



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

IMPLEMENTACIÓN DE LA FABRICACIÓN ADITIVA
EN LA CADENA LOGÍSTICA DEL EJÉRCITO DE TIERRA
PARA PIEZAS DE REPUESTO DEL SISTEMA HAWK.

Pablo Fernández Menéndez

Director académico: Dr. D. Roberto Jiménez Pacheco

Director militar: Cap. D. Álvaro Carrasco Nogales

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar

2022



Agradecimientos

Me gustaría comenzar expresando mi especial gratitud a mi tutor académico, el Doctor Don Roberto Jiménez Pacheco, por su total disponibilidad y su implicación, sin usted la realización de este trabajo no hubiera sido posible.

Para continuar, quiero agradecer a todos los componentes de la Unidad de Reparaciones III/74, en especial su jefe, el Teniente Coronel Don Salvador Fernández Fernández, y a mi tutor militar, el Capitán Don Álvaro Carrasco Nogales, su gran implicación para el desarrollo de este proyecto, pese a la gran carga de trabajo a la que está sometida la unidad permanentemente. Gracias por hacerme sentir desde el primer momento como un miembro más de la unidad.

También quiero agradecer al personal del Grupo I/74 por su gran acogida y por proporcionarme información tanto del sistema HAWK y su mantenimiento, como de fundamentos de Artillería Antiaérea que en ese momento no conocía, en especial al Capitán Don Fernando López Denia.

Por último, agradecer a mi familia y amigos que siempre me han apoyado desde que inicié este largo camino hace ya casi siete años. Gracias por darme fuerzas para seguir adelante.



RESUMEN

El sistema HAWK es un sistema veterano en nuestro ejército. Debido a esto, existe un problema de abastecimiento de repuestos debido a que ya no se encuentra en fabricación. Con el objetivo de solventarlo, se propone la implementación de un sistema de abastecimiento de repuestos basado en la fabricación aditiva e integrado en la orgánica del RAAA74 a través de sus escalones logísticos.

Para realizar la propuesta, en primer lugar, se ha realizado un análisis bibliográfico sobre el proceso de fabricación aditiva, la logística en el Ejército de Tierra, el sistema HAWK, y la unidad usuaria del sistema, el RAAA74. Como punto de partida se ha tomado el TFG del Teniente José María Blanco Borrego, donde se propone un modelo de uso de la fabricación aditiva en zona de operaciones. A través de la información extraída de ese análisis, con el apoyo de un análisis DAFO y entrevistas con expertos, se han identificado y valorado cualitativamente las principales características técnicas que debe poseer una máquina para satisfacer las necesidades de un escalón logístico, para posteriormente compararlas con los cometidos de cada escalón, estableciendo así unas características de la máquina valoradas para cada escalón. Finalmente se ha propuesto un modelo de sistema, teniendo en cuenta los escalones logísticos, e integrándolo en SIGLE mediante un almacén virtual.

Los resultados obtenidos son que la integración en la orgánica de la unidad se materializa de manera correcta, a través de los escalones logísticos, el sistema resulta viable y se integra en SIGLE, desde donde se gestionan las peticiones de abastecimiento y mantenimiento. La Unidad de Reparaciones tiene un papel fundamental, por ser el órgano más especializado del regimiento, encargándose de gestionar la base de datos de modelos CAD que funciona como un almacén virtual en SIGLE.

Palabras clave

Fabricación aditiva, HAWK, mantenimiento, abastecimiento.



ABSTRACT

The HAWK system is a veteran system in our military. Due to this, there is a problem of supplying spare parts because it is no longer in production. In order to solve it, the implementation of a spare parts supply system based on additive manufacturing and integrated into the RAAA74 organization through its logistics steps is proposed.

To carry out the proposal, firstly, a bibliographical analysis has been carried out on the additive manufacturing process, logistics in the Army, the HAWK system, and the user unit of the system, the RAAA74. As a starting point, the TFG of Lieutenant José María Blanco Borrego has been taken, where a model for the use of additive manufacturing in the area of operations is proposed. Through the information extracted from this analysis, with the support of a SWOT analysis and interviews with experts, the main technical characteristics that a machine must have to satisfy the needs of a logistics level have been identified and qualitatively assessed, in order to subsequently compare them with the tasks of each step, establishing machine characteristics valued for each step. Finally, a system model has been proposed, taking into account the logistic steps, and integrating it into SIGLE through a virtual warehouse.

The results obtained are that the integration in the organic unit materializes correctly, through the logistic steps, the system is viable and is integrated into SIGLE, from where the supply and maintenance requests are managed. The Repairs Unit plays a fundamental role, as it is the most specialized body in the regiment, in charge of managing the CAD model database that functions as a virtual warehouse in SIGLE.

KEYWORDS

Additive manufacturing, HAWK, maintenance, supply.



INDICE DE CONTENIDO

<i>Agradecimientos</i>	<i>I</i>
<i>RESUMEN</i>	<i>II</i>
<i>Palabras clave</i>	<i>II</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>III</i>
<i>KEYWORDS</i>	<i>III</i>
<i>INDICE DE FIGURAS</i>	<i>VI</i>
<i>INDICE DE TABLAS</i>	<i>VII</i>
<i>ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS</i>	<i>VIII</i>
<i>1 INTRODUCCIÓN</i>	<i>1</i>
<i>2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA</i>	<i>2</i>
2.1 Objetivos y alcance	2
2.2 Metodología	2
<i>3 ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO</i>	<i>4</i>
3.1 Fabricación aditiva	4
3.2 Sistema HAWK	8
3.3 Logística en el ejército de Tierra	10
3.4 Unidad de Reparaciones del RAAA74	14
<i>4 DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS</i>	<i>15</i>
4.1 Análisis DAFO del sistema	15
4.2 Asignación de máquinas por escalones	18
4.3 Modelo del sistema	23



4.3.1	Propuesta inicial	24
4.3.2	Propuesta mejorada	25
5	CONCLUSIONES	28
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
7	ANEXOS.....	32
	Anexo I: La logística en el Ejército de Tierra	32



INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Proceso de fabricación aditiva. [1]	4
Figura 2 Batería HAWK. [2].....	9
Figura 3 Matriz de factores del análisis DAFO (elaboración propia).	16
Figura 4 Modelo de proceso creado por el Teniente José María Blanco Borrego [3].	23
Figura 5 Propuesta inicial del modelo de funcionamiento del sistema (elaboración propia).	24
Figura 6 Modelo del sistema final (elaboración propia).	26



INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Valoración de características de la máquina.	19
Tabla 2 Asignación de características de la máquina en función del escalón.....	22



ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

- AALOG: Agrupación de Apoyo Logístico.
- BCP: Battery Command Post.
- CAD: Computer-Aided Design.
- COLAG: Complejo Logístico de Apoyo General.
- CWAR: Continuous Wave Acquisition Radar.
- DAFO: Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades.
- EA: Ejército del Aire.
- ET: Ejército de Tierra.
- FAS: Fuerzas Armadas.
- HAWK: Home All the Way Killer.
- HIPIR: High Power Illuminator Radar.
- IFF: Identification Friend or Foe.
- ITV: Inspección Técnica de Vehículos.
- LASHE: Low Altitude Simultaneous HAWK Engagement System.
- NBQ: Nuclear, Biológico, Químico.
- OAE: Órgano de Alta Especialización.
- OTAN: Organización del Tratado del Atlántico Norte.
- PAR: Pulse Acquisition Radar.
- PIP: Product Improvement Program.
- RAAA: Regimiento de Artillería Antiaérea.
- SAM: Surface to Air Missile.
- SIGLE: Sistema Integrado de Gestión Logística del Ejército.
- STL: Standard Triangle Language.
- TAS: Tracking Adjunt System.
- TFG: Trabajo Fin de Grado.



