcanzar temperaturas superiores a 1500 grados sin afectar en gran medida a la integridad estructural del motor.

V. TECNOLOGÍA FULL AUTHORITY DIGITAL ENGINE CONTROL (FADEC)

Un sistema FADEC (full authority digital engine control) es un sistema de control electrónico utilizado para controlar la mayoría de los sistemas que intervienen en un motor de

aeronaves ayudando a simplificar un complejo proceso de control de motor a tan sólo una palanca de aceleración facilitando el manejo general de la aeronave garantizando funcionamiento óptimo.

Este sistema utiliza diferentes sensores para recopilar datos del estado del motor en todo momento para luego procesarlos y tomar las mejores decisiones para optimizar su rendimiento, eficiencia de acuerdo con los diferentes agentes externos garantizando seguridad durante el vuelo.

Su funcionamiento se asemeja a las unidades de control de motor ECU que utilizan los automóviles actuales.

A. Unidad de control de motor o ECU

Las ECU o unidades de control de motor es un componente encargado de monitorear, registrar y controlar varios actuadores para ayudar a un control óptimo del motor de un vehículo, las ECU realizan esta actividad mediante tres actividades importantes las cuales son: recopilación de datos, procesamiento y salida de datos, en la entrada de datos se tienen diferentes sensores como por ejemplo el sensor de posición de la mariposa, sensor de posición del pedal de aceleración, sensor de posición del cigüeñal, sensor de temperatura del agua o refrigerante del motor, sensor de velocidad del vehículo, todas esas señales de entrada ingresan a la ECU y luego el sistema electrónico toma decisiones tales como la posición de la mariposa con respecto a la aceleración ingresada por el usuario, velocidad del vehículo, los rpm del motor para obtener una aceleración eficiente y segura tanto para el motor como para el conductor y sus pasajeros, el sistema realiza los ajustes necesarios para mantener una buena mezcla teniendo en cuenta varios factores, por último, en la tercera etapa el ECU envía los datos a los actuadores correspondientes, sea el servo de posicionamiento de la mariposa o el sistema de frenado en caso de contar por ejemplo con un sistema ABS.

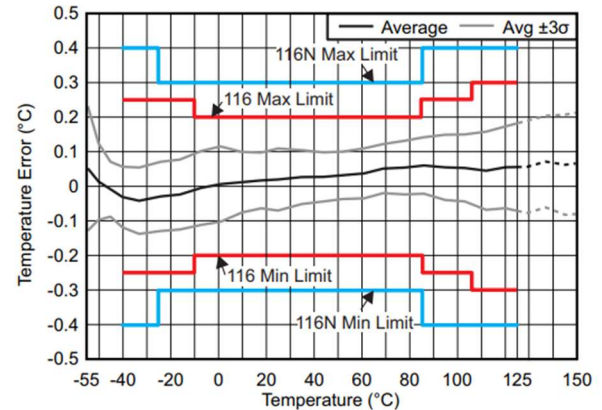
B. Adquisición de datos

El sistema FADEC se comunica con el exterior mediante un sistema de adquisición de datos el cual son una o varias ECU, se utilizan varias ECU para garantizar la recopilación correcta de los datos gracias a la redundancia del sistema.

Honeywell aerospace utiliza sensores de presión propios llamados transductores de presión los cuales no tienen un tamaño mayor a los 6 cm, estos transductores miden presión absoluta y tienen una vida mínima de 10 años o 100.000 horas, estos dispositivos son resistentes, precisos y confiables según el fabricante [22].

Para medir la temperatura se utilizan sensores tanto analógicos como digitales siendo más utilizados los digitales por la precisión de sus datos.

