

Trabajo Fin de Grado

Estudio sobre la implementación de sistemas de control de vuelo Fly-By-Wire en aeronaves de ala rotatoria

Autor

David Ceballos Ruiz

Director/es

Director académico: Dr. D. Eduardo Antonio Pina

Director militar: Capitán D. Gonzalo Diez Obis

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar
2022

Agradecimientos

Me gustaría agradecer, en primer lugar, a mi familia, todo el apoyo que me han dado durante estos largos años de formación. De igual forma, agradecer la gran implicación del Capitán D. Gonzalo Díez Obis, el cual ha recopilado datos de vital importancia para el correcto desarrollo del proyecto y ha estado siempre disponible para consultas técnicas. Muchas gracias también al Dr. D. Eduardo Antonio Pina, que ha guiado todo el proceso académico del trabajo. Agradecer también la implicación del BHLEMA III, Ala 48 y ACAVIET en las encuestas. Por último, pero no por ello menos importante, a mis amigos y compañeros, sin los cuales no hubiera sido posible aguantar todos los momentos de gran estrés. Muchas gracias a todos y gracias por confiar en mi.

RESUMEN

La presente memoria trata de dar respuesta a la posibilidad y viabilidad técnica y económica de implementación de un sistema de control de vuelo Fly-By-Wire en aeronaves de ala rotatoria del Ejército de Tierra que posean un sistema de control de vuelo convencional.

La principal diferencia entre estos dos sistemas es la forma en la que la información se transmite a los actuadores hidráulicos del rotor principal y de cola. En el caso de los sistemas convencionales, son transmitidos por varillaje y partes móviles. El sistema Fly-By-Wire consiste en transmitir los inputs generados por la tripulación (actuación sobre los diferentes controles de vuelo y paneles de control) a los actuadores hidráulicos mediante cableado, tras haber sido transformados a una señal eléctrica y procesada por los diferentes ordenadores de abordo.

Las principales ventajas que supone el empleo de un sistema Fly-By-Wire son: reducción de peso, facilidad de mantenimiento, reducción de la carga de trabajo de la tripulación, facilidad de implementación de nuevos modos de misión y posibilidad de ser pilotadas de forma remota (pudiendo ser empleadas como aeronave wingman), entre otras.

Para llevar a cabo el análisis técnico y económico han sido empleadas técnicas de estimación por analogía y paramétricas (cálculos de tiempo y dinero), encuestas (gestión de interesados y método AHP) y entrevistas (estudiar la reducción de carga de trabajo e implementación de nuevos modos de misión). Además, se ha realizado un minucioso trabajo de investigación para recopilar toda la información necesaria.

Tras un meticuloso estudio (costes, técnico, personal, etc.), se han obtenido como resultado valores aproximados de los costes de transformación al sistema Fly-By-Wire de ciertos modelos de la flota de la Aviación del Ejército de Tierra e información sobre la posibilidad técnica de la misma. Se ha llegado a la conclusión de que técnicamente una transformación es posible, de igual forma, económicamente hablando, es viable dependiendo de los objetivos que se persigan.

Sin embargo, se han encontrado ciertas limitaciones durante el proceso. Por ejemplo, debido a la confidencialidad existente dentro del mundo aeronáutico (y más aún a nivel militar), ha sido imposible obtener ciertos datos e información (por ejemplo, información relativa al proyecto VERTEX de Airbus, el cual pretende equipar diferentes aeronaves con el sistema Fly-By-Wire para convertirlas en vehículos de conducción autónoma). Aunque, mediante técnicas de estimación por analogía, se ha podido solventar en cierto modo esta carencia de información.

PALABRAS CLAVE

Aviación, Ejército de Tierra, Fly-By-Wire, Helicóptero.

ABSTRACT

This study aims to give an answer to the possibility and technical and economic viability of implementing a Fly-By-Wire flight control system to a rotary wing aircraft of the Army that has a conventional flight control system.

The main difference between these two systems is the way the information is transmitted to the main and tail rotor hydraulic actuators. In the case of conventional systems, it is transmitted by linkage and moving parts. The Fly-By-Wire system consists of transmitting the inputs generated by the crew (actuating on the different flight controls and control panels) to the hydraulic actuators by cabling, after having been transformed into an electrical signal and processed by the different computers on board.

The main advantages of using a Fly-By-Wire system are: weight reduction, ease of maintenance, reduction of the crew's workload, ease of implementation of new mission modes and the possibility of being piloted remotely (and can be used as a wingman aircraft), among others.

To carry out the technical and economic analysis, estimation techniques have been used, for example analogy and parametric estimations (calculations of time and money), surveys (stakeholder management and AHP method) and interviews (study the reduction of workload and implementation of new mission modes). In addition, a meticulous research work has been carried out to collect all the necessary information.

After a meticulous study (costs, technical, personnel, etc.), approximate values of the transformation costs to the Fly-By-Wire system of certain models of the Army Aviation fleet have been obtained and information of the technical possibility of it. It has been concluded that technically a transformation is possible, in the same way, economically speaking, it is viable depending on the objectives pursued.

However, certain limitations have been encountered during the process. For example, due to the confidentiality that exists within the aeronautical world (and even more so at military level), it has been impossible to obtain certain data and information (for example, information related to the Airbus VERTEX project). Although, using estimation techniques by analogy, it has been possible to solve this lack of information to a certain extent.

KEYWORDS

Army, Aviation, Fly-By-Wire, Helicopter.



INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	V
PALABRAS CLAVE	V
ABSTRACT	VII
KEYWORDS.....	VII
INDICE DE FIGURAS.....	XI
INDICE DE TABLAS	XIII
ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS.....	XV
1. INTRODUCCIÓN	1
1.2 ÁMBITO DE APLICACIÓN	1
1.2 ANTECEDENTES.....	2
1.3 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	3
2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....	4
2.1 OBJETIVOS Y ALCANCE	4
2.2 METODOLOGÍA.....	4
3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO (ESTADO DEL ARTE).....	7
3.1 FLIGHT CONTROL SYSTEM.....	7
3.2 CONCEPTO DE REDUNDANCIA	8
3.3 OTRAS AERONAVES DE ALA ROTATORIA CON SISTEMA FBW.....	9
3.3.1 V-22 "Osprey"	9
3.3.2 CH-53K "King Stallion"	10
3.4 PILOTO REMOTO Y WINGMAN	11
3.5 SUPUESTOS TÁCTICOS	12
3.5.1 Reconocimiento en fuerza.....	12
3.5.2 Escolta aérea.....	13
4. DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	15
4.1 ANÁLISIS DE COSTES	15
4.1.1 Costes de formación del personal de mantenimiento.....	15
4.1.2 Costes de formación de pilotos	21
4.1.3 Costes de transformación de la flota al sistema FBW	26
4.2 ANÁLISIS TÉCNICO DE LA IMPLEMENTACIÓN	28
4.3 GESTIÓN DE INTERESADOS	28
4.3.1 Resultados de las encuestas a pilotos.....	29
4.3.2 Resultados de las encuestas a personal de mantenimiento	29
4.4 DECISIÓN DE AERONAVES A MODERNIZAR	30
4.5 ESTUDIO DE OBJETIVOS SECUNDARIOS	33
4.6 COMPARACIÓN DE MODELOS SIMILARES	35
5. CONCLUSIONES	36
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37
ANEXO A. ENCUESTA REALIZADA A PERSONAL DE MANTENIMIENTO	40
ANEXO B. ENCUESTA REALIZADA A PILOTOS DE NH-90.....	46
ANEXO C. ENCUESTA REALIZADA A PILOTOS DE HELICÓPTERO.....	49
ANEXO D. DESARROLLO DEL MÉTODO AHP	52



ANEXO E. COSTES DE FORMACIÓN	55
---	-----------



INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Sea King del 845 Escuadrón Naval de la Marina Real Británica sufriendo un brownout. Fuente: Wikipedia, 2021</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2. Arquitectura general del FCS. Fuente: adaptado del manual de vuelo de NH-90 (Airbus Helicopters Training Services, 2015)</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3. Localización de los ACC. Fuente: manual de vuelo de NH-90 (Airbus Helicopters Training Services, 2015)</i>	<i>8</i>
<i>Figura 4. Localización de los FCC. Fuente: manual de vuelo de NH-90 (Airbus Helicopters Training Services, 2015)</i>	<i>9</i>
<i>Figura 5. V-22 Osprey en vuelo. Fuente: Wikipedia, 2021</i>	<i>10</i>
<i>Figura 6. CH-53K cargando un vehículo táctico. Fuente: Wikipedia, 2021</i>	<i>11</i>
<i>Figura 7. Esquema del supuesto táctico de un reconocimiento en fuerza. Fuente: elaboración propia y simbología PD0-002.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 8. Escolta próxima a retaguardia. Fuente: PD4-802.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 9. Matriz de gestión de interesados. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 10. Distribución de respuestas respecto a la reestructuración de equipos de mantenimiento de NH-90. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 11. Distribución de respuestas respecto a los atributos necesarios en helicópteros del ET. Fuente: elaboración propia.</i>	<i>31</i>





INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Resumen de datos obtenidos y sus fuentes de información. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>6</i>
<i>Tabla 2. Distribución de carga de trabajo en horas. Fuente: Guía docente Curso de Mantenimiento de Aviónica de helicópteros HT-29 ACAVIET y modificación propia ...</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 3. Distribución de carga de trabajo en horas. Fuente: presupuesto de Airbus a la DGAM y modificación propia.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 4. Distribución de carga de trabajo en horas. Fuente: Guía docente Curso de Mantenimiento y Reparación de helicópteros HT-29 ACAVIET y modificación propia.</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 5. Distribución de carga de trabajo en horas. Fuente: presupuesto de Airbus a la DGAM y elaboración propia</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 6. Distribución de carga de trabajo en horas. Fuente: Guía docente Curso de Inspector Técnico de helicópteros HT-29 ACAVIET y modificación propia.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 7. Distribución de carga de trabajo en horas y costes estimados de la formación en el ET. Fuente: Plan de Instrucción del BHELMA III y elaboración propia.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 8. Distribución de carga de trabajo en horas. Fuente: presupuesto de Airbus a la DGAM y elaboración propia</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 9. Costes estimados de la formación FBW en Airbus. Fuente: presupuesto de Airbus a la DGAM y elaboración propia</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 10. Distribución de carga de trabajo en horas y costes estimados de la formación en el ET. Fuente: Guía Docente Curso de Piloto Instructor HT-29 ACAVIET y elaboración propia.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 11. Distribución de carga de trabajo en horas. Fuente: presupuesto de Airbus a la DGAM y elaboración propia</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 12. Coste de componentes FBW del NH-90. Fuente: SIGLE y elaboración propia.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 13. Estimación de los costes fijos y variables de los proyectos de ingeniería....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 14. Costes de implementación del proyecto</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 15. Resultado de la primera etapa del método AHP. Fuente: elaboración</i>	



<i>propia.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 16. Muestra de matriz AHP de la segunda etapa. Fuente: elaboración propia ..</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 17. Resultado de la tercera etapa del método AHP. Fuente: elaboración propia.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 18. Comparación de un helicóptero FBW frente a otros modelos similares convencionales. Fuente: elaboración propia</i>	<i>35</i>



ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ACAVIET: Academia de Aviación del Ejército de Tierra
ACC: *Actuators Control Computer*
ADC: Air Data Computer
AFCS: *Automatic Flight Control System*
AHP: *Analytic Hierarchy Process*
ALAT: *Aviation Légère de l'Armée de Terre*
ATT: *Attitude*
AVIET: Aviación del Ejército de Tierra
BHELMA: Batallón de Helicópteros de Maniobra
CFIA: Centre de Formation Interarmées
CR-1: *Combat Ready 1*
CSAR: *Combat Search And Rescue*
DGAM: Dirección General de Armamento y Material
Dr: Doctor
DVS: *Doppler Velocity System*
ECTS: *European Credit Transfer System*
EECU: *Engine Electronic Control Unit*
EEUU: Estados Unidos
ET: Ejército de Tierra
FADEC: *Full Authority Digital Engine Control*
FAMET: Fuerzas Aeromóviles del Ejército de Tierra
FARA: *Future Attack Reconnaissance Aircraft*
FBW: *Fly-By-Wire*
FCAS: *Future Combat Air System*
FCC: *Flight Control Computer*
FCS: *Flight Control System*
IRS: *Inertial Reference System*
JP-8: *Jet Propulsion 8*
MADOC: Mando de Adiestramiento y Doctrina
MRO: *Maintenance Repair and Overhaul*
MRP: *Material Requirements Planning*
MTOW: *Maximum Take-Off Weight*
OPV: *Optionally-Piloted Vehicle*
OWS: *Obstacle Warning System*
PCMHEL: Parque y Centro de Mantenimiento de Helicópteros
PERT: *Program Evaluation and Review Techniques*
PTT: *Part Task Trainer*
RA: *Radar-Altitude*
SAR: *Search And Rescue*
SCAS: *Stability Control and Augmentation System*
SIGLE: Sistema Integrado de Gestión Logística del Ejército
S-4: 4ª Sección (logística)
TAC: *Tactical*
UCAV: *Unmanned Combat Vehicle*
USAF: *United States Air Force*
USMC: *United States Marine Corps*
UTM: Unidad Técnica de Mantenimiento





1. INTRODUCCIÓN

En la siguiente memoria se desarrolla el estudio de viabilidad técnica y económica de la implementación de sistemas Fly-By-Wire (FBW) en aeronaves de ala rotatoria del Ejército de Tierra, como consecuencia de la realización del Trabajo de Fin de Grado para el grado de Ingeniería de Organización Industrial impartido por el Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza.

1.2 ÁMBITO DE APLICACIÓN

Hoy en día, la gran mayoría de aeronaves de ala rotatoria son controladas por sistemas de vuelo tradicionales, es decir, mediante sistemas de engranajes, pistones y palancas accionadas manualmente por los pilotos a través del empleo de los mandos principales del helicóptero. Sin embargo, poco a poco se está introduciendo el novedoso sistema FBW. Dicho sistema transforma tanto las señales mecánicas que los pilotos crean al manipular los mandos de vuelo (cíclico, colectivo y pedales) como las órdenes producidas por éstos a través de los paneles de control del piloto automático (modos superiores y modos de misión)¹ en señales eléctricas. Posteriormente, estas señales son analizadas por un ordenador que posee las leyes de vuelo (algoritmos) y transformadas de vuelta a una orden mecánica que se transmite a la aeronave.

Mediante el empleo de un sistema FBW se podría aumentar la capacidad de crecimiento de las aeronaves del Ejército de Tierra mediante la mejora continua del software y leyes de vuelo según el escenario y condiciones en las que se opere, así como la posibilidad de controlar el helicóptero de forma remota. Todo ello supondrá:

- Incrementar la seguridad de las aeronaves y las tripulaciones de vuelo mediante la posibilidad de retorno automático a base en caso de piloto herido o mala meteorología.
- Aumentar las capacidades tácticas al poder añadir depósitos de combustible en el lugar que ocupa el piloto (y por tanto incrementar el radio de acción). Además, la reducción de peso que implica tener un sistema FBW puede aumentar la capacidad de carga (más personal o material en caso de helicópteros de maniobra y más armamento para helicópteros de ataque).
- Incrementar la seguridad de las aeronaves y tripulaciones de vuelo al poder implementar de forma más rápida, segura y sencilla tomas directas hasta el suelo en situaciones de brownout, patrones automáticos de búsqueda para la localización de tripulaciones derribadas, etc.

A día de hoy, el único helicóptero de las Fuerzas Armadas de España que posee este sistema es el NH-90, un helicóptero fabricado por el consorcio europeo NH Industries (Airbus Helicopters posee el 62,5% de la empresa). Por ello, la mayoría de datos recopilados en esta memoria han sido basados en dicha aeronave.

El sistema FBW lleva implementado en aeronaves de ala fija mucho más tiempo del que lleva en las de ala rotatoria, debido a la complejidad de estas últimas. Como consecuencia del éxito y mejoras que acarrea el empleo de estos sistemas en sus aviones, se plantearon crear el primer helicóptero que emplease el sistema FBW de serie.

¹ Los modos superiores del Sistema de Control de Vuelo Automático (AFCS) consisten en la posibilidad de introducir parámetros de vuelo como la velocidad de traslación, velocidad de ascenso, etc. Y que la aeronave mantenga dicha actitud de vuelo. Por otra parte, los modos de misión consisten en la posibilidad de poder pre-programar acciones como patrones de búsqueda para misiones Search And Rescue y Combat Search And Rescue (SAR y CSAR) y que el helicóptero adopte dicho tipo de vuelo.



La clave del éxito de este proyecto reside en realizar un análisis minucioso de los costes y aspectos técnicos que implica la transformación de ciertos modelos de helicóptero de la Aviación del Ejército de Tierra (AVIET) y analizar las ventajas y desafíos que implica dicha transformación. La correcta gestión de los datos proporcionados por Airbus Helicopters y la Academia de Aviación del Ejército de Tierra (ACAVIET), entre otras instituciones, también supone un factor crucial. Además, será de vital importancia el correcto empleo de herramientas de análisis estadístico y estimación para determinar ciertos costes y la viabilidad técnica del proyecto.

1.2 ANTECEDENTES

Actualmente, algunos grandes fabricantes de helicópteros están apostando por la modernización de algunos de sus helicópteros al sistema FBW (MathWorks, 2016). Una de las ventajas que muestra el sistema es la reducción en hasta un 90% del tiempo de integración (con respecto a un sistema tradicional) de mejoras en las leyes de vuelo para adaptarlas a las nuevas modalidades de vuelo y modos de misión que satisfagan los requerimientos surgidos de la experiencia obtenida en operaciones reales. Por ejemplo, el NH-90 francés cuenta con un modo de aterrizaje automático total, a diferencia del NH-90 español, el cual se queda a varios pies de altura, necesitando que el piloto haga la toma final. Esto se debe a que el ejército francés ha necesitado la implementación de este nuevo modo tras las experiencias vividas en sus despliegues en Mali (zonas muy polvorientas que dificultan la toma por condiciones de brownout², como podemos observar en la Figura 1).



Figura 1. Sea King del 845 Escuadrón Naval de la Marina Real Británica sufriendo un brownout. Fuente: Wikipedia, 2021

El empleo de simuladores de software como Simulink y Stateflow han hecho que se reduzca el tiempo de implementación de mejoras en el código, así como la mejora en la fiabilidad y facilidad de revisión del mismo (MathWorks, 2016).