TN: Territorio Nacional.

TO: Teatro de Operaciones.

UAD: Unidad de Apoyo Directo.

ULOG: Unidad Logística.

UR: Unidad de Reparaciones.



1 INTRODUCCIÓN

Vivimos en un mundo de constante evolución, en el que los avances tecnológicos cobran gran importancia en todos los ámbitos. En la industria, cualquier técnica o proceso novedoso es digno de ser estudiado y en su caso implantado, con el objetivo de obtener una mayor eficiencia en la producción, mayor seguridad, abaratar costes... En el ámbito militar, de igual manera, el desarrollo y mejora de sistemas es vital para adquirir superioridad respecto al posible enemigo.

La fabricación aditiva ha influido de manera importante en estos dos ámbitos, revolucionando la industria, y proporcionando nuevas capacidades antes desconocidas. Este proceso consiste en la fabricación de objetos llevada a cabo mediante la adhesión de un material por capas de un espesor variable. Inicialmente, se debe realizar un modelo 3D del objeto mediante Computer-aided Design (CAD), que posteriormente se traduce a Standard Triangle Lenguaje (STL) con el cual trabaja el software de la máquina. Mediante esta tecnología es posible crear objetos de gran variedad de materiales, tales como: polímeros, cerámicas, resinas y metales. [1]

En el ámbito militar, disponer de capacidad de fabricar aditivamente supone una gran evolución de la logística, ya que implica la reducción de stock físico. Además, permite crear piezas que, por la longevidad del material hayan dejado de fabricarse por parte de la empresa proveedora, o bien que, por su tamaño o complejidad, no se comercialicen de manera independiente sino dentro de un lote.

Enfocando al caso concreto del sistema HAWK, aparece el problema de la longevidad del material, ya que se trata de un sistema que comenzó su servicio en la década de los sesenta, y que, tras varias actualizaciones hasta llegar hasta el PIP III (última actualización) continúa en servicio hoy en día. [2] En el Regimiento de Artillería Antiaérea (RAAA) nº 74 (usuario del sistema HAWK) son conscientes de este problema, y por ello, en el área de investigación y desarrollo de la Unidad de Reparaciones, utilizan la fabricación aditiva como alternativa a la compra de determinadas piezas ya sea por su escasez y elevado coste, o porque simplemente han dejado de fabricarse.

Continuando en esta línea con este trabajo se pretende estudiar la viabilidad de crear un órgano de impresión aditiva a nivel ejército, integrándolo en su cadena logística, enfocado al sistema HAWK.

El estudio realizado tiene como limitación el referirse exclusivamente al sistema HAWK, pero pudiendo ser extrapolable a otros sistemas y ejércitos, que se encuentren ante situaciones similares.



2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

2.1 Objetivos y alcance

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema HAWK, pese a su fiabilidad, es un sistema veterano con el que cuenta nuestro Ejército de Tierra. Esta veteranía está causando el problema de la escasez de repuestos, debido a que la empresa desarrolladora ha dejado de fabricarlo. Esto deriva en un problema logístico, ya que, la citada longevidad genera una falta de piezas, destacando un elevado precio y una dificultad para encontrarlas.

El objetivo general de este trabajo es realizar una propuesta de implantación de un sistema de fabricación aditiva a nivel ejército para obtener los mencionados repuestos. Este sistema tendrá como cometido solucionar el problema de la escasez de piezas ya que, gracias a las tecnologías de fabricación aditiva, permiten a la unidad crear sus propias piezas, sin necesidad de contactar con empresas externas o encargar piezas de repuesto desde cero a una nueva empresa, con el coste que conlleva. Para realizar la propuesta se pretende:

- Integrar el sistema en los escalones de mantenimiento del Ejército de Tierra, incluyendo un tipo de máquina con unas características determinadas en función de las necesidades de cada escalón, focalizado en la estructura orgánica del RAAA74.
- Realizar un diseño del sistema, de manera que permita su integración en el Sistema de Gestión Logística del Ejército (SIGLE).
- Proponer un diagrama de funcionamiento del sistema, considerando los dos puntos anteriores.

Las limitaciones o requisitos excluidos del trabajo son:

- Un estudio de piezas susceptibles de ser fabricadas mediante esta tecnología, clasificadas según su material, ya que se realizó con anterioridad en el Trabajo de Fin de Grado de José María Blanco Borrego [3].
- El estudio se va a referir únicamente al sistema HAWK¹, pero tanto la estructura del sistema como las características de la máquina para cada escalón puede ser extrapolable a cualquier otro sistema y ejército.

2.2 Metodología

Con el objetivo de recopilar información se ha utilizado la síntesis y análisis de información contenida en documentos teóricos, doctrina y otros estudios relacionados con el tema a tratar, como pueden ser otros Trabajos de Fin de Grado.

¹ Es importante matizar este aspecto, ya que el cuarto escalón de este sistema se materializa en la Unidad de Reparaciones, encuadrada en la orgánica del regimiento, a diferencia de otros sistemas, cuyo cuarto escalón es un Parque de Mantenimiento.



A lo largo del desarrollo se han empleado los siguientes métodos:

- Como paso previo a la asignación de las características de la máquina en función de las necesidades de cada escalón, se ha realizado un análisis DAFO sobre el uso de fabricación aditiva en el sistema HAWK, tras identificar las debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades en una entrevista con el Dr. Roberto Jiménez Pacheco, experto en fabricación aditiva.
- Para el apartado de asignación de características de la máquina en función de las necesidades de cada escalón, inicialmente se han identificado las características tras una entrevista con el Dr. Roberto Jiménez Pacheco. Una vez identificadas se han tabulado, asignándoles una valoración cualitativa, debido a que aún son tecnologías con una evolución muy rápida, y se ha utilizado una escala de clasificación en base a la disponibilidad tecnológica de cada momento. Posteriormente se ha realizado un análisis bibliográfico de los cometidos y necesidades de cada escalón de mantenimiento en base a documentación de la asignatura Logística aplicada a la defensa [4] [5] [6]. Comparando las necesidades de los escalones con las características o limitaciones de las máquinas se ha llegado a la asignación final.
- El apartado final se ha desarrollado a partir de un modelo de un sistema similar que el Teniente José María Blanco Borrego plantea en su TFG [3]. Se ha analizado el sistema, identificando sus limitaciones con respecto al caso estudiado en este trabajo. A partir de ese estudio, y teniendo en cuenta el análisis sobre los escalones logísticos realizado en el apartado anterior, así como las fases del proceso de fabricación aditiva, se ha presentado una propuesta de funcionamiento del sistema mediante un diagrama de proceso. Este diagrama se ha presentado inicialmente, y tras una entrevista con el Dr. Roberto Jiménez Pacheco, se ha mejorado, dando lugar a su versión final.



3 ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

Para comprender correctamente este trabajo, este punto es de vital importancia. Por un lado, se va a tratar la fabricación aditiva en general, con las posibilidades que ofrece y algunos ejemplos de usos en el mundo civil. Por otro lado, se va a explicar la parte militar del trabajo: el sistema HAWK, la logística en el Ejército de Tierra y la Unidad de Reparaciones del RAAA74.