Figura 6. Precisión de medición de temperatura TMP116, TMP116N

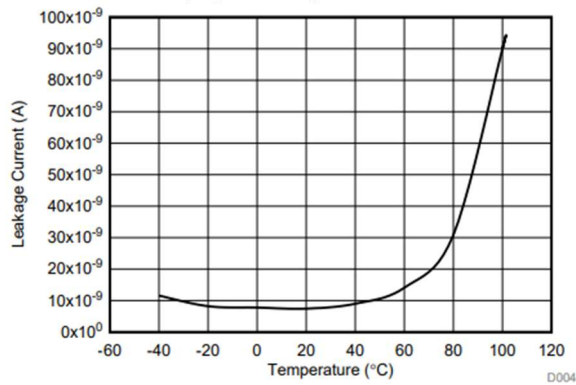


Tomado de [24]

Por ejemplo, tenemos el sensor TMP116 de Texas Instruments que según el data sheet soporta temperaturas desde los -55 °C hasta los 125 °C [25] como se puede apreciar en la figura 6 dando como resultado una medición confiable y un rango de error aceptable para la aplicación.

Para los lugares donde la temperatura puede llegar a más de mil grados como la cámara de combustión o la salida del aire se suelen utilizar sensores térmicos con mayor rango de medición, un ejemplo puede ser el termopar, para elegir el termopar es necesario saber cuál será el rango de temperaturas donde trabajará el sensor, o bien, el rango de temperaturas que necesitamos medir, los tipos de sensores termopares se suelen diferenciar entre sí por el material, para un sensor ubicado en la cámara de combustión donde las temperaturas varían entre 1700 °C y 2000 °C [26] se puede utilizar un termopar tipo C hecho de Tungsteno-3% Renio(W-3% Re) que mide temperaturas desde 0 a 2320 °C[27], eso sin tener en cuenta otros factores como el tipo de combustible o el entorno en general al que será expuesto el sensor, para realizar una mejor elección del sensor es necesario realizar un estudio del material para validar que sea el adecuado para el ambiente donde se utilizará.

Con lo anterior se puede deducir que se puede obtener datos confiables de los sensores con una excelente vida útil, y si a eso le añadimos mantenimientos preventivos, detección de fallas de los sensores con algoritmos de detección de anomalías y la redundancia que caracteriza estos sistemas, ahora, se requiere una manera de enviar la información desde el sensor hasta el cerebro del sistema faDEC, para ello se utilizan elementos de protección en el sensor y un cableado que aísla la señal para asegurar que llegue lo más limpia posible, y si se le añade el hecho que la señal que llega es una señal digital con que se detecten los picos de voltaje o corriente en los tiempo de reloj establecidos ya se tiene asegurada una precisión en la toma de información; los elementos de protección más usados son los ya conocidos circuitos de diodos para evitar que la corriente se devuelva al sensor por alguna razón desde el centro del sistema.

Figura 7. Corriente de fuga vs temperatura a 33 V

Tomado de [24]

Por último se debe realizar una adecuación de la señal leída por el sensor, o más bien, garantizar que el dato medido por el sensor sea el correcto, porque como se puede ver en la figura 7 la corriente de fuga del sensor puede influir en el resultado de la medición final, para ello se utilizan diferentes metodologías a las que no se llegará al detalle en esta monografía, pero en resumen es utilizar elementos adicionales para una mejor adquisición de datos, por ejemplo una fuente de voltaje para alimentar exclusivamente los sensores que lo necesiten acompañado de una fuente de voltaje de referencia ya que la lectura de los algunos sensores analógicos se hace por medio de la diferencia de potencial y para evitar compensaciones indeseadas se debe utilizar un voltaje de referencia que se tenga en cuenta en todo el sistema.

C. Procesamiento de datos

La parte del sistema FADEC encargada del procesamiento de datos varía en todos los sistemas ya que decir FADEC es básicamente un concepto, o una manera de llamar a un sistema de control de motores más no es un nombre de un sistema estático constante para todos los motores, es decir, el control varía por fabricante, aplicación, entorno, entre otras características externas.