Algún ejemplo de helicóptero que ha sido modernizado a este sistema puede ser el Sikorsky CH-53E Super Stallion, perteneciente al United States Marine Corps (USMC), el cual fue producido entre 1978 y 1980, al igual que los Súper Puma y Cougar del Ejército de Tierra.

² El brownout es una condición de restricción severa de visibilidad en presencia de polvo o arena en el aire. Durante este fenómeno, el piloto no puede ver objetos cercanos que le proporcionen referencias visuales necesarias para el control de la aeronave cerca del suelo. Puede causar desorientación espacial y pérdida de la conciencia situacional, causando un accidente.



Además, la empresa Bell ha modernizado su Bell 525 al sistema FBW, convirtiéndose así en el primer helicóptero civil en poseer dicho sistema. Por otro lado, Estados Unidos ha comenzado a estudiar la viabilidad de transformar sus famosos Black Hawk al sistema FBW, implementando la capacidad Optionally-Piloted Vehicle (OPV).

1.3 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria ha sido dividida en 6 capítulos, que reflejan las diferentes etapas que se han seguido durante el desarrollo del proyecto y que guardan un orden lógico que permite su comprensión.

Inicialmente, se encuentra la introducción donde se presenta el sistema FBW, los antecedentes, ámbito de aplicación y la estructura de la memoria, entre otros. Previo a la introducción se han desarrollado los índices de contenidos, imágenes, tablas y la lista de abreviaturas, siglas y acrónimos.

Seguidamente, en el capítulo 2, se exponen los objetivos del proyecto objeto de esta memoria y la metodología seguida para la investigación. Posteriormente, en el capítulo 3, es mostrado el estado del arte actual de los sistemas FBW y de algunas aeronaves que lo equipan.

Más tarde, en el capítulo 4, se analizan los costes de implementación del proyecto (formación de personal de mantenimiento, pilotos, transformación de la flota, etc.), gestión de interesados, decisión de aeronaves a modernizar, etc. Por último, se muestran los resultados y conclusiones obtenidas tras la realización de la memoria en el capítulo 5.

Para finalizar la memoria, se han incluido las referencias bibliográficas que han sido empleadas para la realización de esta memoria. Además, se adjuntan 5 anexos, que recogen toda la información que se considera relevante para su comprensión y que, debido a su extensión, no se han incluido en el cuerpo de ésta.



2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

2.1 OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo general de este trabajo consiste en analizar la viabilidad y la posibilidad de implementar el sistema FBW sobre aeronaves de ala rotatoria del Ejército de Tierra, así como las ventajas que aportaría en caso de realizarse y los costes derivados de esta posible transformación. A continuación, se muestra una enumeración de objetivos específicos que se analizarán a lo largo del trabajo, ya que aportan características y utilidades únicas, proporcionando así información para facilitar la toma de una posterior decisión:

- Estudiar la posibilidad de ser pilotadas de forma remota: el hecho de poder pilotar de forma convencional y remota una aeronave de ala rotatoria supone una gran ventaja táctica (reconocimientos de ejes de progresión con alta densidad de defensa aérea enemiga, mayor autonomía, etc.).
- Estudiar la posibilidad ser empleadas como wingman³ en situaciones tácticas donde se requiera un apoyo extra. Pueden ser pilotadas desde una estación en tierra o bien desde otra aeronave.
- Analizar la posibilidad de reducción de la carga de trabajo en las tripulaciones de vuelo (tanto en la preparación como en la ejecución de las misiones).
- Analizar la reducción de la carga de trabajo de las Unidades Técnicas de Mantenimiento (UTM) en helicópteros con sistema FBW.
- Analizar las posibilidades de crecimiento. Mayor facilidad de implementación de nuevos modos de misión y vuelo adaptados a los requerimientos que surjan derivados de las experiencias en misiones reales.

2.2 METODOLOGÍA

La metodología empleada para el desarrollo de esta memoria ha sido, en primer lugar, realizar un análisis bibliográfico, para obtener el conocimiento suficiente sobre el sistema FBW y el NH-90. Para ello, se ha recurrido al manual de vuelo de NH-90, suministrado por un piloto instructor de NH-90 tras realizar una entrevista con él. Además, todas las fuentes de información empleadas han sido contactadas por el director militar del trabajo, para su posterior entrevista y obtención de la información necesaria.

Un factor decisivo en la posible implementación de este trabajo es, sin duda, el coste del mismo (económico, en tiempo y humano). Para determinar de forma aproximada el coste en tiempo y dinero de formar al personal de mantenimiento se ha recurrido, a diferentes departamentos. Primeramente, las guías docentes y currículos de los cursos de mantenimiento (aviónica, mecánica y reparación e inspección técnica) de NH-90 han sido suministrados por el departamento de Técnica Militar de la ACAVIET. Mediante el estudio de dicha documentación se ha obtenido el tiempo exacto de la formación del personal de mantenimiento. Además, empleando un análisis paramétrico, se ha logrado obtener de forma aproximada la duración de la formación de dicho personal en la parte específica del sistema de control de vuelo (FCS, por su acrónimo inglés), pudiendo así comparar la duración de la formación en un sistema FBW del personal de mantenimiento en una aeronave completamente nueva con la de una transformación FBW a una nueva versión de una aeronave conocida.

³ Wingman (o wingmate) es un término que hace referencia a un piloto que apoya a otro en situaciones de vuelo potencialmente peligrosas. Originalmente, un wingman era un avión que volaba al lado y ligeramente detrás de la aeronave principal de la formación.



A su vez, la guía docente del curso de piloto instructor de NH-90 ha sido proporcionada por el Área de Instrucción del departamento de Instrucción y Adiestramiento de vuelo de la ACAVIET. Estudiando la documentación aportada se ha obtenido el tiempo exacto de la formación de los pilotos instructores. De igual forma que con el personal de mantenimiento, se ha empleado un análisis paramétrico para estimar de forma aproximada la duración y coste de la parte correspondiente al FCS.

En cuanto a toda la información relativa a los costes de dietas, locomoción, etcétera, derivados de la necesidad de desplazamiento del personal entre sus unidades de destino y la ACAVIET o donde corresponda, la Sección Económica de la Secretaría de Estudios de la ACAVIET, ha contribuido con los datos exactos del coste de la formación. Gracias a ello se han obtenido de forma aproximada, empleando de nuevo una estimación paramétrica, el coste de la formación relativa al sistema FCS.

Los datos relativos al coste del combustible de las aeronaves (Jet Propulsion 8, JP-8), para poder estimar el coste de las horas de vuelo en base al consumo medio, han sido proporcionados por La S-4 (sección logística de una plana mayor) de la ACAVIET.

El programa de instrucción que siguen los nuevos pilotos llegados a la base de Agoncillo, La Rioja para su transformación al NH-90 y convertirse en CR-1 (Combat Ready 1), ha sido facilitado por la Sección de Instrucción de la Unidad de Vuelo del Batallón de Helicópteros de Maniobra (BHELMMA) III. De esta documentación se ha obtenido el tiempo exacto de duración de la formación. Empleando una estimación paramétrica se ha obtenido la duración de la transformación a una nueva versión FBW de una aeronave conocida.

Las ofertas realizadas por Airbus al Ejército del Aire para la formación de pilotos y personal de mantenimiento en el helicóptero NH-90 han sido facilitados por la Oficina del Programa NH-90 de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM). De los nombrados documentos se han obtenido unos de los datos más importantes del trabajo, los costes de formación en la industria. Una vez analizada la información, se obtuvo el coste de la formación en Airbus, la cual es de gran importancia en la entrada en funcionamiento de una nueva aeronave. Posteriormente, se empleó una estimación por analogía, estimación paramétrica y análisis por tres puntos para obtener el coste relativo al sistema FCS.

El mayor coste que tendría que asumir el Ejército de Tierra para modernizar la flota de helicópteros es, el coste de la propia transformación. Para analizar dicho coste se ha recurrido al Sistema Integrado de Gestión Logística del Ejército (SIGLE). De esta aplicación informática propia del ejército se han obtenido los diferentes costes de los componentes del sistema FCS-FBW del NH-90, indispensables para el vuelo de una aeronave con sistema FBW. Éstos servirán para estimar de forma más precisa el coste de los componentes necesarios para la transformación de aeronaves al sistema FBW.

Sin embargo, además del coste de los componentes, hay que tener en cuenta los costes del cableado y buses de datos, los costes de mano de obra del montaje de los componentes, los costes del stock de componentes que se deben tener en almacén para mantener la flota operativa, y sobre todo los costes asociados a los estudios de ingeniería, cálculos y pruebas que el fabricante deberá llevar a cabo para desarrollar un software adecuado a la aeronave a la que se desee adaptar el sistema y un hardware que se adapte a las dimensiones de las bahías de aviónica del helicóptero en cuestión.

La estimación de todo el estudio de ingeniería se ha llevado a cabo tras la entrevista con un ingeniero consultor de Capgemini Engineering, el cual ha proporcionado las claves y datos necesarios para poder realizar de la forma más precisa posible el análisis.

A continuación, en la Tabla 1 se muestra de forma más visual y resumida de dónde se han obtenido los diferentes datos empleados para la consecución de los diferentes objetivos.



Tabla 1. Resumen de datos obtenidos y sus fuentes de información. Fuente: elaboración propia

Fuente de información	Dato obtenido
Departamento de Técnica Militar de la ACAVIET	Currículos y guías docentes de cursos de mantenimiento (aviónica, mecánica y reparación e inspección técnica) de NH-90
Área de Instrucción del Departamento de Instrucción y Adiestramiento de vuelo de la ACAVIET	Guía docente del curso de piloto instructor de NH-90
Sección Económica de la Secretaría de Estudios de la ACAVIET	Información relativa a costes de dietas y locomoción
S-4 de la ACAVIET	Coste del combustible de las aeronaves
Sección de Instrucción de la Unidad de Vuelo del BHELMA III	Programa de instrucción de los pilotos
Oficina del Programa NH-90 de la DGAM	Ofertas realizadas por Airbus al Ejército del aire en materia de formación de personal de mantenimiento y pilotos

Posteriormente, se ha procedido a realizar encuestas generales (método cuantitativo), para así poder recoger la opinión del personal de mantenimiento a cerca del nuevo sistema, ya que la respuesta de las UTM son un factor crítico. Los resultados de dicha encuesta han sido analizados con métodos estadísticos (los resultados más relevantes serán mostrados a lo largo de la memoria en formato imagen). El modelo de preguntas realizadas se encuentra en el Anexo A.

Por otra parte, se han empleado métodos mixtos, es decir, métodos cuantitativos (encuestas) y métodos cualitativos (entrevistas) para analizar el impacto del proyecto en la posibilidad de reducción de la carga de trabajo en las tripulaciones, así como las posibilidades de crecimiento. El modelo de preguntas empleado en la encuesta se encuentra en el Anexo B.

Finalmente, se ha decidido volver a utilizar un análisis bibliográfico para estudiar la posibilidad de emplear estas nuevas aeronaves de forma remota, en base a los progresos realizados por empresas como Sikorsky (Estados Unidos, EEUU) en este ámbito.

Para la decisión de qué aeronave es mejor elegir para una primera transformación se ha recurrido al Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por su acrónimo inglés), el cual es un método de decisión multicriterio que facilita la selección entre distintas alternativas en función de unas variables de selección. Este método permite transformar los aspectos cualitativos en cuantitativos, facilitando la comparación entre alternativas. Uno de los aspectos fundamentales para que el método funcione adecuadamente es elegir de forma adecuada los criterios de selección y que sean mutuamente excluyentes (González, 2019). Por ello, se ha realizado una tormenta de ideas (brainstorming) para seleccionar las variables de selección, además de una encuesta.



3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO (ESTADO DEL ARTE)

Debido a que la principal fuente de datos de donde bebe este proyecto es el NH-90, se explica a continuación el funcionamiento del FCS, el cual es el cerebro y alma de dicha aeronave.

Por otra parte, también se hace ver la importancia de la redundancia en este tipo de aeronaves. Además, se muestra cómo otras aeronaves con sistema FBW portan los mismos componentes (si no, unos parecidos), aunque en distintas proporciones y configuraciones. Por último, se aborda la cuestión del pilotaje remoto, haciendo mención a los actuales y más novedosos proyectos relacionados con dicha cuestión.

Todos los datos e información relacionada con el sistema FBW que se muestra en este apartado ha sido obtenida del manual de vuelo de NH-90 (Airbus Helicopters Training Services, 2015) y de entrevistas con un piloto instructor de NH-90.

3.1 FLIGHT CONTROL SYSTEM

El sistema FBW consiste en numerosos ordenadores y sensores. Cada mando de vuelo (cíclico, colectivo y pedales) está unido a unos sensores (llamados inceptores) que transforman las señales mecánicas en eléctricas. Además de las órdenes del piloto (movimiento de los mandos, botones, paneles e incluso pilotaje remoto) el FCC (Flight Control Computer) necesita conocer la posición y parámetros de vuelo del helicóptero para poder calcular las leyes de vuelo. Para ello, la aeronave cuenta con numerosos sensores (giróscopos, acelerómetros, sensores barométricos, GPS, etc.) que proporcionan la altura, aceleración, y demás información necesaria. Cuando el FCC ha procesado y calculado la ley de vuelo, esta es mandada a los ACC (Actuators Control Computers) encargados de la activación de los actuadores del rotor de cola y principal. Estos actuadores están controlados eléctricamente, pero la fuerza necesaria para accionarlos adecuadamente es proporcionada por el sistema hidráulico.

Como se ha mencionado anteriormente, el corazón de la aeronave consiste en el FCC y el ACC. Además, se ha indicado que se necesita conocer la posición del helicóptero, pero, ¿qué sensores se encargan de ello? Los principales sensores son los siguientes (se encuentran resaltados en rojo en la Figura 2):

- ADC (Air Data Computer): se encarga de analizar los datos barométricos.
- IRS (Inertial Reference System): mediante un complejo sistema de giróscopos y acelerómetros sumado al empleo de un receptor GPS, se encarga de analizar los datos inerciales de la aeronave.
- RA (Radar-Altimeter): se trata de un Radar-Altímetro, el cual mide la altura existente entre la aeronave y el terreno que sobrevuela mediante la emisión-recepción de ondas de radio.
- DVS (Doppler Velocity System): es un sistema complementario al IRS, el cual emplea el análisis del cambio de frecuencia de una onda producido por el movimiento relativo de la fuente (aeronave) respecto a su observador (terreno). Este fenómeno es conocido como efecto Doppler.

Por otra parte, se destacan también la interfaz del piloto (pilots interface), los FCC y ACC, así como los servos de control. Estos ítems se encuentran relacionados mediante flechas en la Figura 2 con los anteriormente descritos, pudiendo así deducir a simple vista cómo interaccionan entre si.

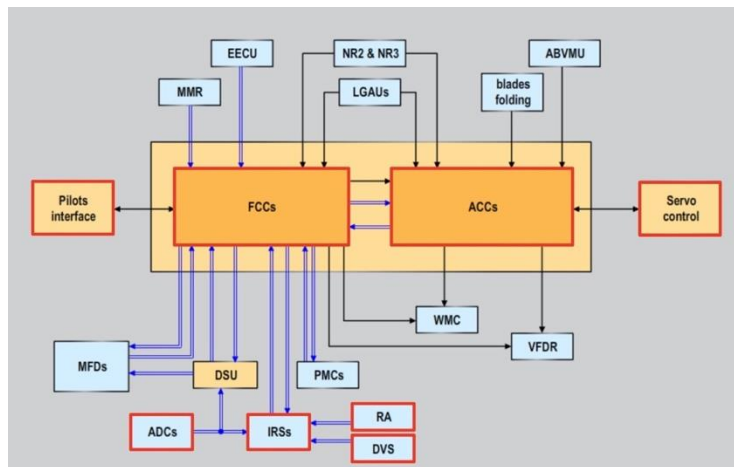


Figura 2. Arquitectura general del FCS. Fuente: adaptado del manual de vuelo de NH-90 (Airbus Helicopters Training Services, 2015)

Además, otro componente importante es el EECU (Engine Electronic Control Unit). Este sistema es el encargado de hacer que las órdenes de los modos superiores y los modos de misión no excedan los parámetros del helicóptero, lo cual derivaría en posibles fallos de la aeronave y, por consiguiente, un accidente. Sin embargo, el piloto sí podrá exceder los límites del motor con los mandos de vuelo (cíclico, colectivo y pedales) por motivos de seguridad (por ejemplo, evitar un obstáculo).

3.2 CONCEPTO DE REDUNDANCIA

El concepto de redundancia es algo muy presente en el mundo aeronáutico, ya que es una forma altamente eficaz de proporcionar seguridad. Sin embargo, duplicar un sistema de vuelo tradicional añade más complejidad y más peso al helicóptero. Por otra parte, duplicar los sistemas de vuelo en FBW no supone inconvenientes tan grandes como en un sistema de vuelo tradicional.

En el caso del NH-90, cuenta con dos FCC y dos ACC. Esta es la primera muestra del concepto de redundancia, si se nos estropea un FCC, tenemos otro. Además, aplicando la redundancia de una forma planificada y sistemática obtenemos que cada uno de estos FCC y ACC se encuentra en una bahía de aviónica distinta (ver Figuras 3 y 4), para que, en caso de un fuego en una de las bahías, sigamos teniendo disponible la otra de forma íntegra.

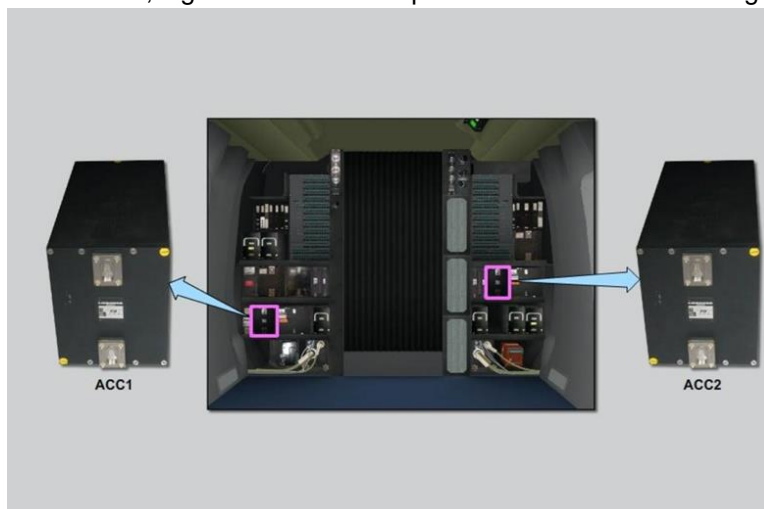


Figura 3. Localización de los ACC. Fuente: manual de vuelo de NH-90 (Airbus Helicopters Training Services, 2015)



Figura 4. Localización de los FCC. Fuente: manual de vuelo de NH-90 (Airbus Helicopters Training Services, 2015)

El FCC, para hacer gala de este concepto, está formado por un computador digital y uno analógico. Debido a que las leyes de vuelo digitales son más precisas y de mayor calidad (se calculan en base a los IRS) son las primeras que se usan. El computador analógico calcula las leyes de vuelo con unos giróscopos propios, haciendo que pierda calidad la ley de vuelo y quedarían vetados ciertos modos de misión que no podríamos usar. El helicóptero sería totalmente gobernable, pero de forma “manual”.