3.1 Fabricación aditiva

La fabricación aditiva [1], inicialmente se conocía como prototipado rápido. Este proceso es utilizado en diversas industrias para obtener de manera rápida un modelo sobre el que desarrollar el producto final. Consiste en crear un prototipo a partir de una idea inicial, al que implementar diversos cambios hasta cumplir con las especificaciones deseadas. Pero para referirse correctamente a lo que hoy se conoce como fabricación aditiva, es necesario puntualizar que la fabricación de un modelo físico se lleva a cabo a partir de datos digitales. Además, estos procesos han sido mejorados de manera que ya es posible fabricar mediante fabricación aditiva piezas finales, sin tratarse de prototipos. Otra característica importante de la fabricación aditiva es que simplifica en gran medida los procesos de producción de piezas complejas, ya que con este método solo es necesario conocer ciertos datos CAD de la pieza a producir, así como el funcionamiento de la máquina de fabricación aditiva. Estas máquinas suelen funcionar uniendo capas, siendo cada una de estas una sección transversal del modelo CAD de la pieza. La precisión de la pieza creada con respecto al modelo CAD, viene determinada por factores como el grosor de las capas, la manera mediante la cual se unen, el tipo de material utilizado, la velocidad de fabricación o los trabajos requeridos posteriores a su creación. Por lo tanto, la fabricación aditiva actual es mucho más que el simple prototipado rápido inicial, ya que los avances tecnológicos permiten crear productos de gran calidad y de diversos materiales, incluyendo metales. Las fases del proceso de fabricación aditiva son (ver Figura 1):

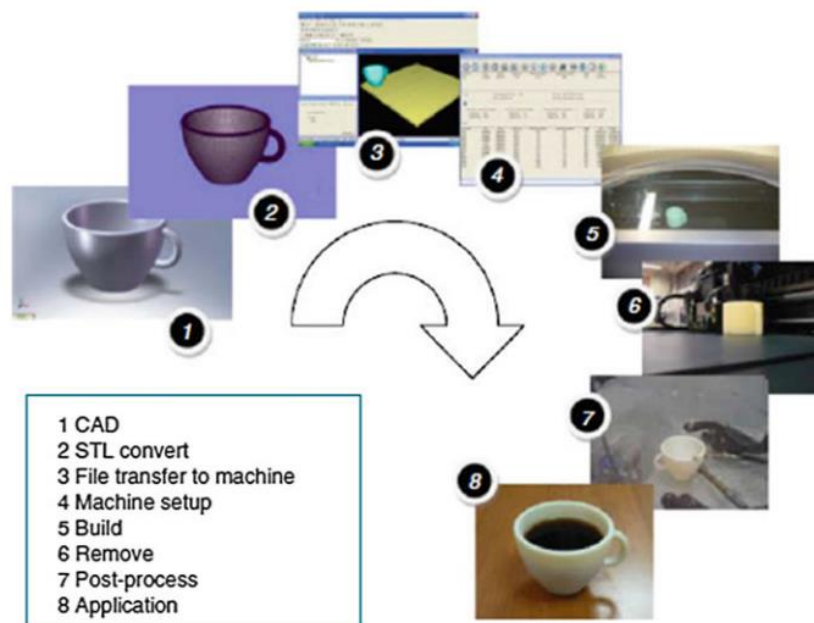


Figura 1 Proceso de fabricación aditiva. [1]



1. CAD:

Es el paso inicial del proceso. En este paso se debe crear un modelo que represente geométricamente todas las partes de la pieza a fabricar. Este modelo suele crearse mediante un software de diseño.²

2. Conversión a STL:

Consiste en transformar el modelo CAD del objeto a lenguaje STL. Este lenguaje es el lenguaje estándar de las máquinas de fabricación aditiva, por lo que la mayoría de los softwares de diseño permiten generar automáticamente archivos de este tipo, a partir del modelo diseñado. El lenguaje STL describe las superficies cerradas externas del modelo CAD, y constituye la base para el cálculo de las secciones transversales mediante las cuales se crea la pieza final.

3. Transferencia y manipulación del archivo STL a una máquina de fabricación aditiva:

En esta fase se transfiere el archivo STL a un software compatible con la máquina que procederá a fabricar la pieza. Este software actúa analizando las características de la pieza, tanto geométricas como funcionales, y requiere que se establezcan unos parámetros de fabricación. Da como resultado un programa de fabricación, donde se incluyen los pasos que la máquina debe seguir para la obtención del producto final.

4. Configuración de la máquina:

Se inicia con la transferencia del programa de fabricación a la máquina. Con esto se consigue que la máquina sepa los pasos a seguir, incluyendo parámetros como temperatura, desplazamientos, espesor de capa, velocidades... Estos parámetros se definen en la fase anterior, por lo que la configuración de la máquina podría considerarse incluida en dicha fase.

5. Construcción:

Este proceso está normalmente automatizado y puede llevarse a cabo sin apenas supervisión. Solo es necesario revisar superficialmente la máquina para evitar fallos como quedarse sin material, fallos de software o falta de energía.

6. Retirada de la pieza:

Cuando el proceso de construcción finaliza, es necesario retirar la pieza. Este paso puede requerir cierta interacción con la máquina, ya que puede tener mecanismos de

² En algunos casos esta fase se omite, ya que, con la utilización de métodos como el escaneo, se genera directamente un archivo STL, que tras la realización de mejoras para subsanar defectos si fuera necesario, se transfiere directamente a la máquina.



seguridad para mantener la temperatura de funcionamiento correcta o para que no haya partes de la pieza en movimiento.

7. Trabajos postproceso:

Una vez retirada la pieza de la máquina, puede requerir ciertos trabajos previos a su uso. Esto se debe a que pueden existir elementos auxiliares de soporte creados para sujetar la pieza durante su fabricación, o restos de material que deben ser eliminados. Este proceso requiere manipulación por personal experimentado de manera cuidadosa. También pueden ser necesarios trabajos de postprocesado para obtener precisiones dimensionales superiores a las que la máquina de fabricación aditiva es capaz de obtener.

8. Puesta en funcionamiento:

Aunque las piezas estén listas en esta fase, pueden requerir más tratamientos como pintar, imprimir, ser ensambladas con otros componentes mecánicos o electrónicos, o incluso realizar ensayos estructurales si se tratara de piezas críticas. También hay que tener en cuenta que las máquinas requieren de un mantenimiento y pruebas, con el objetivo de que sus capacidades de fabricación no se vean reducidas. Otro aspecto reseñable es la conservación de los materiales que utiliza la máquina, ya que deben ser conservados en condiciones que alarguen su vida y eviten el contacto con agentes que puedan producir reacciones químicas.

Por otro lado, la fabricación aditiva, es considerada en muchos casos una revolución industrial. Esto se debe a varios factores:

- Rapidez de fabricación: Esta rapidez se debe en gran medida al uso de ordenadores en todas las fases del proceso, desde el diseño, hasta la fabricación, lo que facilita la transferencia de datos y conversión de formatos. Por otro lado, con esta tecnología, se facilita la comprensión del proceso, ya que se puede decir que el usuario, ve lo que construye, ya que a partir de un modelo CAD 3D obtenemos un objeto real.
- Simplicidad del proceso de fabricación: En la fabricación aditiva, la fabricación se lleva a cabo en un solo paso, independientemente de la complejidad de la pieza. En la fabricación convencional esta complejidad puede requerir varios pasos de fabricación. Además, la implementación de cambios en el diseño resulta indiferente en fabricación aditiva, pudiendo ser causante de cambiar todo el proceso en la fabricación convencional, influyendo una vez más en el tiempo de fabricación.
- Seguridad: En fabricación convencional, es necesario un operario que maneje las máquinas y herramientas, en muchos casos realice trabajos manuales, con el peligro que eso conlleva. En fabricación aditiva es la máquina la que realiza todo el proceso, siendo necesario un operario únicamente para programar la máquina, supervisar, y extraer la pieza finalizada.



Respecto a materiales, inicialmente las máquinas de fabricación aditiva estaban orientadas principalmente a materiales polímeros. Esto se debe a que al principio su principal función era el prototipado rápido, por lo que el objeto fabricado no requería de las mismas propiedades físicas que el producto final. Con la evolución y desarrollo de las tecnologías de impresión aditiva, permitiendo la fabricación de productos finales de alta calidad, hoy en día se puede fabricar aditivamente en gran variedad de materiales: polímeros de diferentes tipos, materiales cerámicos, resinas, e incluso metales, con el gran avance que esto supone.