El procesamiento de datos se puede realizar tanto por una computadora central que básicamente es un arreglo típico de almacenamiento de datos, procesador y memoria RAM para actuar como un típico computador, las ventajas de un sistema así es la facilidad en la programación, parametrización y conversión de señal, también se pueden usar tarjetas programables más rápidas y más básicas como una FPGA la cual involucra mayor tiempo de programación pero mayor velocidad de respuesta por su conocida arquitectura de compuertas lógicas interconectadas obteniendo una respuesta directa sin necesidad de depender de un tiempo de reloj utilizado en los procesadores; también se puede realizar una combinación entre las dos alternativas de procesamiento de datos utilizando el procesador para tareas como comunicación con el usuario, recopilación y almacenamiento de datos, comunicación con otros sistemas de la aeronave, procesar parametrizaciones adicionales proporcionadas por el usuario, realizar tareas como advertencias para realizar mantenimientos predictivos, preventivos y correctivos, entre otras tareas analíticas que requieren mayor complejidad del proceso, y

utilizar una FPGA para tareas como creación de topes de operación, crear acciones rápidas en respuesta a fallas en el sistema, mitigar fallas inminentes mediante acciones rápidas con respecto a las variables y al entorno en el que se encuentre sometido el sistema.

Un ejemplo de aplicación es para el control de entrada de combustible del motor, por un lado, tenemos las matemáticas de la termodinámica y los turborreactores que se expuso anteriormente en la ecuación 1, en la figura 3 y figura 4 se puede deducir dos aspectos importantes, se requiere de un aumento considerable en la velocidad del aire para obtener una fuerza de propulsión mayor, y para alcanzar dicha velocidad se requiere de un aumento de temperatura y presión en la sección de quemadores para que la turbina pueda obtener mayor energía y pueda mover el compresor de la etapa 2 – 3. Por otro lado, la eficiencia del sistema es un aspecto crucial, ya que se requiere que el sistema en su conjunto sea lo óptimo posible para ello se tiene la ecuación 2. la cual nos dice que si se tiene una entrada de calor pequeña frente a la potencia de propulsión la eficiencia será mayor, cabe resaltar que el escenario propuesto es imposible con el modelo de turborreactor estudiado en esta monografía, para que la entrada de calor sea menor a la potencia de propulsión entregada tendría que haber una fuerza externa que impulse las aspas del turborreactor sin afectar la velocidad de entrada frente a la velocidad de salida, escenario que también requiere que se tenga en cuenta en la ecuación y se volvería al escenario inicial, el mejor escenario al que se puede apuntar es que el calor de entrada tenga el mismo valor que la potencia de propulsión, dicho escenario es un caso ideal en el cual se traduciría a que el 100% de la energía suministrada es utilizada para empujar la aeronave, sin pérdidas de energía alguna, así como el anterior caso, este caso es imposible con la tecnología actual. Actualmente se tiene que los turborreactores cuentan con una eficiencia no mayor a un 30%, de hecho, los motores más eficientes que se tiene en la actualidad es el motor diésel alcanzando eficiencias no mayores a 45% [29].

$$\mu = \frac{\text{Potencia de propulsión}}{\text{Relación de entrada de energía}} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_{\text{entrada}}} \quad (2)$$

Por otro lado se tienen los límites del sistema el cual es un punto importante de un sistema FADEC bien parametrizado, con el planteamiento anterior, si se tiene en cuenta el escenario en el cual al ingresar más combustible el motor me entrega más potencia se podría decir que es directamente proporcional, pero no se puede basar solamente en el funcionamiento combustible – potencia del motor, también se debe tener en cuenta que la aeronave tiene combustible limitado, y también que el desperdicio de combustible conlleva a más gastos así que se debe tener en cuenta en la optimización, el motor debe consumir la menor cantidad de combustible posible para la entrega de potencia deseada. Otro límite importante es el límite de los materiales, si bien, los materiales de construcción de los turborreactores tienen una resistencia térmica muy alta no se debe pasar por alto el desgaste de los materiales a someterse a altas temperaturas por un largo periodo de tiempo, realmente entre menos temperatura alcancen los materiales del turborreactor será mayor su vida útil.