Los FCC calculan continuamente las leyes de vuelo digitales y analógicas. Sin embargo, la ley de vuelo digital del FCC 1 sería la que el helicóptero usa. En caso de fallo, entraría en escena la ley de vuelo digital del FCC 2. Tras un posterior fallo, se emplearía la ley de vuelo analógica del FCC 1 y finalmente la analógica del FCC 2. Gracias al concepto de redundancia se tienen 4 leyes de vuelo continuamente a disposición de los pilotos para que, en caso de fallo de la primera, tengan una cierta seguridad para poder tomar en un lugar seguro si fuera posible.

En los ACC también se emplea el concepto de redundancia, como era de esperar. Estos controladores cuentan con 4 canales, a través de los cuales se crean órdenes para controlar la aeronave. Al igual que ocurría con los FCC, en los ACC se crean órdenes continuamente con los cuatro canales. Se emplea primero la orden del canal 1 (perteneciente al ACC 1) y luego la del canal 2 (perteneciente al ACC 2) y así consecutivamente.

3.3 OTRAS AERONAVES DE ALA ROTATORIA CON SISTEMA FBW

A continuación, se muestra el estado del arte actual del sistema FBW a través de la exposición del mismo aplicado en otras aeronaves de ala rotatoria.

3.3.1 V-22 “Osprey”

Esta aeronave (Figura 5) producida por las empresas Bell y Boeing se trata realmente de una aeronave de rotores basculantes (en inglés, Tilt Rotor). Sin embargo, al poseer la capacidad de despegue vertical (propia de los helicópteros) y ser fabricada por una de las empresas líderes



en la fabricación de aeronaves de ala rotatoria, se ha decidido nombrarla en esta memoria.



Figura 5. V-22 Osprey en vuelo. Fuente: Wikipedia, 2021

El programa de desarrollo de esta aeronave comenzó en los años 80, logrando su primer vuelo en 1989. No obstante, no fue hasta el año 2000 cuando el Cuerpo de Marines de Estados Unidos comenzó el entrenamiento de sus tripulantes para introducirlo definitivamente en servicio en el año 2007.

El V-22 “Osprey” posee un sistema de control FBW, completamente digital (no como el NH-90, el cual además de los canales principales digitales también agrega canales analógicos) y con una triple redundancia. Según un informe realizado por Currie (1999), comandante de la United States Air Force (USAF), las principales ventajas de que esta aeronave contenga el sistema FBW son:

- Reducción del peso del sistema (711 lb/322,5 kg)
- Aumento de la fiabilidad
- Mejora en la detección/aislamiento de fallos
- Mayor tolerancia a los daños gracias a la redundancia y separación física de los componentes
- Mayor seguridad mediante la integración de limitación de cargas estructurales activas

El corazón del sistema estaría compuesto por tres FCC's. Al igual que en el NH-90, las leyes de vuelo están contenidas en el FCS, el cual se encuentra completamente integrado con el sistema FADEC (sistema análogo al EECU). Todos los parámetros de la aeronave y el estado del sistema se pueden monitorizar completamente a través de las pantallas multifunción integradas en la cabina.

3.3.2 CH-53K “King Stallion”

El Sikorsky CH-53K King Stallion, mostrado en la Figura 6, es un helicóptero de carga pesado, actualmente, el mayor y más pesado usado por las fuerzas armadas estadounidenses. Esta aeronave cuenta con un gran número de predecesores y hermanos, comenzando la familia H-53 en 1962 como producto de la competición “Helicóptero Pesado Experimental del Cuerpo de Marines de los Estados Unidos. Finalmente, el primer vuelo de la más moderna versión (el CH-53K) sería en octubre de 2015 y entregado al Cuerpo de Marines en 2018.



Figura 6. CH-53K cargando un vehículo táctico. Fuente: Wikipedia, 2021

Esta poderosa aeronave (capaz de cargar 10.800 kg más que el helicóptero de transporte pesado del Ejército de Tierra, el CH-47 Chinook) ha sido diseñada desde cero con el sistema FBW, ya que para conseguir semejante Peso Máximo al Despegue (MTOW, por su acrónimo inglés) es necesario introducir motores más potentes (más peso). La reducción de peso que ofrece la implementación del sistema FBW ha hecho posible lo anterior, además de posibilitar un mejor aprovechamiento de los motores mediante el Full Authority Digital Engine Control (FADEC).

El sistema que porta esta aeronave posee una triple redundancia la cual reside en sus tres FCC. Además, cada FCC posee dos procesadores de Entrada-Salida (Input-Output) de la prestigiosa marca Texas Instruments y dos procesadores con tecnología PowerPC⁴ en cada canal (tres canales por cada FCC).

John Rucci (2020), piloto de pruebas del Cuerpo de Marines de Estados Unidos y de Sikorsky lleva volando más de 25 años y afirma lo siguiente en un artículo: “I can say that CH-53K is undoubtedly my favorite aircraft to fly”. Traducido al español sería: “puedo decir que la aeronave que más me gusta volar es el CH-53K”. A lo largo del artículo, John Rucci recalca que su opinión reside fundamentalmente en el sistema de control de la aeronave, el Fly-By-Wire.

3.4 PILOTO REMOTO Y WINGMAN

Como ha sido comentado anteriormente en el apartado 2.1, uno de los objetivos de este trabajo reside en analizar la posibilidad de pilotar remotamente una aeronave de ala rotatoria mediante la previa implementación del sistema FBW en dicha aeronave, así como el empleo de aeronaves wingman. Ambos objetivos se encuentran estrechamente relacionados, ya que poder controlar remotamente una aeronave implica la capacidad de poder emplearla como wingman.

Actualmente existen varios programas que se centran en desarrollar este tipo de aeronaves no tripuladas, por ejemplo:

- Future Combat Air System (FCAS), en español, Futuro Sistema Aéreo de Combate: este programa es desarrollado por las empresas Airbus, Indra Sistemas y Dassault Aviation. Los usuarios de este sistema serán el Ejército del Aire Español, el Armée de L’Air

⁴ Procesadores PowerPC hacen referencia a un tipo de arquitectura computacional basada en la reducción de instrucciones. Al tratarse de conjuntos de instrucciones pequeñas y simples, tomarán un menor tiempo en ejecutarse.



francés y la Luftwaffe alemana. El FCAS estará compuesto por un caza de nueva generación (sexta generación) y Vehículos No Tripulados de Combate Aéreo, formando así un enjambre de UCAV's (por sus siglas en inglés, Unmanned Combat Air Vehicle). El propósito principal de los drones de combate es el de lograr el dominio de la información. Según datos publicados por el senado francés en 2020, el coste del proyecto oscila entre 50.000 y 80.000 millones de euros, sufragado mediante una aportación económica igualitaria del 33% por parte de los 3 miembros.

- Future Attack Reconnaissance Aircraft (FARA), en español, Futura Aeronave de Reconocimiento y Ataque: es un programa iniciado por el US Army (equivalente al Ejército de Tierra) en 2018 y en el que participan empresas como Bell, Sikorsky y Boeing, entre otras. En las pruebas realizadas hasta ahora, el helicóptero de ataque de Estados Unidos, el AH-64E, mejor conocido como Apache, ha sido capaz de realizar operaciones aire-tierra conjuntas con varias aeronaves no tripuladas (MQ-1C y RQ-7).
- Skyborg: se trata de un sistema desarrollado por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. La tecnología de dicho sistema trata de "un 'cerebro' a bordo de un dron" (Izan González, 2021) como relatan en un artículo de *El Español*. El pasado día 29 de abril de 2021, se realizó el primer vuelo de este sistema, integrado en un dron Kratos UTAP-22, con una duración de dos horas y diez minutos. En estas pruebas, el dron era controlado desde tierra, sin embargo, se espera que en un futuro solo reciba órdenes desde el aire, como puede ser un F-16.

Para poder controlar una aeronave de forma remota es de imperiosa necesidad que su sistema sea FBW, ya que, si no se necesitaría un actuador físico sobre los controles de las aeronaves, aumentando su coste y complejidad.

3.5 SUPUESTOS TÁCTICOS

A continuación, se exponen una serie supuestos tácticos que servirán para ilustrar un posible empleo de aeronaves con sistema FBW empleadas como wingman, siguiendo la actual doctrina y procedimientos operativos de helicópteros.

3.5.1 Reconocimiento en fuerza

En un primer supuesto, se pretende realizar un reconocimiento en fuerza, el cual es definido por la Publicación Doctrinal 4-018 (PD4-018), Acciones Militares Tácticas de Apoyo: Reconocimiento, escrito por la Dirección de Investigación, Doctrina, Orgánica y Materiales del Mando de Adiestramiento y Doctrina (MADOC) del Ejército de Tierra, como:

Tipo de acción militar táctica ofensiva cuya finalidad es obtener información sobre el enemigo, y más concretamente sobre la ubicación de sus posiciones y la consistencia y forma de reaccionar de su dispositivo defensivo.

La forma más habitual de obtener esta información es realizar acciones de fuego directo sobre las posiciones del enemigo para que este, al responder por el fuego, delate la ubicación y tipo de organización de sus posiciones defensivas. Para llevar a cabo dicho reconocimiento se emplearán dos helicópteros tripulados y otros dos helicópteros no tripulados tipo wingman asociados a los primeros. La disposición será la mostrada en la Figura 7.

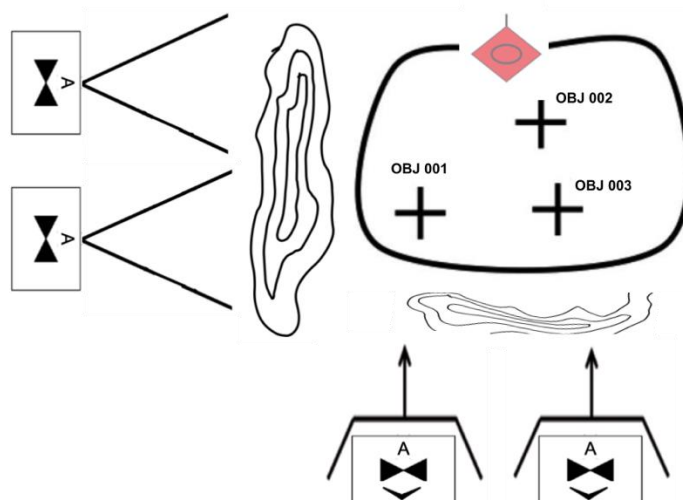


Figura 7. Esquema del supuesto táctico de un reconocimiento en fuerza. Fuente: elaboración propia y simbología PD0-002

La secuencia de la misión será la siguiente:

1. Las aeronaves no tripuladas (las figuras situadas en la esquina inferior derecha) saldrán de su posición de a cubierto para hacer fuego sobre los objetivos marcados (objetivos dentro de una compañía acorazada, representada por el rombo rojo con un ovalo en su interior).
2. Las aeronaves tripuladas (situadas en la esquina superior izquierda) observarán la reacción del enemigo según sus sectores de vigilancia, previamente definidos.
3. Finalmente, tras obtener la información deseada, se romperá el contacto con el enemigo, regresando a la base y dando por finalizada la misión.

La ventaja de emplear aeronaves no tripuladas con las mismas características y apariencia que las que sí son tripuladas es que el enemigo no es capaz de distinguirlas, centrando así su atención en estas que le hacen fuego (las no tripuladas), reduciendo la probabilidad de causar bajas y reduciendo la carga de trabajo de los pilotos, ya que no sería necesario realizar esquivas del fuego enemigo.

3.5.2 Escolta aérea

En un segundo supuesto táctico, se expone el posible empleo como escolta armada de, por ejemplo, dos NH-90 realizando misiones de transporte táctico, bien de personal o de carga.

Se pretende realizar una escolta aérea, la cual es definido por la Publicación Doctrinal 4-802 (PD4-802), Procedimientos Operativos de Helicópteros, escrito por la Dirección de Investigación, Doctrina, Orgánica y Materiales del Mando de Adiestramiento y Doctrina (MADOC) del Ejército de Tierra, como:

Son operaciones que los helicópteros de ataque llevan a cabo para dar protección a formaciones aéreas que estén volando misiones de transporte (helitransporte, aerotransportadas, evacuaciones, etc.) así como durante el desarrollo de cualquier fase de operaciones de asalto aéreo.

Para llevar a cabo esta misión se emplearán dos helicópteros tripulados (los dos NH-90 anteriormente mencionados) y otros dos helicópteros no tripulados tipo wingman en base a Tigre. La disposición será la mostrada en la Figura 8.

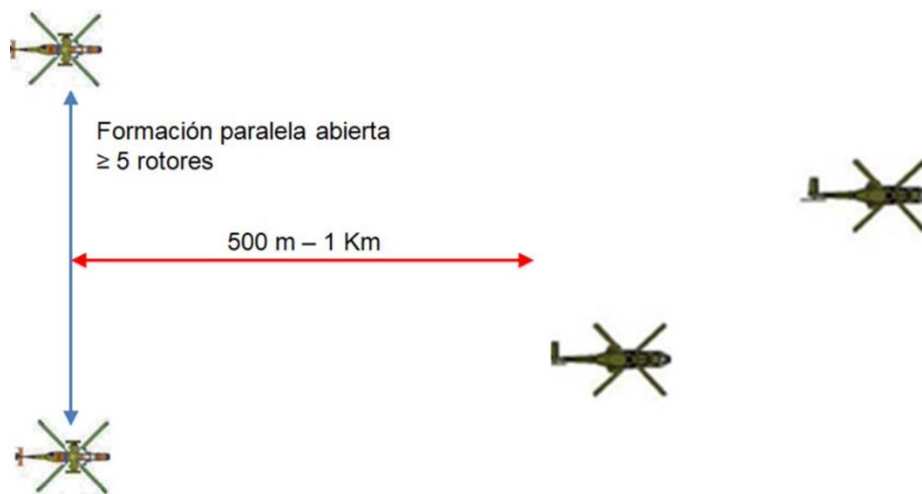


Figura 8. Escolta próxima a retaguardia. Fuente: PD4-802

En la anterior figura se muestra una de las múltiples escoltas que existen. Para este supuesto táctico se ha escogido esta por su sencillez y situaciones en las que es empleada (escenario tipo insurgencia). Esta formación proporciona inmediatez en el apoyo de fuegos si fuera necesario, así como maximizar la sorpresa.

En caso de entablar contacto con el enemigo, los dos helicópteros no tripulados serían capaces de hacer frente a la amenaza, bien si fuera aérea o terrestre. La ventaja del empleo de este tipo de aeronaves reside en la posibilidad de realizar un apoyo más agresivo, ya que no se teme por la vida de los pilotos al no existir. Además, la coordinación entre las aeronaves que realizan el apoyo y las que realizan la evasión es mayor, ya que pueden ser manejadas por la tripulación de esta.



4. DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS

En el siguiente apartado se detalla cómo se ha realizado el análisis técnico y de costes de la implementación, la gestión de interesados, la decisión de qué aeronaves modernizar, el estudio de los objetivos secundarios y, por último, la comparación de modelos similares de helicópteros.

4.1 ANÁLISIS DE COSTES

Se estudiará la implementación de un sistema de control de vuelo FBW en una flota de helicópteros con sistema de control de vuelo convencional. El análisis de costes no solo ayuda a determinar el coste de la implementación del proyecto y su posterior mantenimiento, sino que también sirve para determinar si es rentable su implementación en las Fuerzas Armadas, y en particular, en el Ejército de Tierra. Durante la realización de este proyecto, se han considerado objeto de análisis los siguientes costes:

- Coste de la formación del personal de mantenimiento.
- Coste de la formación de pilotos.
- Coste de la transformación a sistema FBW de aeronaves de la flota de AVIET.

Para la estimación de los costes relativos al proyecto, se han empleado los datos referentes al sistema FCS del helicóptero NH-90, el cual es el único que cuenta con un sistema FBW en las Fuerzas Armadas de España. A continuación, serán analizados los costes anteriormente mencionados, dividiendo la formación del personal en: formación impartida por el Ejército de Tierra) ET y formación impartida por Airbus. Esto se debe a que los primeros técnicos de mantenimiento y pilotos necesitan ser instruidos por la propia industria y, una vez alcanzado el conocimiento necesario, podrán impartir los cursos dentro del propio ejército. Por otra parte, se muestran los costes totales y los referentes al FCS, para así realizar la comparación del coste que supone la formación en una nueva aeronave frente a una “transformación” a un nuevo sistema dentro de la misma aeronave.

A pesar de detallar los costes junto con los cálculos y métodos empleados en los siguientes apartados, en el Anexo E, se exponen de forma resumida y más visual éstos mismos.

4.1.1 Costes de formación del personal de mantenimiento

Como es bien sabido, el mantenimiento en el mundo aeronáutico es crítico. Sin un adecuado mantenimiento no sería seguro el empleo de dichas aeronaves, el número de accidentes catastróficos sería muy elevado y podrían ocurrir averías muy difíciles y caras de solucionar, por ejemplo. Es por ello que el coste de este recurso será analizado en primer lugar. Los cursos de mantenimiento que serán estudiados son:

- Curso de Mantenimiento de Aviónica de Helicópteros HT-29: costes dentro del Ejército de Tierra y en Airbus.
- Curso de Mantenimiento y Reparación de Helicópteros HT-29: costes dentro del Ejército de Tierra y en Airbus.
- Curso de Inspector Técnico de Helicópteros HT-29: costes dentro del Ejército de Tierra.