Finalmente, también cabe señalar la gran variedad de aplicaciones y usos de la fabricación aditiva tanto en la vida civil como en el ámbito militar. En el ámbito militar se han seleccionado casos relativos a las FAS españolas, y en el ámbito civil se han elegido casos de gran impacto para la sociedad civil.

En el mundo civil, se pueden encontrar desde las impresoras 3D domésticas, que se pueden adquirir en cualquier tienda especializada en electrónica, cuyo uso principal es la fabricación de objetos a pequeña escala principalmente para ocio, hasta máquinas industriales capaces de fabricar gran variedad de objetos. Los límites de esta tecnología aún están por definirse. Por ejemplo, la empresa Airbus, se encuentra desarrollando un programa que pretende estar en uso en 2023, con el que podrá fabricar satélites completos y piezas para naves espaciales desde el mismo espacio, gracias a la máquina Metal3D, que pretende instalar en la Estación Espacial Internacional, junto con un conjunto de brazos robóticos que permitirán el ensamblaje de las piezas. Con este proyecto se da un paso más en los materiales, ya que Airbus afirma que en las próximas versiones de Metal3D, se contempla el uso de polvo lunar para la fabricación de piezas [7].

Otro ejemplo reseñable en el ámbito civil es el uso de tecnologías de Fabricación aditiva en la medicina. En este caso, existen varias aplicaciones. Se utiliza la fabricación aditiva para crear modelos quirúrgicos personalizados para cada paciente, a partir de radiografías o resonancias, con el objetivo de ganar eficiencia por parte de los médicos en las intervenciones que requieren gran precisión y ayudan al paciente a comprender de una manera más gráfica la intervención a la que van a ser sometidos. Continuando en la medicina, también cabe destacar el uso de estas tecnologías para la fabricación de prótesis a medida, solucionando el problema de que solo estén disponibles en ciertas tallas, y abaratando los costes de producción [8].

En el ámbito militar se pueden encontrar varios ejemplos y antecedentes del uso de esta tecnología. Además de la ya mencionada Unidad de Reparaciones del RAA74, existen diversas unidades de las Fuerzas Armadas (FAS) donde se emplea esta tecnología. En la Maestranza Aérea de Madrid, situada en Cuatro Vientos, y perteneciente al Ejército del Aire (EA), utilizan la máquina Mark Two de Markforged, para la fabricación de repuestos para aeronaves. Cabe destacar que, con una pieza en concreto creada gracias a esta máquina, han conseguido un ahorro de 200 horas de trabajo y unos 10000€ al año [9]. Otro ejemplo de empleo de fabricación aditiva en las FAS se encuentra en el Parque y Centro de Mantenimiento de Sistemas Acorazados de la Base Mixta de Segovia, que ha incorporado una máquina de fabricación aditiva orientada a fabricar repuestos plásticos de difícil obtención, evitando la dependencia de Estados Unidos, lo que supone un ahorro tanto de tiempo como de dinero [10]. Como líneas futuras en este ámbito, la empresa Navantia pretende instalar en las fragatas F-110 piezas fabricadas mediante fabricación aditiva y máquinas embarcadas que permitan la obtención de repuestos en cualquier momento y lugar [11].



Otro antecedente a destacar es el TFG del Teniente José María Blanco Borrego [3], donde se estudia el uso de la impresión 3D como sistema logístico alternativo en Operaciones. Los aspectos que se han tenido en cuenta de ese proyecto son:

- Análisis de repuestos susceptibles de ser fabricados por impresión 3D: de este apartado se han tenido en cuenta las conclusiones, de gran importancia para la viabilidad del sistema.
- Estudio del proceso de abastecimiento en zona de operaciones mediante impresión 3D: en este apartado se toma como referencia el modelo que plantea de un sistema de abastecimiento, del que se han identificado las limitaciones para posteriormente desarrollar el que se propone, enfocado al caso particular del RAAA74. El sistema planteado por el Teniente Blanco, resulta similar a un caso real, el uso de la impresión 3D en la Campaña Antártica [12].

3.2 Sistema HAWK

El sistema HAWK [2] (Homing All the Way Killer) es un sistema de armas de artillería antiaérea misil, siendo este el MIM-23. El misil cuenta con un sistema de teleguiado directo semiactivo. Su alcance es de 40 Km y su techo de 17 Km, por lo que está destinado a combatir amenazas que vuelen a media, baja y muy baja cota. Alcanza una velocidad de 2,5 mach, por lo que supone una gran amenaza para aeronaves ya que resulta casi imposible evadirse de él una vez se encuentra en vuelo. Su probabilidad de derribo es del 90%. Es de tipo SAM (Surface to Air Missile). En Estados Unidos entró en servicio en 1960, haciéndolo en España en 1968, con la creación del primer Grupo HAWK en San Roque, Cádiz.

A lo largo de su vida operativa se ha visto sometido a varias mejoras, con el objetivo de mejorar sus capacidades para poder hacer frente a las cambiantes amenazas. La primera mejora tuvo lugar en 1964 en Estados Unidos (1975-78 en España), para que el sistema fuera capaz de hacer frente a amenazas a baja cota dando lugar al HAWK mejorado. Posteriormente, en 1973, tuvo lugar la segunda fase de mejoras del sistema en Estados Unidos. Esta fase es conocida como PIP (Product Improvement Program) y su cronología y mejoras en España son las siguientes:

- PIP I: Llegó a España entre 1985 y 1986. Sus mejoras consistieron actualizar las capacidades de los radares de adquisición y del equipo de control de fuegos.
- PIP II: Llegó a España entre 1988 y 1989. Las mejoras que implementó consistieron en la mejora de los radares iluminadores y la implantación de una nueva capacidad de seguimiento óptico.
- PIP III: Llegó a España entre 1997 y 1998. Es la última modificación que ha sufrido el sistema. El PIP III continúa en servicio hoy día. Estas mejoras se centraron en hardware y software, confiriendo al sistema los modos LASHE (Low Altitude Simultaneous Hawk Engagement System) y TAS (Tracking Adjunt System).

La unidad de tiro del sistema es la batería, que se compone de (ver Figura 2):