Y, por último, una de las características importantes del sistema FADEC es su recopilación de información,

básicamente se tiene una base de datos con la información detallada del estado del motor durante toda la vida del mismo, estos datos son útiles para prevención de fallas, programación de mantenimientos predictivos y preventivos.

D. Beneficios de implementar un sistema FADEC

El sistema FADEC lleva el tiempo suficiente en el mercado como para generar un nivel de fiabilidad por parte de las empresas, tanto, así como para representar ingresos gracias a la implementación del sistema FADEC [30]

VI. AVANCES EN EL CONTROL DE MOTORES TURBOFAN CON IA Y ML

La tecnología de control de motores turbopropulsor está avanzando rápidamente con la integración de inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático (ML). Estos avances prometen mejorar la autonomía, eficiencia y capacidad de respuesta de los sistemas de vuelo, contribuyendo a la evolución continua de la aviación moderna. A continuación, se analizan las principales tendencias futuras en este campo [31].

A. Optimización del Rendimiento del Motor

Los algoritmos de IA permiten el desarrollo de sistemas de control adaptativo que ajustan continuamente los parámetros del motor para optimizar el rendimiento en tiempo real. Estos sistemas pueden considerar múltiples variables, como las condiciones atmosféricas y el estado del motor, para maximizar la eficiencia y reducir el consumo de combustible. El aprendizaje automático puede crear modelos predictivos del comportamiento del motor bajo diversas condiciones operativas. Estos modelos ayudan a prever y ajustar el funcionamiento del motor antes de que ocurran cambios en las condiciones de vuelo, mejorando la eficiencia y la respuesta del motor [32].

B. Mantenimiento Predictivo y Proactivo

La IA y ML pueden analizar grandes volúmenes de datos de sensores para identificar patrones que indican posibles fallos. Esto permite el mantenimiento predictivo, donde se realizan reparaciones y ajustes antes de que ocurran fallos graves, reduciendo el tiempo de inactividad y los costos de mantenimiento. Los motores turbopropulsor equipados con sensores pueden transmitir datos en tiempo real a sistemas de IA que monitorizan continuamente su estado. Esto facilita la identificación temprana de problemas y permite intervenciones rápidas para evitar fallos [33].

C. Eficiencia Energética y Reducción de Emisiones

Los sistemas de control de motores basados en IA pueden ajustar los parámetros de combustión para maximizar la eficiencia energética y minimizar las emisiones. Esto incluye el ajuste de la mezcla de combustible y aire, la presión de combustión y otros factores críticos. El uso de IA en el diseño de motores turbopropulsor permite explorar nuevas configuraciones y materiales que mejoren la eficiencia y reduzcan las emisiones. Los algoritmos genéticos por ejemplo pueden simular miles de diseños para encontrar las combinaciones óptimas [34].

D. Automatización y Autonomía

La integración de IA permite el desarrollo de sistemas de control autónomo que pueden gestionar los motores turbopropulsor sin intervención humana. Estos sistemas pueden tomar decisiones en tiempo real para ajustar el rendimiento del motor, mejorar la eficiencia del vuelo y responder a condiciones cambiantes con ayuda de algoritmos como el filtro Kalman el cual es capaz de predecir con gran precisión sucesos teniendo en cuenta el estado actual de la aeronave. La IA puede mejorar la interfaz entre los sistemas de control del motor y los pilotos, proporcionando información crítica y sugerencias en tiempo real. Esto ayuda a los pilotos a tomar decisiones más informadas y reduce la carga de trabajo durante el vuelo [35].

E. Seguridad y Fiabilidad

Los sistemas basados en IA pueden detectar anomalías en el comportamiento del motor que podrían indicar problemas potenciales. Al identificar estos problemas temprano, es posible tomar medidas correctivas antes de que se conviertan en fallos graves. Los sistemas de control de motores turbopropulsor pueden beneficiarse de la redundancia habilitada por la IA, donde múltiples sistemas independientes verifican y corrigen las acciones del motor. Esto mejora la resiliencia del sistema y la seguridad del vuelo [36].