Para el análisis de costes en tiempo y económicos de la formación en el ET se ha empleado documentación relativa a las guías docentes y currículos de la formación de perfeccionamiento impartida en la ACAVIET para personal de mantenimiento. Dicha documentación ha sido aportada por el Departamento de Técnica Militar y la Sección Económica de la Secretaría de Estudios de la ACAVIET. Además, se cuenta con una oferta realizada a la DGAM por la industria



en abril de 2021, aprovechando que el Ejército del Aire ha recibido recientemente los helicópteros NH-90 para analizar el coste de formación en Airbus.

4.1.1.1 Curso de Mantenimiento de Aviónica de Helicópteros HT-29

La aviónica es la aplicación de la electrónica a la aviación, y como ya ha sido explicado a lo largo de la memoria, el nuevo sistema FBW está basado en un mayor empleo de la misma. Además, según las encuestas realizadas, la necesidad de personal experto en esta área ha aumentado, según el 84,6% del personal encuestado. Además, la mayoría del personal que ha hecho esta afirmación ha reflejado en la encuesta que el aumento ha sido de entre un 25% y un 50%. De esto se deduce que este personal es un factor a tener muy en cuenta.

La información para poder realizar el análisis del Curso de Mantenimiento de Aviónica de Helicópteros HT-29 ha sido obtenida del currículo del propio curso, proporcionado por la ACAVIET y la oferta de Airbus realizada a la DGAM, proporcionada por la oficina del programa NH-90. Además, los datos relativos a las dietas y locomoción han sido facilitados por la Sección Económica de la Secretaría de Estudios de la ACAVIET.

4.1.1.1.1 Formación en el Ejército de Tierra

El Curso de Mantenimiento de Aviónica de Helicópteros HT-29 impartido en la ACAVIET por el Departamento de Técnica Militar tiene una duración de 15 semanas y es de carácter presencial. Su equivalente en créditos ECTS es de 27 o 675 horas ECTS. Según la guía docente (ACAVIET, 2020):

El Curso de Mantenimiento de Aviónica de Helicópteros HT-29 está destinado a la formación de personal que requiera una capacitación específica para realizar las tareas de mantenimiento de primer nivel en sistemas de aviónica de los helicópteros HT-29 en las distintas unidades de helicópteros del ET y Parque y Centro de Mantenimiento de Helicópteros (PCMHEL), así como realizar funciones docentes en este modelo de helicóptero en cursos impartidos en la Academia de Aviación del Ejército de Tierra (ACAVIET).

El curso se encuentra dividido en 4 tipos de sesiones. Sin embargo, para realizar una adaptación al nuevo sistema, no es necesario cursarlas todas. Esto es debido a que las primeras sesiones son de formación común a todas las aeronaves, la cual se presupone aprendida. A continuación, véase Tabla 2, se muestra un breve resumen de la estructura del curso completo y de la parte correspondiente al sistema FCS:

Tabla 2. Distribución de carga de trabajo en horas. Fuente: Guía docente Curso de Mantenimiento de Aviónica de helicópteros HT-29 ACAVIET y modificación propia

Tipos de Sesión	Horas totales	Horas FCS	Horas FCS respecto a las horas totales
Sesiones Teóricas Subfase Común	58,5	-	-
Sesiones Demostrativas Subfase Común	16,5	-	-
Sesiones Teóricas Fase Específica	420,0	116,0	27,6%
Sesiones Prácticas	180,0	49,7	27,6% ⁵
TOTAL DEL CURSO	675,0	165,7	24,6%

⁵ Para el cálculo de las horas prácticas relativas al sistema FCS del Curso de Mantenimiento de Aviónica de Helicópteros HT-29 ha sido empleado el porcentaje de las horas de teoría (las cuales son exactas), ya que en el currículo el dato necesario era imposible de obtener.



Los módulos teóricos se realizan fuera de la unidad de destino, ya que son impartidos en la ACAVIET (Colmenar Viejo, Madrid), y los módulos prácticos en la unidad de destino (en este caso, Agoncillo, La Rioja, por tratarse del HT-29). Debido a los desplazamientos que el alumnado tiene que realizar a lo largo del curso y la necesidad de alojamiento y manutención de los mismos, el coste estimado por alumno, sin incluir el sueldo pertinente, sería el siguiente:

- Dietas totales: 4.348,68 €
- Locomoción total: 250 €

En base al porcentaje correspondiente a la parte FCS se obtienen los siguientes gastos de dietas y locomoción:

- Dietas FCS: $4.348,68 \cdot \frac{24,55}{100} = 1.067,60$ €
- Locomoción FCS: $250 \cdot \frac{24,55}{100} = 61,38$ €

4.1.1.1.2 Formación en Airbus

La formación impartida por Airbus se trata de una habilitación de tipo, es decir, el alumno debe poseer unos conocimientos básicos previos. La duración del curso teórico-práctico es de 8 semanas (5 de teoría y 3 de práctica). El coste presupuestado por el curso completo para 8 alumnos es de 105.600€. El curso se desarrollará en las instalaciones de Airbus, en Albacete.

A continuación, se muestra un desglose del tiempo necesario en cada fase del curso completo y la parte que corresponde al sistema FCS (Tabla 3):

Tabla 3. Distribución de carga de trabajo en horas. Fuente: presupuesto de Airbus a la DGAM y modificación propia

Tipos de Sesión	Horas totales	Horas FCS	Horas FCS respecto al total
Módulo Teórico	150,0	32,0	21,3%
Módulo práctico	90,0	17,5	19,4%
TOTAL DEL CURSO	240,0	49,5	20,6%

El coste del curso ha sido calculado mediante la división del precio presupuestado entre los alumnos que cursan esta formación. Además, para estimar la parte correspondiente al sistema FCS, se ha utilizado una estimación paramétrica:

- Coste total del curso: $\frac{105.600}{8} = 13.200$ € *por alumno*.
- Coste FCS: $\frac{105.600}{8} \cdot \frac{20,63}{100} = 2.723,16$ € *por alumno*.

Al igual que en la formación dentro del ET, al realizarse fuera de la unidad de destino, es necesario incluir un coste relativo a la manutención y locomoción del personal implicado. Por ello, se incluye a continuación una estimación por analogía (costes del curso de aviónica impartido por el ET) y estimación paramétrica de dichos costes para el curso completo y la parte relativa al sistema FCS:

- Curso ET: 675h, 4.348,68 € → 6,44 €/h
- Dietas curso completo: $240 \cdot 6,44 = 1.545,6$ €
- Locomoción curso completo: 250 €
- Dietas FCS: $49,5 \cdot 6,44 = 318,78$ €



- Locomoción FCS: 250 €

4.1.1.2 Curso de Mantenimiento y Reparación de Helicópteros HT-29

Según un artículo de la empresa aeronáutica ITAaérea (2019):

El mantenimiento aeronáutico o MRO (Maintenance, Repair and Overhaul, en sus siglas en inglés) siempre ha sido uno de los puntos más delicados de la aviación, tanto cuando una aeronave vuela, debido a los altos costes de operación, como cuando falla por falta de un repuesto, haciendo que esté inoperativa. En ambos casos se incurre en costes fijos muy elevados.

Si a esto añadimos la posibilidad de no poder cumplir una misión encomendada, se convierte en otro factor muy importante a tener en cuenta. Aunque, según las encuestas realizadas a personal del BHELMA III y el Ala 48, tan solo el 10% del personal encuestado afirma que la plantilla de mecánicos ha aumentado, mientras que el 90% afirma que ha existido una redistribución a oficinas de documentación, por lo que se deduce que el número de mecánicos ejerciendo en su puesto ha disminuido.

La información para poder realizar el análisis del Curso de Mantenimiento y Reparación de Helicópteros HT-29 ha sido obtenida del currículo del propio curso, proporcionado por la ACAVIET y la oferta de Airbus realizada a la DGAM, proporcionada por la oficina del programa NH-90. Además, los datos relativos a las dietas y locomoción han sido proporcionados por la Sección Económica de la Secretaría de Estudios de la ACAVIET.

4.1.1.2.1 Formación en el Ejército de Tierra

Este curso, al igual que el de Mantenimiento de Aviónica, se imparte por el Departamento de Técnica Militar de la ACAVIET. Cuenta con una duración de 21 semanas y 36 créditos ECTS, equivalente a 900 horas ECTS y también de carácter presencial. La guía docente presenta el curso de la siguiente forma (ACAVIET, 2020):

El Curso de Mantenimiento y reparación de Helicópteros HT-29 está destinado a la formación de personal que requiera una capacitación específica para realizar las tareas de mantenimiento de primer nivel en sistemas funcionales de los helicópteros HT-29 en las distintas unidades de helicópteros del ET y PCMHEL, ejecutar las misiones de Mecánico Tripulante formando parte activa de la tripulación del helicóptero, así como realizar funciones docentes en este modelo de helicóptero en cursos impartidos en la Academia de Aviación del Ejército de Tierra (ACAVIET).

El curso se encuentra estructurado en dos fases: una teórica y otra práctica, la primera de las cuales se divide a su vez en dos subfases: una común que comprende las asignaturas de conceptos generales que afectan a todos los modelos de helicópteros y otra específica en la que se imparten los conocimientos específicos de este modelo de helicóptero. En la siguiente tabla (Tabla 4), se muestra la distribución de la carga de trabajo del curso completo y de la parte correspondiente al FCS:



Tabla 4. Distribución de carga de trabajo en horas. Fuente: Guía docente Curso de Mantenimiento y Reparación de helicópteros HT-29 ACAVIET y modificación propia

Tipos de Sesión	Horas totales	Horas FCS	Horas FCS respecto al total
Sesiones Teóricas Subfase Común	135,0	-	-
Sesiones Teóricas Fase Específica	495,0	60,0	12,1%
Sesiones Prácticas	270,0	32,7	12,1% ⁶
TOTAL DEL CURSO	900,0	92,7	10,3%

Los módulos teóricos se realizan fuera de la unidad de destino, ya que son impartidos en la ACAVIET (Colmenar Viejo, Madrid), y los módulos prácticos en la unidad de destino (en este caso, Agoncillo, La Rioja, por tratarse del HT-29). Debido a los desplazamientos que el alumnado tiene que realizar a lo largo del curso y la necesidad de alojamiento y manutención de los mismos, el coste, sin incluir el suelo pertinente, sería el siguiente:

- Dietas: 5.831,67 €
- Locomoción: 375,1 €

En base al porcentaje correspondiente a la parte FCS se obtienen los siguientes gastos de dietas y locomoción:

- Dietas FCS: $5.831,67 \cdot \frac{10,30}{100} = 600,66$ €
- Locomoción FCS: 375,1 €

4.1.1.2.2 Formación en Airbus

Al igual que el curso de mantenimiento de aviónica, se trata de una habilitación de tipo, por lo que el alumno debe poseer unos conocimientos básicos previos. La duración del curso teórico-práctico es de 9 semanas (5 de teoría y 4 de práctica). El coste presupuestado por el curso completo para 16 alumnos es de 237.600 €. el curso se desarrollará en las instalaciones de Airbus, en Albacete. Además, se presupuesta un coste opcional, el cual consiste en la posibilidad de impartir la formación en las instalaciones del cliente. Dicho coste asciende a 45.400 €.

A continuación, se muestra un desglose del tiempo necesario en cada fase del curso completo y la parte que corresponde al sistema FCS (Tabla 5):

Tabla 5. Distribución de carga de trabajo en horas. Fuente: presupuesto de Airbus a la DGAM y elaboración propia

Tipos de Sesión	Horas totales	Horas FCS	Horas FCS respecto al total
Módulo Teórico	150,0	11,5	7,7%
Módulo práctico	120,0	8,0	6,7%
TOTAL DEL CURSO	270,0	19,5	7,2%

El coste del curso ha sido calculado mediante la división del precio presupuestado entre los alumnos que cursan esta formación. Además, para estimar la parte correspondiente al sistema FCS, se ha utilizado una estimación paramétrica:

⁶ Para el cálculo de las horas prácticas relativas al sistema FCS del Curso de Mantenimiento y Reparación de Helicópteros HT-29 ha sido empleado el porcentaje de las horas de teoría (las cuales son exactas), ya que en el currículo el dato necesario era imposible de obtener.



- Coste total del curso: $\frac{237.600}{16} = 14.850 \text{ € por alumno.}$
- Coste FCS: $\frac{237.600}{16} \cdot \frac{7,22}{100} = 1.072,17 \text{ € por alumno.}$

Al igual que en la formación dentro del ET, al realizarse fuera de la unidad de destino, es necesario incluir un coste relativo a la manutención y locomoción del personal implicado. Por ello, se incluye a continuación una estimación por analogía (costes del curso de aviónica impartido por el ET) y estimación paramétrica de dichos costes para el curso completo y la parte relativa al sistema FCS:

- Curso ET: 900h, 5.831,67 € → 6,48 €/h
- Dietas curso completo: $270 \cdot 6,48 = 1.749,6 \text{ €}$
- Locomoción curso completo: 375,1 €
- Dietas FCS: $19,5 \cdot 6,48 = 126,36 \text{ €}$
- Locomoción FCS: 375,1 €

4.1.1.3 Curso de Inspector Técnico de Helicópteros HT-29

Un inspector técnico de aeronaves se encarga de certificar e inspeccionar el cambio de componentes, las reparaciones los registros de horas y ciclos volados, etc. (García, 2013). Su labor es imprescindible para garantizar que todas las operaciones realizadas al helicóptero han seguido la norma vigente. Además, tal y como se puede observar en la encuesta realizada al personal del BHELMA III y el Ala 48, el número de inspectores técnicos ha aumentado, según el 90% de los encuestados, con la llegada del NH-90.

La información para poder realizar el análisis del Curso de Inspector Técnico de Helicópteros HT-29 ha sido obtenida del currículo del propio curso, proporcionado por la ACAVIET. Además, los datos relativos a las dietas y locomoción han sido proporcionados por la sección de asuntos económicos de la ACAVIET.

Esta formación no será impartida por Airbus.

4.1.1.3.1 Formación en el Ejército de Tierra

Este curso, al igual que los anteriores mencionados, es impartido de forma presencial por el Departamento de Técnica Militar de la ACAVIET. Posee una duración de 14 semanas, con 25,2 créditos ECTS o su equivalente en horas, 630. Según la guía docente, la finalidad y objetivos del curso son (ACAVIET, 2020):

Proporcionar al alumno los conocimientos técnicos necesarios para desarrollar las labores de Inspección y Control en las Secciones de Control de Calidad de las UTM de los Batallones de Helicópteros de Maniobra de las Unidades de las Fuerzas Aeromóviles del Ejército de Tierra (FAMET), del Parque y Centro de Mantenimiento de Helicópteros (PCMHEL) y Unidades de Medios Aéreos del Ejército de Tierra.

El curso se encuentra dividido en dos fases: fase de teoría y fase de prácticas. A su vez, la fase de teoría se encuentra dividida en dos subfases, tal y como se muestra en la Tabla 6: módulo común y módulo específico del HT-29. Además, es mostrada la parte correspondiente al sistema FCS.



Tabla 6. Distribución de carga de trabajo en horas. Fuente: Guía docente Curso de Inspector Técnico de helicópteros HT-29 ACAVIET y modificación propia

Fases y subfases		Horas totales	Semanas totales	Horas FCS	Horas FCS respecto al total
Fase de Teoría	Módulo Común	135,0	3,0	-	-
	Módulo Específico HT-29	315,0	7,0	40,5	12,9%
Fase de Prácticas	Prácticas de modelo HT-29	180,0	4,0	23,2	12,9% ⁷
TOTAL DEL CURSO		630,0	14,0	63,7	10,1%

La Fase de Teoría se desarrolla en la Academia de Aviación del Ejército de Tierra, situada en la Base “Coronel Maté”, en Colmenar Viejo, mientras que la Fase de Prácticas se desarrolla en el BHELMA III, Agoncillo. Por ello, la necesidad de desplazamiento y alojamiento supone un gasto, siendo este el siguiente:

- Dietas: 3.154,76 €
- Locomoción: 250 €

En base al porcentaje correspondiente a la parte FCS se obtienen los siguientes gastos de dietas y locomoción:

- Dietas FCS: $3.154,76 \cdot \frac{10,10}{100} = 318,63$ €
- Locomoción FCS: 250 €

4.1.2 Costes de formación de pilotos

Los pilotos serán los que podrán apreciar los cambios más de cerca, siendo una pieza fundamental del puzzle. Para realizar el análisis del coste asociado a la formación de pilotos será analizada la documentación aportada por el BHELMA III de Agoncillo (La Rioja) en cuanto al programa de instrucción de la unidad de sus pilotos y por la Oficina del Programa NH-90 de la DGAM en cuanto a la formación por parte de la industria de pilotos de este modelo de helicóptero. La formación que se estudiará en este apartado es la siguiente:

- Transformación a HT-29: costes dentro del Ejército de Tierra y en Airbus (Type Rating).
- Curso de Piloto Instructor: costes dentro del Ejército de Tierra y en Airbus.

4.1.2.1 Transformación a HT-29/Type Rating NH-90

4.1.2.1.1 Formación en el Ejército de Tierra

La formación que reciben los pilotos en la ACAVIET es exquisita, sin embargo, se tiene la necesidad de transformar sus conocimientos en la nueva aeronave de destino.

Por ello, esta nueva fase en la formación del piloto no la imparte la ACAVIET, sino que la

⁷ Para el cálculo de las horas prácticas relativas al sistema FCS del Curso de Inspector Técnico de Helicópteros HT-29 ha sido empleado el porcentaje de las horas de teoría (las cuales son exactas), ya que en el currículo el dato necesario era imposible de obtener.



imparte la unidad de destino. La transformación al helicóptero NH-90 está compuesta por sesiones teóricas, sesiones de Part Task Trainer (PTT) -el cual es un simulador estático para familiarizarse con la cabina y la instrumentación-, sesiones de vuelo en simulador y, por último, sesiones de vuelo real.