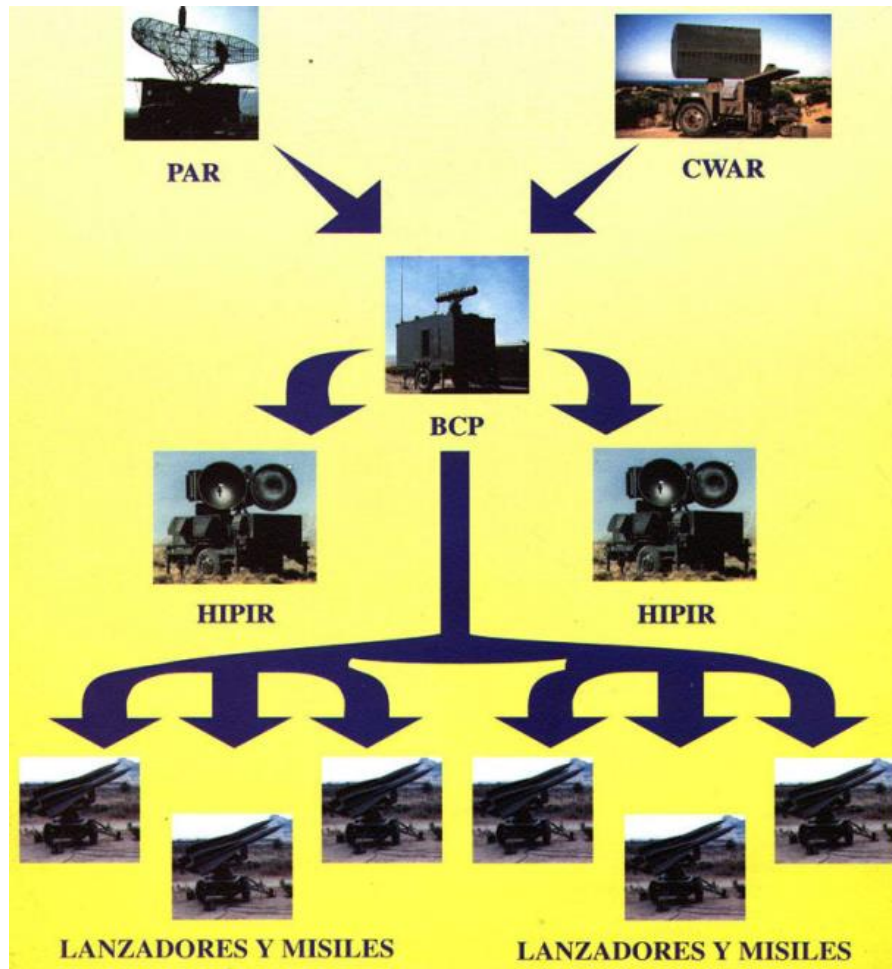


Figura 2 Batería HAWK. [2]

- **Puesto de mando de batería (BCP):**

Es el elemento de control de la batería. En él se lleva a cabo el procesado de datos y comunicaciones, control remoto de los sistemas radar, control del espacio aéreo, control de fuego de misiles e interceptación de blancos. Consta de un contenedor tipo shelter con un rack procesador de datos, interrogador IFF (Identification Friend or Foe), y medios de comunicaciones.

- **Radar de adquisición de pulsos (PAR):**

Es un radar de adquisición orientado a baja y media altura (entre 3 y 18 Km). Posee un alcance de 120 Km, por lo que proporciona una alerta temprana a la batería. Debido a este gran alcance, la información que proporciona de las trazas detectadas es reducida. Consta de una antena principal y una antena supresora de lóbulos laterales. Su polarización es horizontal.



- **Radar de adquisición de onda continua (CWAR):**

Es un radar de adquisición orientado a muy baja altura (menos de 3 Km). Su alcance es de 60 Km. Proporciona orientación, distancia y velocidad de una traza. Está compuesto por una antena principal y una antena receptora lateral supresora de lóbulos horizontales. Su polarización es horizontal.

- **Radar de seguimiento y tiro o iluminador (HIPIR):**

Es un radar de seguimiento y tiro. Su misión es iluminar el objetivo, es decir, radiar sobre él, de manera que el reflejo de esta radiación se recibe en el misil y se procesa para conseguir la interceptación del objetivo. Posee un alcance de 80 Km y su polarización es vertical. Está compuesto por una antena principal, una antena LASHE, una cámara de seguimiento optrónico (TAS) y una antena auxiliar de recepción supresora de lóbulos laterales. La información que proporciona sobre un objetivo incluye posición, velocidad y distinción entre alejamiento y acercamiento. Cada batería posee dos.

- **Lanzador:**

Es el elemento donde se colocan los misiles en disposición de hacer fuego. Puede portar hasta tres misiles. Está conectado a la BCP, de la que recibe las órdenes de fuego y activa los mecanismos de encendido del misil. Una batería consta de seis lanzadores.

- **Cargador:**

Es el encargado de transportar los misiles desde la zona de carga donde previamente se han sacado de su empaque y preparados para hacer fuego, a los lanzadores.

- **Grupos electrógenos:**

Se utilizan para alimentar de energía eléctrica todos los elementos de la batería. Son de 60 Kw. Una batería posee seis grupos electrógenos.

Una vez conocido el sistema y sus partes se pueden identificar los dos hechos que más influyen en este trabajo:

- Se trata de un sistema antiguo, con muchos años de servicio y diversas evoluciones llevadas a cabo durante estos años.
- Es un sistema muy complejo con gran cantidad de elementos necesarios para su funcionamiento.

3.3 Logística en el ejército de Tierra

La logística puede ser definida de diversas maneras. [5] [6] [7] Según la doctrina del Ejército de Tierra, *la logística es una rama del arte militar que planifica y ejecuta las actividades necesarias para construir y sostener las fuerzas en lugares adecuados y momentos oportunos.*



[5] Para la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN), la logística se define como *la ciencia del planeamiento y ejecución del movimiento y sostenimiento de las fuerzas*. [5] Como se puede observar, un concepto clave, común a las dos definiciones es el sostenimiento. El sostenimiento se define como *la provisión continuada de apoyo logístico que posibilita la consecución y continuidad del ritmo deseado de las operaciones*. [5]

En este apartado está centrado en las funciones logísticas Abastecimiento y mantenimiento, ya que son las que afectan directamente al desarrollo del trabajo. En el Anexo A se desarrolla la logística completa según la doctrina del ET, exponiendo todos los tipos y funciones logísticas.

- **Abastecimiento:**

Consiste en satisfacer las necesidades de las unidades en lo relativo a obtención, almacenamiento, distribución, y entrega de recursos materiales y ganado, mantenimiento del flujo, y desembarazo de lo innecesario. Incluye:

- Obtención, recepción, almacenamiento y distribución de recursos.
- Mantenimiento del flujo.
- Desembarazo de lo inútil.
- Control del inventario.
- Baja del material.
- Reforzar y apoyar con materiales móviles.

Esta función logística está estrechamente relacionada con la función logística mantenimiento, la cual es la principal razón de ser de este trabajo.

- **Mantenimiento:**

Consiste en satisfacer las necesidades de las unidades en cuanto a la conservación del material en las mejores condiciones técnicas de empleo, devolvérselas si se deteriora, desembarazar de lo averiado o recoger lo capturado al enemigo. Incluye:

- Mantenimiento preventivo.
- Mantenimiento correctivo/repelación.
- Recuperación.
- Evacuación.

El mantenimiento es una de las funciones logísticas más importantes, y la que normalmente consume la mayor cantidad de recursos económicos durante el ciclo de vida de los sistemas de armas. Esto se debe a que es fundamental para mantener la capacidad operativa de una unidad, más si cabe cuando la unidad cuenta con material especializado y veterano, como es el caso del sistema HAWK.

Las gestiones de mantenimiento y abastecimiento se realizan a través de SIGLE. SIGLE es el Sistema Integrado de Gestión Logística del Ejército. A través de SIGLE se llevan a cabo las funciones logísticas abastecimiento y mantenimiento. Permite realizar peticiones



tanto de mantenimiento como de abastecimiento a sus usuarios. Es importante destacar que el sistema permite la conexión entre diferentes unidades.³

Con el objetivo de facilitar su desempeño, el mantenimiento se organiza en escalones, con unas funciones definidas y encuadrados en los distintos niveles de la orgánica de las unidades. Para la correcta asignación de las tareas según su grado de complejidad y órganos de ejecución:

1. Primer escalón de mantenimiento:

Es el mantenimiento orgánico de la unidad que tiene asignado el material. Lo realiza el operador/usuario sobre el material a su cargo.

Sus principales cometidos son:

- Limpieza.
- Lubricaciones.
- Puesta en servicio.
- Conservar documentación.
- Reparaciones eventuales o de emergencia.
- Colaborar con segundo escalón.

Capacidad de uso de SIGLE: NO.

2. Segundo escalón de mantenimiento:

Mantenimiento orgánico de la unidad que tiene asignado el material. Personal especializado y técnicamente capacitado en una unidad de entidad Batallón, Grupo, o Regimiento con órganos de ejecución de mantenimiento (Sección de Mantenimiento de la compañía de servicios).