REFERENCIAS

- [1] Rodríguez-Laiz, A. (s.f.). Piloto Automático: Un Siglo de Innovación en Aviación.. [Página web]. Disponible en: <https://aertecolutions.com/2019/05/27/el-origen-del-piloto-automatico/>.
- [2] Professionalaviation. (2024). La historia del piloto automático. [Página web]. Disponible en: <https://www.professionalaviation.it/es/2022/05/09/la-historia-del-piloto-automatico/>.
- [3] Mtz Armendáriz, R. (actualizado 20 noviembre, 2019). Historia y funcionamiento del Sistema de Aterrizaje por Instrumentos (ILS). [Página web]. Disponible en: <https://www.transponder1200.com/historia-y-funcionamiento-del-sistema-de-aterrizaje-por-instrumentos-ils/>.
- [4] Cary R. (2015). Digital Avionics Handbook 3 ed. Capítulo 2. CRC Press.
- [5] Rafael, E. (n.d.). Fly-by-wire for beginners. [Página web]. Disponible en: <https://airfactsjournal.com/2022/11/fly-by-wire-for-beginners/>.
- [6] Burton, K. D. (n.d.). The Scientific and Technological Legacies of World War II. The National WWII Museum1. Recuperado el 7 de junio de 2024.
- [7] Parveez, B. & Kittur, M. (2022). Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review. Polymers.
- [8] Cessna. Cessna Turbo Stationair HD Piston: Textron Aviation, Cessna Aircraft. Accedido el 13 de noviembre de 2023. [Página web]. Disponible en: <https://cessna.txtav.com/en/piston/cessna-turbo-stationair-hd>.
- [9] Frawley, G. (s.f.). Boeing 737-100/200. Accedido el 13 de noviembre de 2023. [Página web]. Disponible en: <https://phys.org/news/2023-07-korean-team-room-temperature-ambient-pressure-superconductor.html>.
- [10] Cessna 172 Skyhawk: el avión más popular de todos los tiempos. (2023). Accedido el 12 de diciembre de 2023. [Página web]. Disponible en: <https://www.aerospace-technology.com/projects/cessna-172-skyhawk/>.
- [11] Thielert, A. Operation & Maintenance Manual: Centurion 2.0, Centurion 2.0S (2010). Accedido el 12 de diciembre de 2023. [Página web]. Disponible en: https://www.tmg-service.de/doc-download/manuals/OM-02-02_2-10_EASA_Version.pdf.
- [12] Honeywell. Engines Accedido el 13 de noviembre de 2023. [Página web]. Disponible en: <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/product/hardware-and-systems/engines>.
- [13] Bertin, J. (2014). Aerodynamics for Engineers. Pearson.
- [14] Anderson, J. D. Jr. (2016). Fundamentals of Aerodynamics. McGraw-Hill Education.
- [15] McCormick, B. W. (1995). Aerodynamics: Aeronautics and Flight Mechanics. Wiley.
- [16] Federal Aviation Administration. (2023). Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge.