En este caso, al realizarse la transformación de forma íntegra por el propio Ejército de Tierra y en la unidad de destino, no existen gastos asociados a dietas y locomoción. Sin embargo, existen gastos asociados al propio vuelo de la aeronave, como son:

- Coste de combustible: el combustible empleado es el JP-8. El coste de 1L de este combustible para el ejército de 0,53€. El consumo medio del NH-90 es de 600L/h (similar al de otras aeronaves de sus características), lo que supondría un gasto de 318 €/h.
- Coste del vuelo real: el coste de una hora de vuelo está asociado a los gastos que suponen las revisiones que ha de pasar una aeronave cada ciertas horas de vuelo. En base a ello, el coste de una hora de vuelo de NH-90 está estimado en 15.000 €.
- Coste del vuelo en simulador: los vuelos en simulador también poseen gastos asociados al empleo de la propia instalación y su mantenimiento. Dicho coste ha sido calculado mediante una estimación por analogía. El coste de una hora de vuelo Full Flight Simulator es de 1.900 €, siendo este el coste que ofertaba Francia a España para el empleo de su simulador NH-90 en el CFIA (Centre de Formation Interarmées, en español, Centro de Formación Interejércitos) de la ALAT (Aviation Légère de l'Armée de Terre, en español, Aviación Ligera del Ejército de Tierra) en Le Luc.

Analizando el Programa de Instrucción (ya que la transformación a CR-1 es parte de la instrucción de las unidades) de HT-29 proporcionado por el BHELMA III, las horas de transformación relacionadas con el sistema FBW y FCS serían las mostradas en la Tabla 7. Además, en dicha tabla se incluye el coste de la transformación a CR-1 teniendo en cuenta los anteriores costes.

Tabla 7. Distribución de carga de trabajo en horas y costes estimados de la formación en el ET. Fuente: Plan de Instrucción del BHELMA III y elaboración propia

Tipos de sesiones	Horas totales	Horas FCS	Horas FCS respecto al total	Costes totales	Costes FCS
Sesiones Teóricas	83,0	8,0	9,6%	-	-
Sesiones Part Task Trainer	30,0	22,0	73,3%	-	-
Sesiones Simulador	25,0	4,0	16,0%	47.500€	7.600€
Sesiones Vuelo Real	28,0	6,5	23,2%	428.904€	99.567€
TOTAL DE LA TRANSFORMACIÓN	166,0	40,5	24,4%	476.404€	107.167€

4.1.2.1.2 Formación en Airbus

Los primeros pilotos de la aeronave tuvieron la necesidad de ser formados en la industria Airbus. El coste de dicha formación será analizado con la documentación aportada por la DGAM, la cual consiste en una oferta realizada por Airbus al Ejército del Aire en marzo de 2019 para la cualificación de pilotos de NH-90. Se tomarán en cuenta los datos referentes a la formación Type Rating (formación en el tipo de la aeronave, análogo a la “transformación” anteriormente mencionada).

En lo que respecta la estructura del curso, se encuentra dividida en módulos teóricos, de simulador y de vuelo, con la duración mostrada en la Tabla 8. Sin embargo, si se realiza una



transformación de una aeronave con un sistema de control convencional a un sistema FBW, el piloto tan solo necesitaría ser formado en el nuevo sistema. Por ello, utilizando una estimación paramétrica y teniendo como referencia el Programa de Instrucción de HT-29 del BHELMA III se tendrían los siguientes resultados (Tabla 8):

Tabla 8. Distribución de carga de trabajo en horas. Fuente: presupuesto de Airbus a la DGAM y elaboración propia

Tipo de sesiones	Horas totales	Horas FCS	Horas FCS respecto al total
Sesiones Teóricas	150,0	14,5	9,6%
Sesiones Simulador	32,5	5,2	16,0%
Sesiones Vuelo Real	14,0	3,3	23,2%
TOTAL DEL CURSO	196,5	22,9	11,6%

El precio ofertado por Airbus para la formación Type Rating de NH-90 para 5 alumnos de teoría y 2 de simulador y vuelos (parte más cara de la formación) es de 361.600 €, siendo el precio por alumno adicional de 146.687,50€. Observando el resto de precios por alumno adicional de la oferta y aplicando métodos estadísticos, se ha podido determinar que la industria aplica un descuento de entre el 22%-15%.

El precio unitario será el resultado de dividir entre dos (despreciando los 3 alumnos extra en la fase teórica respecto a la fase de vuelo) el precio total, ya que da como resultado una suma de 180.800€, a lo que si aplicamos el descuento que ofrece la industria por un nuevo alumno entra dentro de los límites obtenidos aplicando una estimación por 3 puntos (Análisis PERT, siglas en inglés de Program Evaluation and Review Techniques), el cual sigue una distribución Beta (intervalo de confianza del 95%). Se ha empleado la siguiente ecuación:

$$\text{Precio medio} = \frac{O+4M+P}{6} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\text{Desviación típica} = \frac{P-O}{6} \quad (\text{Eq. 2})$$

Se han considerado los siguientes valores para el cálculo:

- Valor más probable (M): descuento del 18,5%
- Valor optimista (O): descuento del 22%
- Valor pesimista (P): descuento del 15%
- Precio unitario: 180.800 €

El valor medio del precio obtenido tras aplicar la Eq. 1 ha sido de 147.352 €, mientras que la desviación típica hallada empleando la Eq. 2 ha sido de 2.109,33€. Esto hace que el rango del precio sea de entre 145.242,67 € y 149.461,33 €

La formación tendrá lugar en las instalaciones de Airbus Helicopters Albacete, exceptuando el simulador, que sería en la Base Aérea de Agoncillo. Esto supondría también un gasto de manutención, alojamiento y desplazamiento. Aplicando una estimación paramétrica y análisis por analogía se tiene que, para una duración de 5 semanas (según el presupuesto que Airbus ofertó a la DGAM), con un coste diario de 65,97 €, el coste total de esta formación asciende a 2308,95 €.

Como es lógico, los costes también se ven afectados por la reducción de tiempo en la formación (formación completa frente a formación en el sistema FCS). Procediendo de la misma forma que para el cálculo del coste en tiempo (aplicar el porcentaje correspondiente) se obtiene



el siguiente resultado (Tabla 9):

Tabla 9. Costes estimados de la formación FBW en Airbus. Fuente: presupuesto de Airbus a la DGAM y elaboración propia

Costes	Precio Unitario Estimado	Gasto Estimado Manutención	Gasto Estimado Locomoción
Máximo	17.427,19 €	269,22 €	291,7 €
Media	17.181,24 €	269,22 €	270,85 €
Mínimo	16.935,30 €	269,22 €	250 €

4.1.2.2 Curso de Piloto Instructor de HT-29/NH-90

4.1.2.2.1 Formación en el Ejército de Tierra

Tras una correcta formación de los primeros instructores en la industria, el ET sería capaz de llevar a cabo su propio curso de piloto instructor (adecuado a los estándares de la enseñanza militar). Mediante la información proporcionada por la ACAVIET, se han obtenido los tiempos y costes económicos de dicha formación.

A diferencia de la transformación a CR-1, el curso de piloto instructor se realiza en diferentes lugares (ACAVIET y unidad de destino). Esto hace necesario añadir costes de dietas y locomoción. A continuación, se detallan todos estos costes:

- Dietas: la fase en la ACAVIET tiene una duración de una semana para todos los cursos de piloto instructor, en la que se imparte metodología de la enseñanza. El coste de una dieta completa es de 65,97 € al día, por lo que para los 5 días lectivos haría un total de 329,85 €.
- Locomoción: el coste de locomoción será el correspondiente al desplazamiento entre la ACAVIET y la unidad de destino. Para el cálculo de este coste se procederá de igual forma que en anteriores casos (análisis PERT). El coste de locomoción será de entre 250 € y 291,7 €.
- Coste de combustible: el combustible empleado es el JP-8. El coste de 1L de este combustible para el ejército de 0,53 €. El consumo medio del NH-90 es de 600 L/h (similar al de otras aeronaves de sus características), lo que supondría un gasto de $\frac{600 \text{ L}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{0,53 \text{ €}}{1 \text{ L}} = 318 \text{ €/h}$.
- Coste del vuelo real: el coste de una hora de vuelo está asociado a los gastos que suponen las revisiones que ha de pasar una aeronave cada ciertas horas de vuelo. En base a ello, el coste de una hora de vuelo de NH-90 está estimado en 15.000 €.
- Coste del vuelo en simulador: los vuelos en simulador también poseen gastos asociados al empleo de la propia instalación y su mantenimiento. Dicho coste es el presupuestado por Francia a España para el empleo de su simulador NH-90 en el CFIA (Centre de Formation Interarmées, en español, Centro de Formación Interejércitos) de la ALAT (Aviation Légère de l'Armée de Terre, en español, Aviación Ligera del Ejército de Tierra) en Le Luc. El susodicho coste asciende a 1.900 € por cada hora de vuelo.

A continuación, en la Tabla 10, se desglosa la estructura del curso completo y la parte correspondiente al sistema FCS, así como el tiempo necesario para superar cada fase. Además, se incluye el coste del curso de piloto instructor teniendo en cuenta los anteriores costes de formación:



Tabla 10. Distribución de carga de trabajo en horas y costes estimados de la formación en el ET. Fuente: Guía Docente Curso de Piloto Instructor HT-29 ACAVIET y elaboración propia

Tipo de sesiones	Horas totales	Horas FCS	Horas FCS respecto al total	Costes totales	Costes FCS
Sesiones Teóricas	135,0	23,7	17,6%	600,7 € ⁸	600,7 €
Módulo de Normalización Vuelo Diurno	8,5	2,5	29,4%	130.203,0 €	38.295,0 €
Módulo de Métodos de Instrucción Vuelo Diurno	14,5	5	34,5%	222.111,0 €	76.590,0 €
Módulo de Normalización Vuelo Nocturno	12,0	1,5	12,5%	183.816,0 €	22.977,0 €
Módulo de Métodos de Instrucción Vuelo Nocturno	12,0	-	-	183.816,0 €	-
Módulo de Normalización Vuelo en Simulador	16,0	3,0	18,8%	30.400,0 €	5.700,0 €
TOTAL DEL CURSO	198,0	35,7	18,0%	750.946,7 €	144.162,7 €

4.1.2.2.1 Formación en Airbus

Al igual que con el curso Type Rating, los primeros pilotos instructores tuvieron la necesidad de ser formados en la industria Airbus. El coste de dicha formación también será analizado con la documentación aportada por la DGAM. Se tomarán en cuenta los datos referentes a la formación de Piloto Instructor.

En lo que respecta la estructura del curso, es mucho más simple que la del curso Type Rating. Se encuentra dividida en un módulo de simulador y otro de vuelo, con la siguiente duración (Tabla 11):

Tabla 11. Distribución de carga de trabajo en horas. Fuente: presupuesto de Airbus a la DGAM y elaboración propia

Tipo de sesiones	Horas
Sesiones de Simulador	5,0
Sesiones Vuelo Real	6,0
TOTAL DEL CURSO	11,0

El precio que la industria indica a la DGAM para dos alumnos es de 89.880€, por lo que el precio unitario del curso sería de 44.940 €. El curso se desarrolla en las instalaciones de Airbus Helicopters en Albacete, por lo que los gastos de manutención y locomoción han sido calculados con una estimación por analogía, y estimación paramétrica. La dieta completa para un día asciende a 65,97 €, contando que las 11 horas se impartan en una semana (5 días lectivos), el precio sería de 329,85 € y un gasto por locomoción de entre 250 € y 291,7 €.

Considerando que la correcta formación de los primeros pilotos instructores por parte de la industria es un pilar fundamental, y que la formación de éstos es de 11 h, se ha considerado conveniente no ajustarlo a los porcentajes de formación exclusiva en el sistema FCS. Por lo tanto, los costes serían los anteriormente mostrados.

⁸ El coste de las sesiones teóricas es el coste de los 5 días de dietas más la media del gasto en locomoción. El coste total de las sesiones teóricas coincide con el coste en el sistema FCS, ya que todos los instructores tienen que cursar metodología de la enseñanza.



4.1.3 Costes de transformación de la flota al sistema FBW

El coste de la transformación se puede desglosar en: coste de los componentes necesarios, cableado, buses de datos, mano de obra, stock de seguridad (stock que se tiene para hacer frente a posibles fallos y necesidad de cambiar un componente) y costes asociados a estudios, cálculos y pruebas del fabricante.

4.1.3.1 Costes de componentes FBW

A continuación, se detalla el coste de los componentes del sistema FBW del NH-90 en la Tabla 12, obtenidos a través de la aplicación informática de gestión logística SIGLE, los cuales son usados en otros helicópteros con este sistema, tal y como se muestra en el estado del arte. El coste total presupuestado supone el coste de los componentes FBW que debe equipar, como mínimo, una aeronave de ala rotatoria FBW.

Tabla 12. Coste de componentes FBW del NH-90. Fuente: SIGLE y elaboración propia

Componente	Unidades	Coste unitario	Coste total
Flight Control System Auxiliar Unit	1	40.940,5 €	40.940,5 €
Inertial Reference System	2	330.287,4 €	660.574,7 €
Inceptor Transducer Unit	8	7.640,0 €	61.119,8 €
Grip Mando de Vuelo	2	10.000,0 €	20.000,0 €
Flight Control System PCCP	2	20.398,3 €	40.796,6 €
Flight Control Computer	2	275.631,8 €	551.263,6 €
Actuator Control Computer	2	392.686,0 €	785.372,0 €
Pitch Trim Unit	1	28.084,8 €	28.084,8 €
Roll Trim Unit	1	28.087,8 €	28.087,8 €
Yaw Trim Unit	1	28.035,3 €	28.035,3 €
COSTE TOTAL			2.244.275,1 €

Para calcular el stock de seguridad se necesitan datos como el coste del pedido, demanda promedio, cantidad a comprar, coste de manejo del inventario, etc. Sin embargo, no se ha podido acceder a estos datos.

Si se tuvieran, se podría calcular el stock de seguridad de forma exacta, así como la cantidad de repuestos que habría que pedir y cuándo pedirlos. Sería posible empleando el MRP (Material Requirements Planning) y estrategias Pull/Push, tal y como ha sido aprendido en la asignatura de Logística durante el grado.

4.1.3.2 Estudio de ingeniería y otros costes

El sistema FBW aplicado a helicópteros es aún un tema muy novedoso, más aún la transformación de un sistema de control de vuelo convencional a uno FBW. Por ello, hay costes que han sido imposibles de estimar, ya que no se disponen de datos anteriores o son imposibles de obtener (por ejemplo, del Black Hawk del Ejército de Tierra de los Estados Unidos).

Sin embargo, se ha podido estimar el coste del estudio de ingeniería previo necesario para poder llevar a cabo la transformación. Dicha estimación ha sido posible tras una entrevista con un ingeniero consultor de Capgemini Engineering, el cuál ha facilitado los datos necesarios y las claves para poder llevar a cabo una estimación por analogía. Para llegar al resultado han sido empleados dos proyectos:

- Proyecto 1: Dotación de sistemas de defensa electrónica para helicópteros NH-90



españoles. El coste de la implementación de estos sistemas de aviónica asciende a 111 millones de euros y 7 años para 23 helicópteros.

- Proyecto 2: Implementación de radares y sistemas de aviónica en Eurofighters alemanes. Este proyecto tiene un coste de 100 millones de euros para 38 aeronaves.

Como en todo proyecto, se tienen dos tipos de costes: costes fijos y costes variables. En estos casos el coste fijo (ingeniería eléctrica, diseño, cálculo estructural, etc.) suele suponer un 30%, mientras que el coste variable (fabricación, test, montajes, etc.) asciende a un 70%.

Los costes fijos se calcularían de la siguiente forma:

$$CF = \text{Precio Proyecto} \cdot 0,3 \text{ (Eq. 3)}$$

Los costes variables se calcularían de la siguiente forma:

$$CV = \frac{\text{Precio Proyecto} \cdot 0,7}{\text{Número de aeronaves}} \text{ (Eq. 4)}$$

Aplicando las anteriores ecuaciones (Eq. 3 y Eq. 4) se han podido estimar los costes fijos y variables de los anteriores proyectos de ingeniería. A continuación, se muestra el resultado en la Tabla 13.

Tabla 13. Estimación de los costes fijos y variables de los proyectos de ingeniería

Proyecto	Coste fijo, M€	Coste variable M€/unidad	Coste total, M€
Proyecto 1	33,3	3,4	111,0
Proyecto 2	30,0	1,8	100,0

Tras realizar un estudio para determinar qué aeronaves se modernizarían (ver apartado 4.3), se ha llegado a la conclusión de modernizar el CH-47 Chinook, EC-665 Tigre y el EC-135 Echo-Charlie. Al tratarse de aeronaves muy diferentes pueden llegarse a considerar 3 proyectos diferentes, por lo que se ha optado por emplear un factor complejidad (en base a la experiencia del ingeniero consultor):

- Chinook: factor de complejidad 1,2. Total de 17 unidades
- Tigre: factor de complejidad 1. Total de 18 unidades (HAD, Helicóptero de Ataque y Destrucción)
- EC-135: factor de complejidad 0,8. Total de 16 unidades (12 ACAVIET y 4 Batallón de Helicópteros de Emergencia)

El coste total de cada flota se puede estimar aplicando el factor de complejidad y número de unidades a los costes de cada uno de los proyectos indicados en la Tabla 13. Los resultados se presentan en la Tabla 14. Un ejemplo del cálculo para la flota de Chinook es mostrado a continuación:

$$CT_1 = (33,3 + (3,38 \cdot 17)) \cdot 1,2 = 108,91 \text{ M€}$$

$$CT_2 = (30 + (1,84 \cdot 17)) \cdot 1,2 = 73,54 \text{ M€}$$



Tabla 14. Costes de implementación del proyecto

Aeronave	Coste total 1, M€	Coste total 2, M€	Coste promedio, M€
Chinook	108,9	73,5	91,2
Tigre	94,1	63,1	78,6
EC 135	69,9	47,6	58,7

Tras los cálculos pertinentes se ha obtenido un valor máximo, un valor mínimo y un valor promedio para el estudio de cada modelo de helicóptero. Además, el tiempo estimado de duración del proyecto es de entre 3 y 7 años.

4.2 ANÁLISIS TÉCNICO DE LA IMPLEMENTACIÓN

De igual forma que ocurría con el análisis de costes, existen numerosos problemas para obtener la información necesaria para el correcto desarrollo del proyecto. Como es bien sabido, el Ejército de EEUU guarda escrupulosamente sus progresos y avances, sobre todo en materia aeroespacial. Por ello, resulta prácticamente imposible obtener información acerca del proyecto que han llevado a cabo modernizando sus tan conocidos UH-60 Black Hawk.