Sus principales cometidos son:

- Mantenimiento orgánico.
- Revisiones programadas.
- Refuerzo a primer escalón.
- Localización de averías, reglajes y ajustes y sustitución de componentes.
- Actualización de documentación técnica.
- Uso de instalaciones fijas y equipos móviles.

³ Este aspecto se destaca ya que, como se explica en el siguiente apartado, el almacén con el que cuenta la UR, abastece al RAAA74 y a otras unidades, y se gestiona a través de SIGLE.



Capacidad de uso de SIGLE: SI.

3. Tercer escalón de mantenimiento:

En una unidad cualquiera: Grupo de mantenimiento de una AALOG. Unidad de la fuerza en operaciones: ULOG. Complejo logístico de apoyo general (COLAG). Unidades móviles e instalaciones fijas.

Cometidos:

- Mantenimiento integral.
- Refuerzo a segundo escalón.
- Revisiones.
- Abastecimiento de repuestos y herramienta.
- Propuestas de baja.
- Uso de instalaciones fijas y equipos móviles.
- Control de calidad.
- ITV.

Capacidad de uso de SIGLE: SI.

4. Cuarto escalón de mantenimiento:

En una unidad cualquiera: Parques y centros de mantenimiento y Órganos de alta especialización logística (OAE's), solo para su material especial de dotación o del que son cabecera técnica. Instalaciones fijas y excepcionalmente equipos móviles constituidos al efecto.

Cometidos:

- Mantenimiento integral.
- Refuerzo a tercer escalón.
- Reparación general de conjuntos y repuestos.
- Reconstrucciones, modernizaciones, modificaciones, fabricación de piezas.
- Abastecimiento de repuestos, herramientas.
- Uso de instalaciones fijas.
- Control de calidad.
- Propuestas de baja.

Capacidad de uso de SIGLE: SI.

5. Quinto escalón de mantenimiento:

Empresas externas.



Capacidad de uso de SIGLE: NO.

3.4 Unidad de Reparaciones del RAAA74

Tras analizar la función logística mantenimiento en el apartado anterior, conociendo su organización general, se va a analizar la Unidad de Reparaciones (UR III/74).

El RAAA74, rompe con el esquema general de la logística en el Ejército de Tierra. Esto se debe, en parte, a que es el único usuario del sistema HAWK en España. En este regimiento, a diferencia del resto de unidades, el segundo escalón de mantenimiento no se encuentra a nivel grupo/batallón, sino que se integra en las propias baterías de armas. El tercer escalón de mantenimiento se encuentra a nivel grupo, materializado en la Unidad de Apoyo Directo (UAD). Por lo tanto, existen dos UAD's, una en San Roque y otra en Sevilla. Esta característica facilita el desarrollo de la función logística mantenimiento, ya que el tercer escalón se encuentra en la misma plaza que los grupos, está compuesta por personal de artillería que previamente ha servido en una batería de armas, y posee el curso de mantenimiento, impartido por la UR, por lo que es personal experto en el material; y forma parte de su orgánica.

Respecto al cuarto escalón, es donde más destaca esta unidad por su peculiaridad. El RAAA74 es Órgano de Alta Especialización del sistema HAWK, cuyo elemento ejecutor es la UR III/74. La Unidad de Reparaciones, situada en San Roque, es el cuarto escalón del sistema HAWK en España, teniendo incluso delegadas funciones de quinto escalón por las empresas externas. Su principal diferencia con el resto de los cuartos escalones, es que está integrada dentro de la orgánica del regimiento, conformando una unidad de entidad Grupo, contando así el RAAA74 con tres grupos, dos de misiles, y la Unidad de Reparaciones. Es el único cuarto escalón de mantenimiento de España que no se encuentra en un Parque de Mantenimiento externo a las unidades, sino que depende directamente del regimiento usuario del sistema. Además, se nutre de personal que ha pasado por los grupos de misiles, y en la medida de lo posible por la UAD, por lo que conocen a fondo el sistema, y el funcionamiento del resto de escalones de mantenimiento.

Todo esto genera una importante ventaja en el mantenimiento del sistema HAWK, ya que facilita la ejecución de éste, llevada a cabo por personal experto no solo en el mantenimiento del sistema, sino también en su funcionamiento. Otra gran ventaja es que, en el caso de San Roque, donde se encuentra la UR, todos los escalones del sistema están reunidos en el mismo cuartel, compartiendo incluso alguna instalación. Por lo que resulta mucho más rápido y sencillo el paso de algún componente del sistema de un escalón a otro. Por el contrario, esta concentración de todos los escalones en una misma unidad podría hacer perder oportunidades de economía de escala y posibles sinergias entre distintos sistemas de armas.



4 DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este apartado se va a plantear la implantación de un sistema de fabricación aditiva en base a los escalones de mantenimiento con los que trabaja el sistema HAWK, integrándose totalmente en su estructura orgánica. Inicialmente se va a realizar un análisis DAFO sobre la utilización de un método alternativo de obtención de repuestos específico para el sistema HAWK, en este caso a través de tecnologías de fabricación aditiva. A continuación, se realizará una asignación de las características de la máquina a cada escalón, y para finalizar, se propone un modelo del sistema.

4.1 Análisis DAFO del sistema

Se va a realizar un análisis DAFO sobre la utilización de un método alternativo de obtención de repuestos específico para el sistema HAWK, en este caso a través de tecnologías de fabricación aditiva, integrado en la orgánica de la unidad, en lugar de los parques de mantenimiento característicos de cuarto escalón. Gracias a esta herramienta se identificarán las ventajas e inconvenientes de esta tecnología, que condicionan su uso. Este análisis es el punto de partida previo al resto del desarrollo, ya que permitirá identificar aspectos clave a tener en cuenta en los apartados posteriores.

La detección de los factores presentes en el diagrama del DAFO se ha realizado tomando como punto de partida el modelo del sistema propuesto en el TFG del Teniente Blanco [3]. Este primer análisis se ha visto complementado por las líneas marcadas por expertos como el Capitán Álvaro Carrasco Nogales, destinado en la UR, y el Dr. Roberto Jiménez Pacheco. También se han tenido en cuenta los antecedentes de uso de fabricación aditiva en el ámbito militar mencionados en el apartado 3.



A continuación, se presenta el diagrama del DAFO, de elaboración propia (ver Figura 3).

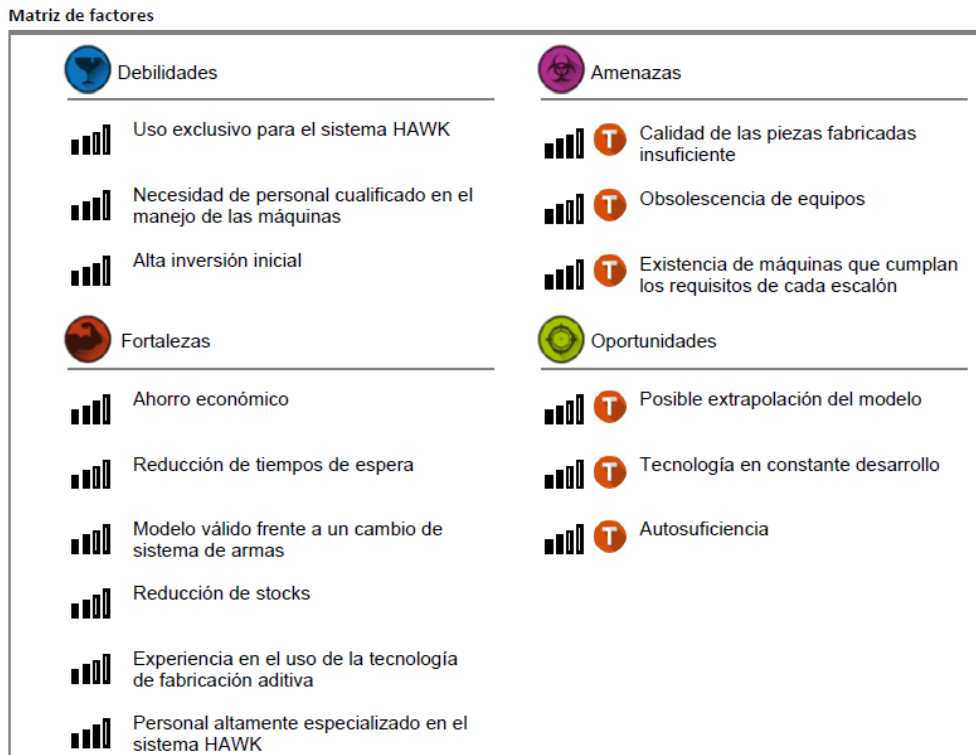


Figura 3 Matriz de factores del análisis DAFO (elaboración propia).