- [17] López Rodríguez, J. A. (2022). Estudio del flujo sobre un perfil alar. pp. 25. Accedido el 12 de diciembre de 2023. [Página web]. Disponible en: https://oa.upm.es/70033/1/TFG_JUAN_ANDRES_LOPEZ_RODRIGUEZ.pdf.
- [18] Bernoulli, D. (1738). *Hydrodynamica*. Sumptibus Societatis, Typis Joan. Christ. Kopffii.
- [19] López Rodríguez, J. A. (2022). Estudio del flujo sobre un perfil alar. pp. 25. Accedido el 12 de diciembre de 2023. [Página web]. Disponible en: https://oa.upm.es/70033/1/TFG_JUAN_ANDRES_LOPEZ_RODRIGUEZ.pdf.
- [20] Mecánico automotriz.org. Manual de unidad de control electrónico ECU del motor y del ECT. Accedido el 29 de marzo de 2024. [Página web]. Disponible en: <https://www.mecanicoautomotriz.org/1042-manual-unidad-control-electronico-ecu-motor-ect>.
- [21] Toyota Motor Sales, U.S.A., Inc. Computers and logic circuits. Accedido el 29 de marzo de 2024. [Página web]. Disponible en: <http://www.autoshop101.com/forms/h14.pdf>.
- [22] HoneyWell Aerospace Technologies. FADEC Pressure Transducers. Accedido el 7 de abril del 2024. [Página web]. Disponible en: <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/product/hardware-and-systems/sensors/fadec-pressure-transducers>.
- [23] Honeywell Aerospace, "LG1237 Pressure Transducer," Honeywell, N61-1311-000-002, enero 2015. Accedido: 07 de abril del 2024 [Página web]. Disponible en: https://aerospace.honeywell.com/content/dam/aerobt/en/documents/learn/products/sensors/brochures/N61-1311-000-002-LG1237_bro.pdf.
- [24] "Full authority digital engine control (FADEC) - Texas Instruments," Accedido: 07 de abril del 2024 [Página web]. Disponible en: <https://www.ti.com/solution/full-authority-digital-engine-control-fadec?variantid=34332&subsystemid=33040>.
- [25] Tabango, Z. (2013) Análisis de los sistemas de aviónica, control electrónico y eléctrico de la aeronave modelo RV-10 y desarrollo del manual de instalación del arnés eléctrico y electrónico (Artículo científico, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE).
- [26] Yébenes, J. (2022) Motores a reacción (Artículo científico, Gaceta Aeronautica).
- [27] Maloy, G. "Medición de temperatura con termopares". febrero 2023. Accedido: 14 de abril del 2024 [Página web]. Disponible en: <https://dewesoft.com/es/blog/temperatura-medicion-termopar-sensores>.
- [28] G.E. Aerospace. "FADEC International Signs Joint Venture with GE to Provide Digital Controls for LEAP Engines". noviembre 2012. Accedido: 15 de abril del 2024 [Página web]. Disponible en: <https://www.geaerospace.com/news/press-releases/joint-ventures/fadec-international-signs-joint-venture-ge-provide-digital-controls>.
- [29] Tan, Y. H., Abdullah, M. O., & Nolasco-Hipolito, C. (2015). The potential of waste cooking oil-based biodiesel using heterogeneous catalyst derived from various calcined eggshells coupled with an emulsification technique: A review on the emission reduction and engine performance.
- [30] Cengel, Y. A. & Boles, M. A. (2011). *Termodinámica* (7ª ed.). New York, Estados Unidos: The McGraw-Hill Companies
- [31] Raytheon Technologies y Argonne National Laboratory, "Inteligencia artificial para motores de reacción más eficientes y duraderos," Raytheon Technologies Research Center, [Página web]. Disponible en: <https://paths.ext.hpe.com/c/artificial-intelligence-for-more-efficient-jet-engines-ese?x=earmm3>.
- [32] Rodríguez E. "Descubre cómo la Inteligencia Artificial está revolucionando la industria aeronáutica," [Página web]. Disponible en: <https://canalinnova.com/la-inteligencia-artificial-en-la-aeronautica-diseno-y-navegacion-de-aeronaves/>.
- [33] González, J. (Septiembre, 2022) Mantenimiento Predictivo en Motores de Aviación mediante la utilización de Metodologías de Aprendizaje Supervisado. Universidad de León.
- [34] Papa, G., & Korous'ic'-Seljak, B. (2005). An artificial intelligence approach to the efficiency improvement of a universal motor.
- [35] Melero Cazorla, D. (2012). Modelado dinámico y diseño de estrategia de control mediante estimadores para el vuelo autónomo de un quadrotor. Universidad de Granada.
- [36] Cofré Martel, S. M. I. (2017). Modelo de detección de fallas y faltas para sistema neumático de turbinas de aviones Boeing 767 a través de Machine Learning. Repositorio de la Universidad de Chile.