Sin embargo, se tiene información de numerosas fuentes (revistas, periódicos, etc.) sobre el éxito que ha tenido Sikorsky (empresa desarrolladora del Black Hawk) en la implementación del sistema FBW en sus aeronaves. Además, la compañía estadounidense ha conseguido instalar un software para convertirlo en un OPV. De esta forma, se espera aumentar la vida útil de este icónico helicóptero, el cuál ha comenzado a ser sustituido por otros modelos más modernos en algunas unidades del ejército americano (SPORT.es, 2020).

Por otra parte, se ha remodelado el cockpit (cabina), al igual que se está haciendo con el CH-47 Chinook del ET. Esto supone que, tras el cambio de un sistema convencional a uno FBW, no existiría problema alguno en adaptar la cabina a la interfaz digital propia de dicho sistema.

4.3 GESTIÓN DE INTERESADOS

En cualquier proyecto es de vital importancia saber gestionar los intereses de todo aquel que va a resultar afectado directa o indirectamente por las decisiones tomadas. Sin embargo, no hay que tratar a todo el mundo por igual. Para ello, seguiremos la siguiente matriz (Figura 9):

PODER	A L T O	Mantener satisfecho	Gestionar de cerca (Ministerio de Defensa, Ejército de Tierra, etc.)
	B A J O	Monitorizar	Mantener informado (pilotos, mecánicos, etc.)
		BAJO	ALTO
		INTERÉS	

Figura 9. Matriz de gestión de interesados. Fuente: elaboración propia



En dicha matriz podemos observar 4 grupos bien diferenciados según nivel de poder e interés. El grupo más importante es el de color verde, el cual posee un alto interés y poder. En este grupo se puede incluir al Ministerio de Defensa, Ejército de Tierra (incluso Ejército del Aire y Armada), Airbus Helicopters y otras empresas que participen en el proyecto. Es de suma importancia mantener informado con gran detalle, administrar desde cerca y con mimo a este grupo para que el proyecto pueda prosperar. En caso de que el proyecto se llevase a cabo, se debería presentar el calendario con los hitos y fechas al detalle a todos ellos, entre otros documentos de interés.

Otro grupo importante es el de color azul, el cual posee un gran interés, pero carece de poder. En este grupo se encuadrarían los pilotos, mecánicos, etc. A los integrantes de este grupo se les debe mantener informados. Para ello, se empleará el método de encuestas, anteriormente descrito en el capítulo de metodología. De esta forma, se informará de una eventual transformación al sistema FBW de algunas de las aeronaves del ET. Además, se recopilará una información fundamental para el grupo de color verde (gran interés y poder), como la opinión del personal que vivirá en primera persona los cambios que ocasione el proyecto.

A todo el personal que tenga un alto poder y un bajo interés se le debe mantener satisfecho. Por último, existe un grupo sin poder ni interés, como bien puede ser cualquier persona que no esté interesada en el mundo aeronáutico. A este grupo simplemente se le debe monitorizar, por si cambiase su interés o poder.

4.3.1 Resultados de las encuestas a pilotos

La encuesta realizada consta de 18 preguntas, de las cuales 2 son de respuesta abierta, 10 de respuesta única y 6 de respuesta múltiple. Dicha encuesta se difundió a pilotos de la ACAVIET, BHELMA III y Ala 48, entre otros. Han respondido 18 pilotos, de los cuales 16 han pertenecido al BHELMA III. Las preguntas de la encuesta se encuentran en el Anexo B.

El 93,8% de los pilotos encuestados aseguran que un sistema de control de vuelo FBW es superior a un sistema de control de vuelo convencional. Además, el 40% de éstos considera insuficientes los modos de misión que actualmente posee el NH-90. En relación a esto se les preguntó qué modos de misión implementarían (respuesta abierta), siendo la respuesta unánime: aterrizaje automático llegando hasta el suelo (0 ft).

Por otra parte, el 75% considera que la formación en esta aeronave FBW tiene una complejidad y duración mayor que en otra aeronave no FBW. También, el mismo porcentaje de encuestados afirma que sería de gran utilidad emplear aeronaves de escolta tipo wingman de apoyo a helicópteros de maniobra y transporte. De igual forma, un 68,8% cree que podría ser útil en un helicóptero de maniobra implementar un modo de misión como el retorno automático a una base en caso de emergencia.

4.3.2 Resultados de las encuestas a personal de mantenimiento

La encuesta realizada consta de 27 preguntas, de las cuales 2 fueron de respuesta múltiple y el resto de respuesta única. Dicha encuesta se difundió al personal de mantenimiento del BHELMA III y Ala 48. Han respondido un total de 15 personal. Las preguntas de la encuesta se encuentran en el Anexo A.

Las encuestas realizadas al personal de mantenimiento de NH-90 del BHELMA III y Ala 48 revelan que esta aeronave necesita un mayor mantenimiento preventivo (72,7% de los encuestados lo afirman en el BHELMA III y 50% en el Ala 48).

En el caso del mantenimiento correctivo, los encuestados del BHELMA III han reflejado en su mayoría que otros helicópteros necesitan un mayor tiempo de este mantenimiento, o bien,



afirman que necesitan el mismo. Sin embargo, el 50% del personal de mantenimiento del Ala 48 encuestado ha respondido que “otros helicópteros necesitan de un mayor mantenimiento correctivo”, mientras que el otro 50% se ha abstenido de responder debido a falta de experiencia en NH-90 para comparar.

En lo que respecta a la reestructuración del BHELMA III durante la fase de recepción del NH-90, el 100% de los encuestados ha respondido que “Sí” han sufrido alguna reestructuración los equipos de mantenimiento. La reestructuración de los equipos de mantenimiento ha sido la siguiente, según el personal encuestado (Figura 10):

¿Cómo fue la reestructuración de los equipos de mantenimiento?



Figura 10. Distribución de respuestas respecto a la reestructuración de equipos de mantenimiento de NH-90. Fuente: elaboración propia.

Gracias a encuestas de este tipo se puede prever una eventual migración de personal hacia oficinas de documentación (dentro de la oficina de control de calidad de la propia UTM), un aumento del número de inspectores técnicos y la necesidad de contratación de servicio técnico de la industria (apoyo “On Site”), al menos durante los primeros años.

4.4 DECISIÓN DE AERONAVES A MODERNIZAR

Un factor crítico es la correcta decisión de qué helicópteros se modernizarán en caso de poder llevar a cabo el proyecto. Para ello, se emplearán los métodos descritos en el apartado de metodología.

Primeramente, mediante un brainstorming (tormenta de ideas) se han determinado una serie de atributos que se creen fundamentales en aeronaves de ala rotatoria del Ejército de Tierra. Tras ello, se ha realizado una encuesta a pilotos muy experimentados (en su mayoría pilotos instructores y pilotos de ensayos) para que estipulasen cuáles eran los más importantes de todos los seleccionados en el brainstorming. El resultado de la encuesta fue el siguiente (Figura 11):

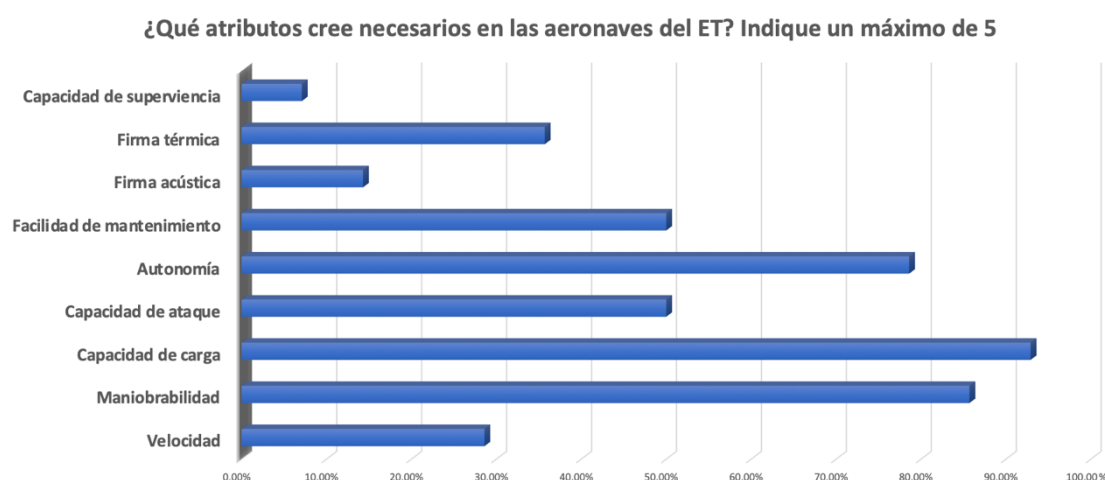


Figura 11. Distribución de respuestas respecto a los atributos necesarios en helicópteros del ET. Fuente: elaboración propia.

En base al resultado obtenido se han seleccionado los atributos de: capacidad de carga, maniobrabilidad, autonomía, capacidad de ataque y facilidad de mantenimiento.

Para tomar la decisión de cuáles aeronaves elegir se ha empleado el método AHP. Para llevarlo a cabo se necesitan primeramente los criterios a comparar, los cuales ya se tienen. También se necesitan las alternativas a elegir, en este caso, los helicópteros no FBW de la flota del ET (EC-135, Tigre, Chinook, Súper Puma y Cougar, exceptuando el Augusta-Bell 212).

La primera etapa del proceso analítico jerárquico (AHP) consiste en evaluar a los criterios entre sí, realizando una matriz comparativa. Para llevarla a cabo se han tenido en cuenta los valores aportados en la encuesta. La escala empleada durante todo el proceso ha sido la de Thomas Saaty, creador de este método. La escala en cuestión va del 1 al 9, siendo 1 un criterio de igual importancia y 9 un criterio de importancia extrema frente al comparado. Preferentemente se emplearán los valores 1, 3, 5, 7 y 9, aunque se pueden usar los intermedios entre los anteriores cuando es necesario matizar. Tras realizar la matriz comparativa se necesita hallar la ponderación de cada criterio (pesos). Para ello obtiene una matriz normalizada (valor de cada celda dividido entre el total de su columna) y se obtiene el promedio de cada fila. Además, para determinar si la ponderación ha sido razonable se calcula un índice de consistencia. Si el valor de dicho índice es inferior a 0,1 se considera que la ponderación es razonable y apta para continuar el proceso. A continuación, es mostrado el resultado de esta primera etapa (Tabla 15):

Tabla 15. Resultado de la primera etapa del método AHP. Fuente: elaboración propia

Criterios	Capacidad de carga	Autonomía	Maniobrabilidad	Facilidad de mantenimiento	Capacidad de ataque	Pesos	RI
Capacidad de carga	1	3	3	7	8	0,45	0,0569
Autonomía	1/3	1	1/3	5	3	0,17	
Maniobrabilidad	1/3	3	1	5	3	0,25	
Facilidad de mantenimiento	1/7	1/5	1/5	1	1	0,05	
Capacidad de ataque	1/5	1/3	1/3	1	1	0,07	



Como se puede observar, el criterio más importante es la capacidad de carga, seguida por la maniobrabilidad, autonomía, capacidad de ataque y facilidad de mantenimiento, tal y como manifestó el personal encuestado. Además, el coeficiente de consistencia muestra que la ponderación es correcta y no existen inconsistencias.

Durante la segunda etapa del proceso se comparan las alternativas (en este caso helicópteros) en base a cada criterio. Por ejemplo, primeramente, se analizan las aeronaves con respecto a la capacidad de carga. Para ello se realiza una matriz de comparación similar a la del anterior paso. De igual forma, se calculan los pesos y se obtiene el coeficiente de consistencia para mostrar si se ha ponderado razonablemente. A modo de ejemplo se muestra esta primera matriz (Tabla 16), el resto se encuentra en el Anexo D.

Tabla 16. Muestra de matriz AHP de la segunda etapa. Fuente: elaboración propia

Capacidad de carga	EC135	Chinook	Tigre	Super Puma	Cougar	Pesos	RI
EC135	1	1/9	1	1/5	1/3	0,05	0,0566
Chinook	9	1	9	5	5	0,56	
Tigre	1	1/9	1	1/7	1/7	0,04	
Super Puma	5	1/5	7	1	1	0,19	
Cougar	3	1/5	7	1	1	0,17	

En este caso, el resultado de la comparación de los diferentes candidatos a la transformación FBW entre sí en base a la capacidad de carga, da como resultado: Chinook, Súper Puma, Cougar, EC-135 y Tigre. Resultado lógico y esperado, además de haber sido ponderado de forma lógica según el valor del índice de consistencia.

Por último, en la última etapa del proceso de decisión, se ha creado una matriz que relaciona los pesos de cada criterio con los pesos obtenidos de cada helicóptero en relación con los criterios en la anterior fase. De esta forma, se obtiene un último coeficiente que muestra cuáles son los más aptos para la transformación según los criterios que hemos establecido. A continuación, se muestra dicho resultado (Tabla 17):



Tabla 17. Resultado de la tercera etapa del método AHP. Fuente: elaboración propia

Criterios	Pesos	EC135	Chinook	Tigre	Super Puma	Cougar
Capacidad de carga	0,45	0,05	0,56	0,04	0,19	0,17
Autonomía	0,17	0,26	0,08	0,54	0,07	0,06
Maniobrabilidad	0,25	0,11	0,53	0,14	0,09	0,13
Facilidad de mantenimiento	0,05	0,62	0,16	0,11	0,05	0,05
Capacidad de ataque	0,07	0,15	0,15	0,6	0,05	0,05
Resultado final		0,14	0,42	0,19	0,13	0,12

En base a los resultados obtenidos tras finalizar el proceso, se puede determinar que los helicópteros más aptos para transformación al sistema FBW seguirían el siguiente orden:

- Chinook
- Tigre
- EC-135
- Súper Puma
- Cougar

Además, los resultados coinciden en su mayoría con una de las preguntas realizadas a pilotos de NH-90, en la cual se preguntaba que, en caso de una eventual transformación de la flota, qué helicópteros elegirían. El resultado de esta pregunta de elección múltiple fue: 60% para Tigre y EC-135 y 40% para Chinook y Cougar.

En base a los resultados de los métodos empleados se puede determinar que, las aeronaves de ala rotatoria que serían seleccionadas para una eventual transformación de la flota al sistema FBW serían: Chinook, Tigre y EC-135.

4.5 ESTUDIO DE OBJETIVOS SECUNDARIOS

Tras analizar la posibilidad y viabilidad de implementación de un sistema FBW en un helicóptero con un sistema convencional, se tratará de dar respuesta a los objetivos secundarios del proyecto.

Primeramente, se comenzará con el más ambicioso, estudiar la posibilidad de pilotaje remoto y posibilidad de empleo como wingman (debido a la tecnología FBW). De igual forma que ocurría con el estudio de la viabilidad técnica, se tiene un acceso reducido a la información en este ámbito. Sin embargo, la evidencia demuestra que “la tecnología actual permite monitorizar aeronaves en remoto” (RTVE, citado en gtd, 2010), ya que los sistemas de control electrónicos (como el FBW) permiten manejarlas a distancia.

Además, Estados Unidos está llevando a cabo proyectos como el FARA y Skyborg, al igual que Europa desarrolla el FCAS, aunque estos programas tratan de aeronaves completamente autónomas. Esto hace que la posibilidad de emplear una aeronave ya existente controlada por



un humano remotamente en lugar de hacerlo con un ordenador previamente programado aumenta considerablemente.

La posibilidad de que los helicópteros puedan ser pilotados de forma remota implica aumentar las capacidades tácticas, ya no solo por la posibilidad de emplearlos como wingman, sino por poder aumentar su autonomía al sustituir el espacio que ocupan los pilotos por depósitos de combustible, aumentar su capacidad de carga al eliminar el peso de la tripulación, poder operar en teatros más demandantes, etc.

Por otra parte, es un hecho que las aeronaves con sistema FBW permiten implementar modos de misión de forma mucho más sencilla que en un sistema convencional. Esto se debe a la posibilidad de poder probar el nuevo software en simuladores, ya que la transmisión de datos e inputs es igual que en la aeronave física y real. Para demostrar esto, solo habría que mirar a las Fuerzas Armadas francesas, las cuales han implementado el modo de toma hasta el suelo (modo de misión altamente demandado por nuestros pilotos de HT-29 según las encuestas realizadas) en sus NH-90 tras las experiencias vividas en Mali.

Otro modo de misión que podría ser implementado (de forma más segura, rápida y sencilla que en un helicóptero con sistema de control de vuelo convencional) y que mejoraría las capacidades tácticas de la flota de helicópteros de la AVIET es un modo de superación automática de obstáculos. Actualmente, los NH-90 del ET poseen una preinstalación del sistema OWS (Obstacle Warning System), aunque los de la Luftwaffe alemana sí lo tienen operativo. Sin embargo, este sistema tan solo detecta los obstáculos (como cables, potencialmente peligrosos en vuelos a baja y muy baja cota) y nos avisa mediante una señal acústica (tono de alarma) y otra visual (luz de aviso). En un helicóptero con el sistema FBW se podría, como acaba de ser mencionado al principio de este párrafo, implementar de forma mucho más simple y segura un modo que emplease el sistema OWS para poder esquivar o rebasar estos obstáculos, bien de forma automática (el helicóptero detecta el obstáculo, avisa y lo esquiva) o bien de forma semiautomática (el helicóptero detecta el obstáculo, avisa y espera el permiso para efectuar la maniobra).

Sin embargo, la reducción de la carga de trabajo también se ve beneficiada por la comodidad de la cabina, permitiendo adaptar la sensibilidad de los controles de forma electrónica, implementando nuevos modos de misión como ya ha sido comentado e incluyendo pilotos automáticos de cuatro ejes de forma mucho más sencilla que en aeronaves con sistemas convencionales, simplificando la labor de la tripulación. Por ejemplo, se tiene la posibilidad de seleccionar distintos modos de pilotaje manual, adaptables a cada tipo de situación. En el caso del NH-90 existen 3:

- Modo ATT (Attitude): la selección de este modo permite mantener la actitud del helicóptero en una posición determinada. Si actuamos sobre el control cíclico, volverá a la posición establecida al cesar la fuerza ejercida por el piloto. Puede ser de utilidad en vuelos de crucero.
- Modo TAC (Tactical): la selección de este modo permite actuar sobre el control cíclico sin ninguna restricción y, al cesar la fuerza ejercida, memorizará esa posición hasta volver a actuar sobre el. Puede ser de utilidad en vuelo táctico.
- Modo SCAS (Stability Control and Augmentation System)

De igual forma, la carga de trabajo se reduce significativamente en la preparación del vuelo y misión. Esto se debe a la presencia de los diferentes modos automáticos y de misión, los cuales permiten preparar y ejecutar misiones más complejas y en menos tiempo.