Se han detectado los siguientes factores:

- **Debilidades:**

- Uso exclusivo para el sistema HAWK: esta debilidad viene impuesta por las limitaciones que implica el alcance del trabajo. Se va a tratar únicamente el caso de este sistema.
- Necesidad de personal cualificado en el manejo de las máquinas: en el caso de la UR, ya existe personal familiarizado y cualificado en el uso de máquinas de fabricación aditiva.
- Alta inversión inicial: el coste económico resulta un factor limitante, por ello, en el siguiente apartado se tomará como una de las características a tener en cuenta para la asignación de máquinas por escalones, ya que, los presupuestos aumentan al subir de escalón. Y además, no aprovecha economías de escala del 4º escalón como sí ocurriría en el caso de centralizar esta capacidad en los parques centrales.

- **Amenazas:**

- Calidad de las piezas fabricadas insuficiente: se debe asegurar que la pieza final cumple con unos estándares de calidad para proceder a su uso. Por lo tanto, el proceso de validación y certificación debe ser de gran importancia.



- Obsolescencia de equipos: al tratarse una tecnología emergente y en constante evolución, este aspecto cobra importancia, debido a que el coste resulta limitante.
- Existencia de máquinas que cumplan los requisitos de cada escalón: los diferentes escalones de mantenimiento tienen funciones diferentes y, por tanto, necesidades diferentes. Para seleccionar una máquina se han de tener en cuenta los cometidos de cada escalón, comparándolos con características de la máquina para asegurar que permiten al escalón el desarrollo de su cometido. Puede darse el caso de que no exista una máquina que cumpla con todas las características asignadas para un escalón.
- **Fortalezas:**
 - Ahorro económico: como se ha mencionado, el coste es un factor limitante, por lo que el ahorro económico es una gran ventaja que presenta el uso de la fabricación aditiva.
 - Reducción de tiempos de espera: este aspecto puede ser de vital importancia, en el caso de que el repuesto imprescindible para el funcionamiento del sistema, el tiempo es un factor muy importante.
 - Experiencia en el uso de la tecnología de fabricación aditiva: la UR, en su área de investigación, ya utiliza la fabricación aditiva.
 - Modelo válido frente al cambio de un sistema de armas: la fabricación aditiva aporta esa versatilidad, que permitiría su empleo en otro sistema de armas. Necesario tener en cuenta que, en caso de cambio, sería necesario un estudio de piezas susceptibles de ser fabricadas usando esta tecnología, para el sistema determinado.
 - Reducción de stocks: utilizando la fabricación aditiva, se reducen considerablemente los stocks físicos, sustituyéndolos por un stock virtual de archivos.
 - Personal altamente especializado en el sistema HAWK: este aspecto resulta de gran importancia, ya que, para la fabricación aditiva, no solo es necesario conocer aspectos geométricos de la pieza a fabricar, sino también aspectos sobre su funcionamiento.
- **Oportunidades.**
 - Tecnología en constante desarrollo: La tecnología de fabricación aditiva se encuentra en desarrollo constante. Este aspecto resulta importante a tener en cuenta para el establecimiento de una escala de valoración de las características de la máquina que se va a llevar a cabo en el apartado siguiente.
 - Posible extrapolación del modelo: pese a que una limitación consiste en que se trata de un modelo exclusivo para el HAWK, el diseño del modelo se puede extrapolar para su uso en cualquier sistema.
 - Autosuficiencia: este aspecto resulta de gran importancia, ya que uno de los problemas que presenta el sistema HAWK, y por tanto, uno de los motivos de realización de este trabajo, es la escasez de repuestos, debido a la longevidad del material y al cese de su



producción. Mediante fabricación aditiva se puede solucionar este problema, aportando autosuficiencia a la unidad.

4.2 Asignación de máquinas por escalones:

En este apartado se va a realizar una tabulación de una serie de características de interés de las máquinas, y a continuación, se va a seleccionar el nivel que necesita cada escalón.

La selección de las características se ha llevado a cabo de la siguiente forma:

- Mediante las líneas marcadas a través del análisis DAFO.
- Analizando los cometidos y necesidades de cada escalón logístico.⁴
- Tras una reunión con el Dr. Roberto Jiménez Pacheco, donde se han definido por completo.

Para realizar una asignación de máquinas a cada escalón, se han estudiado las necesidades y cometidos de cada uno. A partir de ahí se han determinado unos requisitos necesarios para la máquina en función del escalón.

Característica	Valoración		
	Bajo	Medio	Alto
Precio	Bajo	Medio	Alto
Peso	Bajo	Medio	Alto
Volumen	Bajo	Medio	Alto
Condiciones de funcionamiento	Resistencia vibraciones: SI/NO	Condiciones específicas de temperatura y humedad: SI/NO	Capacidad de fabricar en movimiento: SI/NO
Tiempo de puesta en marcha	Bajo	Medio	Alto

⁴ Se han descartado necesidades que solo tiene un escalón, como la capacidad de fabricar piezas metálicas, ya que esa necesidad se considera únicamente para cuarto escalón, como se explica a continuación.



Velocidad de impresión	Baja	Media	Alta
Necesidad de elementos auxiliares	No	Depósitos de gases	Máquina generadora de gases

Tabla 1 Valoración de características de la máquina.

La valoración de cada característica se ha realizado mediante una escala cualitativa y no cuantitativa debido a que se trata de tecnología aún con una evolución muy rápida. De esta forma, bajo, medio y alto es una clasificación en base a la disponibilidad tecnológica que haya en cada momento.

Comparando estas características y su valoración con los cometidos y capacidades de cada escalón (expuestas en el apartado 3.3), se va a asignar una valoración de cada característica a cada escalón, obteniendo como resultado las características que debe tener una máquina destinada a su uso por ese escalón.

- **Primer escalón:**

- Los cometidos de primer escalón son demasiado simples (limpieza, lubricaciones, puesta en servicio, conservar documentación, reparaciones eventuales o de emergencia y colaborar con segundo escalón), ya que no se trata de personal especializado en mantenimiento, sino del propio usuario, y además carece de capacidad para trabajar con SIGLE. Por lo tanto, no se contempla la asignación de una máquina de fabricación aditiva a este escalón.

- **Segundo escalón:**

- Precio: debido a que es el escalón de mantenimiento más bajo que cuenta con personal especializado, cuenta con el presupuesto más limitado, por lo tanto: **BAJO**.
- Peso: el segundo escalón utiliza equipos móviles para desplegar acompañando a la unidad, en el caso del RAAA74 está integrado en las baterías de armas, por lo que no cuenta con vehículos con gran capacidad de carga, por lo que el peso debe ser: **BAJO**.
- Volumen: presenta las mismas limitaciones que la característica anterior, por tanto, de igual manera, será: **BAJO**.
- Condiciones de funcionamiento: como ya se ha dicho, el segundo escalón despliega siempre con las baterías de armas por lo que debe requerir de equipos móviles y resistentes, y que no requieran condiciones específicas ya que las condiciones en las que trabaje serán las condiciones del terreno donde esté desplegado. Resistencia a las vibraciones: **SI**. Condiciones específicas de temperatura y humedad: **NO**. Respecto a la capacidad de fabricar en movimiento, no se considera imprescindible por lo que: **SI/NO**.