4.6 COMPARACIÓN DE MODELOS SIMILARES

En este apartado se realizará una breve comparación de helicópteros con sistema convencional frente a un modelo FBW similar en dimensiones, peso y empleo. Para llevar a cabo esta comparación, se empleará la Tabla 18.

Tabla 18. Comparación de un helicóptero FBW frente a otros modelos similares convencionales. Fuente: elaboración propia

	Tripulación	Capacidad (pax)	Techo (ft)	Velocidad máxima (kt)	Velocidad de crucero (kt)	Precio (M€)	MTOW (kg)	Alcance (nm)
FBW								
Bell 525	1 o 2	16-20*	20.000**	165	155	13.7	9.300	560
NO FBW								
AW 189	1 o 2	16-20*	10.000	169	144	14	8.000	200-430
EC 175	2	16-20*	18.000	170	160	14.6	7.800	680
AW 139	1 o 2	15*	20.000	167	165	12	7.000	659

* o carga equivalente.

** 12.000 HIGE, 6.000 HOGE.

Como se puede observar, las prestaciones de los diferentes modelos son bastante parecidas. Todos los modelos, excepto el EC 175, pueden ser pilotados por una persona (cumpliendo ciertas condiciones). La capacidad es bastante similar, aunque se destaca en este caso el Bell 525, junto con sus más de 1000 kg de MTOW por encima del modelo con sistema convencional con mayor MTOW.

El techo máximo es el habitual para aeronaves de ala rotatoria, aunque se destaca el AW 189, en este caso para mal. Las velocidades máximas y de crucero también son muy similares y habituales en este tipo de aeronaves. Los alcances son óptimos, aunque de nuevo, el AW 189 se destaca para mal, siendo muy inferior al resto.

Tras esta pequeña comparación se puede concluir que, dentro de un mismo grupo de helicópteros con características similares (peso, dimensiones, etc.), uno que posea el sistema FBW tendrá un peso máximo al despegue mayor que el resto. Esto es debido a la reducción de peso que experimentan estos modelos al no tener tantas partes mecánicas y varillaje y su aprovechamiento en motores más potentes (generalmente más pesados).

Por otro lado, la empresa Bell (2019) indica en su web lo siguiente a cerca del coste de mantenimiento del 525: "el costo de mantenimiento más bajo por hora de vuelo de su clase". Además, también tratan de mostrar al cliente otros beneficios de esta moderna aeronave FBW, como puede ser la reducción de la carga de trabajo:

Simplicidad en la carga de trabajo del piloto. Emprenda sus misiones más difíciles con total seguridad. La primera aeronave comercial con sistema electrónico de triple redundancia del mundo con un altísimo nivel de respuesta y estabilidad de última generación para que pueda volar con total seguridad y un mínimo estrés.



5. CONCLUSIONES

El principal objetivo de este estudio residía en analizar la viabilidad y posibilidad de la implementación de sistemas de control de vuelo FBW en aeronaves del ET con sistemas de control de vuelo convencional. A lo largo de esta memoria se han mostrado las herramientas y pasos seguidos para llegar a las siguientes conclusiones:

Ante la pregunta ¿es posible técnicamente realizar dicha modernización? La respuesta es clara: sí es posible. Esta afirmación está basada en la evidencia de que EEUU ha completado pruebas exitosas de la modernización de algunos de sus UH-60. La prueba más clara de que es posible realizar dicha modernización se encuentra en el nuevo CH-53K, el cual incluye sistema FBW, mientras que sus predecesores no. Incluso ha sido publicado un artículo del Oregon NASA Space Grant Consortium (Solem, 2011) mostrando los beneficios y ventajas de emplear la tecnología FBW en futuros modelos del UH-60 y otras aeronaves de ala rotatoria.

La segunda gran cuestión sería: ¿es viable económicamente realizar la modernización? La respuesta en este caso es más ambigua: depende. Depende del grado en que se quiera modernizar la flota de helicópteros del Ejército de Tierra, de mejorar sus capacidades en el campo de batalla actual y futuro, de aumentar la capacidad de supervivencia y reducir la carga de trabajo de las tripulaciones. Además de poder integrar nuevas capacidades como el pilotaje remoto y emplear aeronaves de ala rotatoria tipo wingman, así como mejorar la interoperabilidad en el futuro con ejércitos aliados que están implementando este sistema. Han sido recopilados una serie de datos relativos a los costes y tiempos de implementación del proyecto, aunque, lógicamente sería necesario un estudio más detallado de la mano de obra por parte de la industria para poder decidir firmemente sobre la viabilidad económica del proyecto.

En caso de llevar a cabo la modernización será imprescindible formar adecuadamente a todo el personal de mantenimiento y pilotos, haciendo hincapié en las áreas más necesarias (sobre todo aviónica). Esto resultaría en un posible aumento de la plantilla, conllevando así mayores costes de personal.

Además, sería interesante plantear la modernización de cara a comenzar a emplear estas aeronaves de forma remota, ya que presentan numerosas posibilidades de empleo, tal y como ha sido mostrado con los supuestos tácticos.

Por otra parte, el estudio se ha visto limitado por diversos factores, como han sido:

- Confidencialidad de documentación y datos del Ejército de los EEUU y de empresas como Airbus de cara a un correcto y detallado estudio técnico de la implementación. De cara a solucionar este problema se plantea la posibilidad de elevar una necesidad de información hacia escalones superiores de las Fuerzas Armadas, para, de esta forma, intentar conseguir documentación necesaria para futuros proyectos.
- Dificultad en la obtención de datos necesarios para un minucioso análisis económico. Por ejemplo, Airbus está llevando a cabo un proyecto similar (VERTEX), basado en dotar a diferentes aeronaves con sistemas FBW, así como de diferentes sensores y cámaras para lograr convertirlas en vehículos de conducción autónoma (Ávila, 2021). A través de este proyecto, del cual aún no se tienen datos de costes, se podría estimar de forma más exacta el coste de la implementación del sistema FBW.

Como planteamiento de trabajo futuro se propone intentar contactar con Airbus para realizar entrevistas a cerca de este nuevo proyecto, así como tratar de obtener algunos de los datos que han sido imposible de hallar o que han sido estimados (como el coste del estudio de ingeniería).



6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ávila, A. E. (2021). "Vuelos autónomos de helicópteros, el proyecto de Airbus". *Talent Republic*, 9 de agosto. Disponible en: <https://www.talent-republic.tv/iron/robots-drones/vuelos-autonomos-de-helicopteros-el-proyecto-de-airbus/> [Consultado 28-11-2021]
- Aviónica (2019). En: *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 31 de agosto. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Aviónica> [Consultado 11-07-2021]
- Bell (2019). Bell 525 Incesante. Disponible en: <https://es.bellflight.com/products/bell-525> [Consultado el 27/10/2021]
- Bell-Boeing V-22 Osprey (2021). En: *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 13 de enero. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Bell-Boeing_V-22_Osprey [Consultado 13-05-2021]
- Brownout. (2019). En: *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 31 de agosto. Disponible en: [https://en.wikipedia.org/wiki/Brownout_\(aeronautics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Brownout_(aeronautics)) [Consultado 13-05-2021]
- Carboni, W. (2009). *CH-53K Flight Control System*. Disponible en: https://www.acgsc.org/proceedings.php?agenda_id=569&mtg_id=20 [Consultado el 12/05/2021]
- Colitto, C. (2017). "El Factor Humano en Accidentes de Aviación". *Gurux*, 27 de diciembre. Disponible en: <https://www.elgurux.com/factor-humano-aviacion.html> [Consultado 20-05-2021]
- Currie Jr., T. P. (1999). *The CV-22 "Osprey" and the impact on air force combat search and rescue*. Informe de investigación enviado a la facultad en cumplimiento parcial de los requisitos de graduación. Air Command and Staff College, Air University. Disponible en: <https://man.fas.org/dod-101/sys/ac/docs/99-033.pdf> [Consultado 20-05-2021]
- Ejército de Tierra Español (2014). *Glosario de términos militares (PD0-000)*. Granada: MADOC
- Ejército de Tierra Español (2015). *Simbología militar terrestre: recopilación de signos convencionales en el ámbito terrestre (PD0-002)*. Granada: MADOC
- García Arteaga, O. (2013). *Guía y estrategia de aplicación para el inspector aeronáutico*. Trabajo Fin de Grado. Instituto Politécnico Nacional de México.
- González, I. (2021). "Los cazas sin piloto, más cerca: así es Skyborg, el santo grial del pilotaje autónomo". *El español*, 23 de mayo. Disponible en: https://www.elespanol.com/omicrono/tecnologia/20210523/cazas-sin-piloto-cerca-skyborg-pilotaje-autonomo/582942953_0.html [Consultado 29-06-2021]
- González, N. (2019). "AHP: un método para fortalecer la toma de decisiones en SST". *PrevenBlog*. [Blog]. 23 de abril. Disponible en: <https://prevencontrol.com/prevenblog/ahp-un-metodo-para-fortalecer-la-toma-de-decisiones-en-sst/> [Consultado 16-07-2021]
- gtd SYSTEM & SOFTWARE ENGINEERING (2010). gtd SYSTEM & SOFTWARE ENGINEERING. Disponible en: <https://www.gtd.es/es/blog/aviones-con-piloto-opcional> [Consultado 20-10-2021]
- ITAérea (2019). ITAérea, Mantenimiento Aeronáutico. Disponible en: <https://www.itaerea.es/mantenimiento-aeronautico> [Consultado 11-07-2021]
- Jean, G. (2011). "Army Slow To Adapt Fly-by-Wire Controls for Helicopters". *National Defense*, 4 de enero. Disponible en: <https://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2011/4/1/2011april-army-slow-to-adapt-flybywire-controls-for-helicopters> [Consultado 27-04-2021]
- MathWorks (2016). Bell Helicopter Develops World's First Commercial Fly-By-Wire Helicopter. Disponible en: https://www.mathworks.com/company/user_stories/bell-helicopter-develops-worlds-first-commercial-fly-by-wire-helicopter.html [Consultado 27-04-2021]



Navaro, J.M. (2021). "Entra en servicio la más moderna versión del Black Hawk". *defensa.com*, 18 de agosto. Disponible en: <https://www.defensa.com/otan-y-europa/entra-servicio-mas-moderna-version-black-hawk> [Consultado 21-10-2021]

Rucci, J. (2020). "Why the CH-53K is my favorite to fly". Lockheed Martin. Disponible en: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/news/features/2020/why-the-ch-53k-king-stallion-is-my-favorite-to-fly.html> [Consultado 23-06-2021]

Sampson, B. (2019). "Sikorsky flies Black Hawk with retrofit fly-by-wire kit". *Aerospace TESTING INTERNATIONAL*, 7 de junio. Disponible en: <https://www.aerospacetestinginternational.com/news/helicopters-rotorcraft/sikorsky-flies-black-hawk-with-retrofit-fly-by-wire-kit.html> [Consultado 27-04-2021]

Sancho, J. y Torralba, M. (2020). "Tema 2. Gestión de la integración". En: Centro Universitario de la Defensa (Coord.). Asignatura de Oficina de Proyectos. Zaragoza: CUD, pp. 23-28

Sikorsky CH-53K King Stallion (2021). En: *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 13 de abril. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Sikorsky_CH-53K_King_Stallion#Especificaciones_\(CH-53K\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Sikorsky_CH-53K_King_Stallion#Especificaciones_(CH-53K)) [Consultado 20-05-2021]

"Sikorsky se prepara para probar su nuevo Black Hawk autónomo". Anónimo (2020). *SPORT*, 25 de noviembre. Disponible en: <https://www.sport.es/es/noticias/tecnologia/sikorsky-prepara-para-probar-nuevo-black-hawk-autonomo-8220172> [Consultado 20-10-2021]

Solem, C. (2011). *Using Fly-By-Wire Technology in Future Models of the UH-60 and other Rotary Wing Aircraft*. Informe final de prácticas. Oregon NASA Space Grant Consortium. Disponible en: https://rotorcraft.arc.nasa.gov/Publications/files/891_Courtney%20Solem.pdf

Wingman (2021). En: *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 23 de julio. Disponible en: <https://en.wikipedia.org/wiki/Wingman> [Consultado 23-07-2021]

ANEXOS

Anexo A. Encuesta realizada a personal de mantenimiento

Encuestas a personal experto para la realización del Trabajo de Fin de Grado “Sistemas de control de vuelo Fly-by-wire”.

1. Dentro del mantenimiento de helicóptero, ¿cuál es su especialidad?
 - Aviónica y sistemas electrónicos de la aeronave
 - Mecánica
 - Otra
2. ¿Ejerce actualmente en un puesto que corresponda a su especialidad?
 - Si
 - No
3. ¿A qué unidades ha pertenecido usted? Incluya su unidad actual.
 - Cuartel General de las FAMET
 - Batallón de Cuartel General de las FAMET
 - BHELA I
 - BHELEME II
 - BHELMA III
 - BHELMA IV
 - BHELTRA V
 - BHELMA VI
 - Grupo Logístico de las FAMET
 - ACAVIET
 - PCMHEL
 - Otra
4. ¿Con qué helicópteros ha trabajado?
 - HA-28 Tigre
 - HU-21 Súper Puma
 - HT-27 Cougar
 - NH-90 Caimán
 - HT-17 Chinook
 - HE-26/HU-26 Eco-Charlie
 - HU-18 UH-1N (Augusta-Bell 212)
 - HU-10 UH-1H (Bell 205 desarrollo del UH-1 Iroquois)
 - Otro

5. Escriba de forma clara el tiempo de trabajo (aproximadamente) con cada helicóptero en AÑOS.
- RELLENAR CAMPO DE TEXTO
6. Indique de forma aproximada la duración de su formación en otro helicóptero que no sea el NH-90 dentro de la enseñanza de perfeccionamiento (curso). En caso de no haber trabajado con otro helicóptero, no marque ninguna respuesta. En la opción "Otra" indique del helicóptero que se trata.
- Menos de 1 mes
 - Entre 1 y 3 meses
 - Entre 3 y 6 meses
 - Entre 6 y 9 meses
 - Entre 9 meses y 1 año
 - Más de 1 año
 - Otra
7. Indique de forma aproximada la duración de su formación en otro helicóptero que no sea el NH-90 dentro de la unidad para alcanzar un grado de funcionamiento y autosuficiencia adecuado con la aeronave. En caso de no haber trabajado con otro helicóptero, no marque ninguna respuesta. En la opción "Otra" indique del helicóptero que se trata.
- Menos de 1 mes
 - Entre 1 y 3 meses
 - Entre 3 y 6 meses
 - Entre 6 y 9 meses
 - Entre 9 meses y 1 año
 - Más de 1 año
 - Otra
8. Indique de forma aproximada la duración de su formación en el NH-90 dentro de la enseñanza de perfeccionamiento (curso).
- Menos de 1 mes
 - Entre 1 y 3 meses
 - Entre 3 y 6 meses
 - Entre 6 y 9 meses
 - Entre 9 meses y 1 año
 - Más de 1 año
9. Indique de forma aproximada la duración de su formación en el NH-90 dentro de la unidad para alcanzar un grado de funcionamiento y autosuficiencia adecuado con la aeronave.
- Menos de 1 mes
 - Entre 1 y 3 meses

- Entre 3 y 6 meses
 - Entre 6 y 9 meses
 - Entre 9 meses y 1 año
 - Más de 1 año
10. En caso de haber recibido formación por parte de la industria (Airbus Helicopters), ¿qué duración aproximada duró dicha formación?
- No he recibido formación en la industria
 - Menos de 1 mes
 - Entre 1 y 3 meses
 - Entre 3 y 6 meses
 - Entre 6 y 9 meses
 - Entre 9 meses y 1 año
 - Más de 1 año
11. Responda a la pregunta solo en caso de haber trabajado previamente con otro helicóptero distinto al NH-90. ¿Qué helicóptero necesita de un mayor mantenimiento preventivo? En la opción “Otra” indique del helicóptero que se trata si ha seleccionado la opción de “Otros helicópteros”.
- El NH-90 necesita de un mayor mantenimiento preventivo
 - Otros helicópteros necesitan de un mayor mantenimiento preventivo
 - Ambos necesitan el mismo mantenimiento preventivo
 - Otro
12. Si en la pregunta anterior ha indicado que “El NH-90 necesita de un mayor mantenimiento preventivo”, responda a la pregunta. En caso contrario, no marque ninguna respuesta. ¿Qué porcentaje extra de mantenimiento preventivo necesita?
- Menos de un 10%
 - Entre un 10% y un 25%
 - Entre un 25% y un 50%
 - Entre un 50% y un 75%
 - Más de un 75%
13. Si en la pregunta anterior ha indicado que “Otros helicópteros necesitan de un mayor mantenimiento preventivo”, responda a la pregunta. En caso contrario, no marque ninguna respuesta. ¿Qué porcentaje extra de mantenimiento preventivo necesitan?
- Menos de un 10%
 - Entre un 10% y un 25%
 - Entre un 25% y un 50%
 - Entre un 50% y un 75%
 - Más de un 75%

14. Responda a la pregunta solo en caso de haber trabajado previamente con otro helicóptero distinto al NH-90. ¿Qué helicóptero necesita de un mayor mantenimiento correctivo? En la opción “Otra” indique del helicóptero que se trata si ha seleccionado la opción de “Otros helicópteros”.
- El NH-90 necesita de un mayor mantenimiento correctivo
 - Otros helicópteros necesitan de un mayor mantenimiento correctivo
 - Ambos necesitan el mismo mantenimiento correctivo
 - Otro
15. Si en la pregunta anterior ha indicado que “El NH-90 necesita de un mayor mantenimiento correctivo”, responda a la pregunta. En caso contrario, no marque ninguna respuesta. ¿Qué porcentaje extra de mantenimiento correctivo necesita?
- Menos de un 10%
 - Entre un 10% y un 25%
 - Entre un 25% y un 50%
 - Entre un 50% y un 75%
 - Más de un 75%
16. Si en la pregunta anterior ha indicado que “Otros helicópteros necesitan de un mayor mantenimiento correctivo”, responda a la pregunta. En caso contrario, no marque ninguna respuesta. ¿Qué porcentaje extra de mantenimiento correctivo necesita?
- Menos de un 10%
 - Entre un 10% y un 25%
 - Entre un 25% y un 50%
 - Entre un 50% y un 75%
 - Más de un 75%
17. Responda a la pregunta en caso de haber pertenecido al BHELMA III durante la fase de modernización de la flota a NH-90. ¿Han sufrido alguna reestructuración los equipos de mantenimiento?
- Si
 - No
18. Responda a la pregunta en caso de que en la anterior pregunta haya respondido SI. ¿Cómo fue la reestructuración de los equipos de mantenimiento?
- Aumento de personal de aviónica respecto a mecánicos
 - Aumento de mecánicos respecto a personal de aviónica
 - Redistribución de personal de mantenimiento a oficinas de documentación
 - Aumento del número de inspectores técnicos
 - Aumento general de la plantilla de personal
 - Aumento del número de equipos de trabajo en general
 - Contratación de servicio técnico de la industria (apoyo “On Site”) e integración

de dicho personal en la UTM (Unidad Técnica de Mantenimiento).

- Otras

19. Actualmente, ¿cómo es su carga de trabajo?

- Muy alta
- Alta
- Normal
- Baja
- Muy baja

20. Responda a la pregunta si ha trabajado con NH-90 y con cualquier otro helicóptero previamente. En caso contrario, no marque ninguna respuesta. ¿Cómo era su carga de trabajo con otro helicóptero distinto al NH-90? En la opción “Otra” indique del helicóptero que se trata.

- Muy alta
- Alta
- Normal
- Baja
- Muy baja
- Otra

21. ¿Ha aumentado la plantilla de mecánicos con motivo de la entrada en servicio del NH-90?

- Si
- No

22. Responda a la pregunta en caso de que en la anterior pregunta haya respondido “Si”. ¿Cree que este aumento es suficiente?

- Si
- No

23. Responda a la pregunta en caso de que en la anterior pregunta haya respondido “No”. ¿Qué porcentaje considera que se debería incrementar?

- Menos de un 10%
- Entre un 10% y un 25%
- Entre un 25% y un 50%
- Entre un 50% y un 75%
- Más de un 75%

24. ¿Ha aumentado la plantilla de aviónicos con motivo de la entrada en servicio del NH-90?

- Si
- No

25. Responda a la pregunta en caso de que en la anterior pregunta haya respondido "Sí". ¿Cree que este aumento es suficiente?
- Si
 - No
26. Responda a la pregunta en caso de que en la anterior pregunta haya respondido "No". ¿Qué porcentaje considera que se debería incrementar?
- Menos de un 10%
 - Entre un 10% y un 25%
 - Entre un 25% y un 50%
 - Entre un 50% y un 75%
 - Más de un 75%
27. ¿En caso de despliegue en Operaciones en el exterior, ¿qué helicóptero cree que sería más fiable en cuanto a su grado de operatividad por mantenimiento? Si es un helicóptero distinto al NH-90, indique cuál
- NH-90
 - Otro

Anexo B. Encuesta realizada a pilotos de NH-90

Encuestas a personal experto para la realización del Trabajo de Fin de Grado “Sistemas de control de vuelo Fly-by-wire”.

1. ¿Pertenece usted a la escala de oficiales o suboficiales?
 - Oficiales
 - Suboficiales
2. ¿Pertenece usted a la Especialidad Fundamental de AVIET?
 - Si
 - No
3. ¿A qué unidades (batallones de helicópteros) ha pertenecido?
 - Cuartel General de las FAMET
 - Batallón de Cuartel General de las FAMET
 - BHELA I
 - BHELEME II
 - BHELMA III
 - BHELMA IV
 - BHELTRA V
 - BHELMA VI
 - Grupo Logístico de las FAMET
 - ACAVIET
 - PCMHEL
 - Otra
4. ¿Qué helicópteros ha pilotado? ¿Cuántas horas de vuelo tiene de cada modelo?
 - HA-28 Tigre
 - HU-21 Súper Puma
 - HT-27 Cougar
 - NH-90 Caimán
 - HT-17 Chinook
 - HE-26/HU-26 Eco-Charlie
 - HU-18 UH-1N (Augusta-Bell 212)
 - HU-10 UH-1H (Bell 205 desarrollo del UH-1 Iroquois)
 - Otro
5. Respecto al pilotaje de una aeronave FBW, de las siguientes características ¿cual cree que sobrepasa claramente las capacidades de una aeronave no FBW? En caso de seleccionar varias ordénelas de mayor a menor.
 - Comodidad en los mandos de vuelo/ergonomía

- Capacidad de respuesta/tiempo de reacción
 - Mayores opciones y modos de vuelo que se adaptan a distintas situaciones
 - Menor carga de trabajo para el piloto
 - Mejor integración de los roles de todos los miembros de la tripulación
6. ¿Considera superior un sistema FBW de un sistema convencional?
- Si
 - No
 - Son iguales
7. ¿Considera beneficioso para el ET realizar una transformación al sistema FBW de algunas aeronaves de la actual flota?
- Si
 - No
8. En caso de haber respondido “SI” en la anterior pregunta. ¿Qué aeronaves modernizaría?
- HA-28 Tigre
 - HU-21 Súper Puma
 - HT-27 Cougar
 - NH-90 Caimán
 - HT-17 Chinook
 - HE-26/HU-26 Eco-Charlie
 - HU-18 UH-1N (Augusta-Bell 212)
 - HU-10 UH-1H (Bell 205 desarrollo del UH-1 Iroquois)
 - Otro
9. ¿Considera suficientes los modos de misión actuales del HT-29?
- Si
 - No
10. En caso de haber respondido “NO” en la anterior pregunta. ¿Qué nuevos modos de misión implementaría?
- RELLENAR CAMPO DE TEXTO
11. Respecto a la formación de HT-29 comparada con la de otra aeronave NO FBW. ¿Cuál de las dos tiene una duración mayor?
- HT-29
 - Otra
 - Son iguales
12. Respecto a la formación de HT-29 comparada con la de otra aeronave NO FBW. ¿Cuál de las dos tiene una complejidad mayor?
- HT-29

- Otra
 - Son iguales
13. ¿Cree que podría ser útil utilizar en el futuro (gracias a la tecnología FBW) aeronaves de escolta no tripuladas tipo wing-man de apoyo a helicópteros de maniobra y transporte?
- Si
 - No
14. Justifique su anterior respuesta marcando las opciones que más se ajusten a su opinión. En caso de elegir más de una, ordénelas según su preferencia Insertar campo de texto.
- Proporcionar mayor seguridad a la aeronave líder
 - Poder operar en escenarios con gran amenaza antiaérea
 - Posibilidad de adaptarse en un futuro a las características de los nuevos campos de batalla
 - Reducir carga de trabajo de los pilotos
15. ¿Cree que podría ser útil en un helicóptero de maniobra como el NH-90 implementar modos de misión como retorno automático a una base en caso de emergencia?
- Si
 - No
16. Justifique su anterior respuesta marcando las opciones que más se ajusten a su opinión. En caso de elegir más de una, ordénelas según su preferencia.
- Aumentaría la seguridad de las tripulaciones
 - Aumentaría la seguridad de vuelo en general
 - Mayor seguridad ante mala climatología
 - Mayor seguridad en escenarios con alta densidad antiaérea
17. ¿Se encuentra desplegado de misión ahora mismo?
- Si
 - No
18. En caso de que en la anterior pregunta haya respondido SI. ¿Qué modos de misión cree necesarios de cara a futuros despliegues?
- RELLENAR CAMPO DE TEXTO

Anexo C. Encuesta realizada a pilotos de helicóptero

Encuestas a personal experto para la realización del Trabajo de Fin de Grado “Sistemas de control de vuelo Fly-by-wire”. El fin de esta encuesta es recopilar los datos necesarios para determinar mediante el método AHP (Analytic Hierarchy Process) las aeronaves de ala rotatoria del Ejército de Tierra que serían modernizadas en caso de una eventual transformación al sistema FBW.

1. ¿Sabe usted qué es el sistema de control de vuelo Fly-By-Wire? En caso de responder “NO”, la encuesta ha terminado. Gracias por la participación.
 - Si
 - No
2. ¿Es o ha sido usted militar?
 - Si
 - No
3. En caso afirmativo, ¿cuántos años?
 - 1-5 años
 - 6-10 años
 - 11-15 años
 - Más de 15 años
4. ¿Cuántos años lleva siendo piloto?
 - 1-5 años
 - 6-10 años
 - 11-15 años
 - Más de 15 años
5. ¿Cuál es la máxima calificación aeronáutica que posee (CR1, CR2, piloto de pruebas, PPL, ATPL, CPL, ...)?
 - CR 1
 - CR 2
 - PPL
 - CPL
 - ATPL
 - Piloto de pruebas
 - Piloto instructor
 - Otro
6. ¿Qué atributos cree necesarios en las aeronaves del ET?
 - Velocidad
 - Maniobrabilidad

- Capacidad de carga
 - Capacidad de ataque
 - Autonomía
 - Facilidad de mantenimiento
 - Firma acústica
 - Firma térmica
 - Otra
7. ¿Cuál de los helicópteros elegiría para convertirlo al sistema FBW? Ordénelos según preferencia en caso de elegir más de uno.
- HA-28 Tigre
 - HU-21 Súper Puma
 - HT-27 Cougar
 - HT-17 Chinook
 - HE-26/HU-26 Eco-Charlie
8. En caso de haber seleccionado Chinook ¿Qué atributos cree primordiales en dicha aeronave? Ordénelos según preferencia en caso de elegir más de uno.
- Velocidad
 - Maniobrabilidad
 - Capacidad de carga
 - Capacidad de ataque
 - Autonomía
 - Facilidad de mantenimiento
 - Firma acústica
 - Firma térmica
 - Otra
9. En caso de haber seleccionado Tigre ¿Qué atributos cree primordiales en dicha aeronave? Ordénelos según preferencia en caso de elegir más de uno.
- Velocidad
 - Maniobrabilidad
 - Capacidad de carga
 - Capacidad de ataque
 - Autonomía
 - Facilidad de mantenimiento
 - Firma acústica
 - Firma térmica
 - Otra

10. En caso de haber seleccionado EC-135 ¿Qué atributos cree primordiales en dicha aeronave? Ordénelos según preferencia en caso de elegir más de uno.
- Velocidad
 - Maniobrabilidad
 - Capacidad de carga
 - Capacidad de ataque
 - Autonomía
 - Facilidad de mantenimiento
 - Firma acústica
 - Firma térmica
 - Otra
11. En caso de haber seleccionado Cougar ¿Qué atributos cree primordiales en dicha aeronave? Ordénelos según preferencia en caso de elegir más de uno.
- Velocidad
 - Maniobrabilidad
 - Capacidad de carga
 - Capacidad de ataque
 - Autonomía
 - Facilidad de mantenimiento
 - Firma acústica
 - Firma térmica
 - Otra
12. En caso de haber seleccionado Súper Puma ¿Qué atributos cree primordiales en dicha aeronave? Ordénelos según preferencia en caso de elegir más de uno.
- Velocidad
 - Maniobrabilidad
 - Capacidad de carga
 - Capacidad de ataque
 - Autonomía
 - Facilidad de mantenimiento
 - Firma acústica
 - Firma térmica
 - Otra

Anexo D. Desarrollo del método AHP

Este anexo condensa y expone el desarrollo del método AHP, empleado para tomar la decisión de qué aeronaves se modernizarían en caso de una eventual transformación de la flota al sistema FBW. El proceso será dividido en tres etapas, las cuales se detallan a continuación:

Etapas 1

Previo a esta etapa, ha sido necesario un trabajo de investigación para determinar qué criterios van a ser comparados. En el caso concreto de este proyecto, han sido empleados los métodos de brainstorming (para obtener una lista de posibles criterios) y encuesta (para discriminar cuáles serán comparados finalmente).

Una vez se tienen dichos criterios, se genera una matriz comparativa (ver Figura I) en la que se confrontan los criterios, asignándose unos valores empleando la escala de Saaty (escala del 1-9). Si se prioriza la autonomía sobre la facilidad de mantenimiento, este criterio tendría un valor de, por ejemplo, 5, mientras que el par inverso tendrá un valor de 1/5.

Posteriormente, se calculan unos pesos de cada criterio. Para ello, es necesario crear una matriz normalizada de la ya calculada matriz de comparación. Esta matriz normalizada ha sido obviada, ya que con una hoja Excel el cálculo es mucho más sencillo. Sin embargo, se calcularía sumando cada columna, obteniendo un total de cada una de ellas. Tras este paso, se divide cada número entre el total de la columna en la que se encuentre. A continuación, se realiza el promedio de cada fila de esta última matriz, siendo el resultado el peso de cada criterio.

El siguiente paso sería calcular la relación de consistencia (coeficiente RI). Este coeficiente indica si las ponderaciones han sido coherentes. Para hallarlo, se aplicarán las ecuaciones I y II (donde n = número de criterios e $IA = 1,115$ según unas tablas ya ponderadas de índices de aleatoriedad):

$$IC = \frac{n_{max} - n}{n - 1} \quad (\text{Eq. I})$$

$$RI = \frac{IC}{IA} \quad (\text{Eq. II})$$

Para que el resultado sea consistente, RI debe ser menor a 0,1.

Criterios	Capacidad de carga	Autonomía	Maniobrabilidad	Facilidad de mantenimiento	Capacidad de ataque	Pesos	RI
Capacidad de carga	1	3	3	7	5	0,45	0,0569
Autonomía	1/3	1	1/3	5	3	0,17	
Maniobrabilidad	1/3	3	1	5	3	0,25	
Facilidad de mantenimiento	1/7	1/5	1/5	1	1	0,05	
Capacidad de ataque	1/5	1/3	1/3	1	1	0,07	

Figura I. Matriz comparativa de criterios, pesos y coeficiente RI de la primera etapa. Fuente: elaboración propia.

Etapas 2

En esta segunda fase del proceso se comparan las alternativas (helicópteros) entre sí, en base a cada criterio. Los cálculos serán análogos a los de la etapa 1. A continuación, se muestra el resultado de esta etapa (ver Figura II):

Capacidad de carga	EC135	Chinook	Tigre	Super Puma	Cougar	Pesos	RI
EC135	1	1/9	1	1/5	1/3	0,05	0,0566
Chinook	9	1	9	5	5	0,56	
Tigre	1	1/9	1	1/7	1/7	0,04	
Super Puma	5	1/5	7	1	1	0,19	
Cougar	3	1/5	7	1	1	0,17	
Maniobrabilidad	EC135	Chinook	Tigre	Super Puma	Cougar	Pesos	RI
EC135	1	3	1/5	5	7	0,26	0,064
Chinook	1/3	1	1/5	1	1	0,08	
Tigre	5	5	1	7	7	0,54	
Super Puma	1/5	1	1/7	1	1	0,07	
Cougar	1/7	1	1/7	1	1	0,06	
Autonomía	EC135	Chinook	Tigre	Super Puma	Cougar	Pesos	RI
EC135	1	1/5	1	1	1	0,11	0,0404
Chinook	5	1	5	7	3	0,53	
Tigre	1	1/5	1	3	1	0,14	
Super Puma	1	1/7	1/3	1	1	0,09	
Cougar	1	1/3	1	1	1	0,13	
Facilidad de mantenimiento	EC135	Chinook	Tigre	Super Puma	Cougar	Pesos	RI
EC135	1	7	7	9	9	0,62	0,0619
Chinook	1/7	1	3	3	3	0,16	
Tigre	1/7	1/3	1	3	3	0,11	
Super Puma	1/9	1/3	1/3	1	1	0,05	
Cougar	1/9	1/3	1/3	1	1	0,05	
Capacidad de ataque	EC135	Chinook	Tigre	Super Puma	Cougar	Pesos	RI
EC135	1	1	1/5	3	3	0,15	0,0094
Chinook	1	1	1/5	3	3	0,15	
Tigre	5	5	1	9	9	0,6	
Super Puma	1/3	1/3	1/9	1	1	0,05	
Cougar	1/3	1/3	1/9	1	1	0,05	

Figura II. Matriz comparativa de alternativas-criterios, pesos y coeficiente RI de la segunda etapa. Fuente: elaboración propia.

Etapa 3

En esta última etapa del proceso obtendremos una calificación para cada helicóptero. Primeramente, se realiza una matriz en la que incluimos los criterios y alternativas, añadiendo los resultados obtenidos en la anterior fase y los pesos de cada criterio obtenidos en la etapa 1. El resultado (mostrado en naranja en la Figura III) se obtiene de multiplicar el valor de cada fila por la suma del total de la columna en la que se encuentra.

Criterios	Pesos	EC135	Chinook	Tigre	Super Puma	Cougar
Capacidad de carga	0,45	0,05	0,56	0,04	0,19	0,17
Autonomía	0,17	0,26	0,08	0,54	0,07	0,06
Maniobrabilidad	0,25	0,11	0,53	0,14	0,09	0,13
Facilidad de mantenimiento	0,05	0,62	0,16	0,11	0,05	0,05
Capacidad de ataque	0,07	0,15	0,15	0,6	0,05	0,05
		0,14	0,42	0,19	0,13	0,12

Figura III. Matriz final de resultados. Fuente: elaboración propia.

En base a los valores obtenidos, se tiene que la priorización de aeronaves a modernizar será:

- Chinook
- Tigre
- EC 135
- Súper Puma
- Cougar

Anexo E. Costes de formación

El presente anexo muestra un resumen de todos los gastos relativos a la formación de personal de mantenimiento y pilotos, tanto dentro del propio Ejército de Tierra como en la industria.

Formación ET	Horas totales	Horas FBW	Precio total unitario	Precio FBW unitario
<i>Mantenimiento de aviónica HT-29</i>	675	165,71	4.598,68 €	1.293,05 €
<i>Mantenimiento y reparación HT-29</i>	900	92,72	6.206,77 €	975,76 €
<i>Inspector técnico HT-29</i>	630	25,2	3.204,76 €	568,63 €
<i>Transformación piloto HT-29</i>	166	40,5	476.404 €	107.167 €
<i>Piloto instructor HT-29</i>	198	12	750.346 €	143.562 €
Formación Airbus				
<i>Mantenimiento de aviónica NH-90</i>	240	49,5	14.995,60 €	3.291,94 €
<i>Mantenimiento y reparación NH-90</i>	270	19,5	16.974,70 €	1.573,63 €
<i>Type rating NH-90</i>	196,5	22,91	151.021,11€- 146.664,47€	17.866,75€-17.321,93€
<i>Piloto instructor NH-90</i>	11	11	45.010,99€-45.005,59€	45.010,99€-45.005,59€