- Tiempo de puesta en marcha: al tratarse de un elemento desplegable, debe estar disponible en el menor tiempo posible. Tiempo de puesta en marcha: **BAJO**.
- Velocidad de impresión: como en las características anteriores, al estar desplegado, el tiempo es una limitación, por lo que la velocidad debe ser: **ALTA**.
- Necesidad de elementos auxiliares: teniendo en cuenta las limitaciones de espacio y peso, lo idóneo es que **NO**.
- **Tercer escalón:**
 - Precio: en este caso se sube de nivel respecto al segundo escalón, encontrándose en la Unidad de Apoyo Directo, y con una especialización más alta, por lo tanto: **MEDIO**.
 - Peso: se utilizan tanto instalaciones fijas como equipos móviles, contando con más capacidad de almacenamiento y carga, por lo que el peso debe ser: **MEDIO**.
 - Volumen: presenta las mismas limitaciones y capacidades que la característica anterior, por tanto, de igual manera, será: **MEDIO**.
 - Condiciones de funcionamiento: el tercer escalón debe desplegar, pero no tiene por qué hacerlo en la misma zona que las baterías, pudiendo encontrarse en una zona más retrasada y con mejores condiciones. Aun así, estas características no varían respecto al apartado anterior. Resistencia a las vibraciones: **SI**. Condiciones específicas de temperatura y humedad: **NO**. Respecto a la capacidad de fabricar en movimiento, no se considera imprescindible por lo que: **SI/NO**.
 - Tiempo de puesta en marcha: pese a ser un elemento desplegable, no requiere estar disponible con tanta brevedad como el segundo escalón. Tiempo de puesta en marcha: **MEDIO**.
 - Velocidad de impresión: al ser un elemento de mayor especialización, será requerido para fabricar piezas o repuestos más grandes o complejos que los segundos escalones, dando más importancia a factores como la precisión, por lo que la velocidad debe ser: **MEDIA**.
 - Necesidad de elementos auxiliares: al contar con más capacidad tanto de carga como de almacenamiento, puede contar con elementos auxiliares del tipo: **DEPÓSITOS DE GASES**.
- **Cuarto escalón:**
 - Precio: en el caso del cuarto escalón, se trata de la Unidad de Reparaciones, el elemento ejecutor de alta especialización del RAAA74, equivalente a un parque de mantenimiento, por lo que cuenta con presupuestos mucho más elevados que el resto de los escalones, pudiendo asumir un gasto mayor, por lo tanto: **ALTO**.
 - Peso: en este caso no se contempla la opción de ningún tipo de despliegue, ya que la zona de trabajo de la UR está formada por grandes talleres donde el material se



encuentra de forma permanente, por lo tanto, no existen limitaciones en este aspecto: **ALTO**.

- Volumen: presenta las mismas capacidades que la característica anterior, por tanto, de igual manera, será: **ALTO**.
- Condiciones de funcionamiento: como ya se ha dicho, el cuarto escalón realiza sus cometidos en grandes talleres, sin posibilidad de despliegue, por lo que no requiere máquinas compatibles con el movimiento, y no tiene la limitación de las condiciones del terreno. Resistencia a las vibraciones: **NO**. Condiciones específicas de temperatura y humedad: **SI**. Capacidad de fabricar en movimiento: **NO**.
- Tiempo de puesta en marcha: al contar con instalaciones fijas, y tratarse de un escalón muy especializado, el tiempo de puesta en marcha no es de gran importancia, primando otros factores como la precisión en la fabricación y la calidad del producto final. Tiempo de puesta en marcha: **ALTO**.
- Velocidad de impresión: como en el caso del tiempo de puesta en marcha, el tiempo no es una limitación, por lo que la velocidad puede ser: **BAJA**.
- Necesidad de elementos auxiliares: en el cuarto escalón no existen limitaciones de almacenamiento ni de carga por lo que puede contar con todo tipo de elementos auxiliares, con capacidad para: **MÁQUINA GENERADORA DE GASES**.

El resultado de la asignación de características de la máquina en función del escalón de mantenimiento es:

Característica	Segundo escalón	Tercer Escalón	Cuarto escalón
Precio	Bajo	Medio	Alto
Peso	Bajo	Medio	Alto
Volumen	Bajo	Medio	Alto
Condiciones de funcionamiento	Resistencia vibraciones: SI Condiciones específicas de temperatura y humedad: NO	Resistencia vibraciones: SI Condiciones específicas de temperatura y humedad: NO	Resistencia vibraciones: NO Condiciones específicas de temperatura y humedad: SI



	Capacidad de fabricar en movimiento: SI/NO	Capacidad de fabricar en movimiento: SI/NO	Capacidad de fabricar en movimiento: NO
Tiempo de puesta en marcha	Bajo	Medio	Alto
Velocidad de impresión	Alta	Media	Baja
Necesidad de elementos auxiliares	No	Depósitos de gases	Máquina generadora de gases

Tabla 2 Asignación de características de la máquina en función del escalón.

En consecuencia:

- **Segundo escalón:**

Requiere de una máquina de precio reducido, tamaño y peso bajos, que sea resistente a las vibraciones, y no requiera unas condiciones específicas de temperatura y humedad para su correcto funcionamiento. La capacidad de fabricar en movimiento se considera una cualidad no imprescindible, por lo que no se requiere específicamente. También debe operar de manera rápida, tanto en velocidad de fabricación como en puesta en marcha, y no debe requerir de elementos auxiliares.

- **Tercer escalón:**

Requiere de una máquina de precio medio, ya que cuenta con mayor capacidad de adquisición que el escalón inferior, tamaño y peso medios, al poseer mayor capacidad de carga y almacenamiento, que sea resistente a las vibraciones, y no requiera unas condiciones específicas de temperatura y humedad para su correcto funcionamiento. Al igual que el segundo escalón, no se considera imprescindible la capacidad de fabricar en movimiento. El tiempo de puesta en marcha puede ser algo mayor que en el caso anterior, y la velocidad de fabricación más lenta. Puede contar con depósitos de gases.

- **Cuarto escalón:**

Requiere de una máquina con un precio más elevado, ya que, para cumplir su función de manera correcta, necesita una máquina de tipo industrial, y además cuenta con presupuestos más elevados que permiten asumir el gasto. En consecuencia, el tamaño y peso también serán elevados, al no disponer de limitaciones en ese aspecto. No requiere ni resistencia a las vibraciones ni capacidad de fabricar en movimiento, y cuenta con la capacidad de generar unas condiciones concretas de humedad y temperatura. El tiempo no es una limitación por lo que el tiempo de puesta en marcha puede ser bajo y la velocidad de impresión lenta. Puede contar con una máquina generadora de gases. En este caso,



se podría incluir la capacidad de fabricar aditivamente con materiales metálicos. No se ha valorado para el resto de los escalones ya que se trata de máquinas de un coste muy elevado como para que pudieran asumirlo. Resulta una capacidad importante a tener en cuenta, ya que, en el análisis de repuestos del sistema HAWK susceptibles de ser fabricados por impresión 3D realizado por José María Blanco Borrego, se llegó a la conclusión de que un gran porcentaje de estos son de material metálico.

4.3 Modelo del sistema

Con el objetivo de proponer un modelo del sistema, se ha tomado como referencia el modelo creado por el Teniente José María Blanco Borrego [3], que se detalla a continuación (ver Figura 4), y que se va a analizar, identificando sus limitaciones.

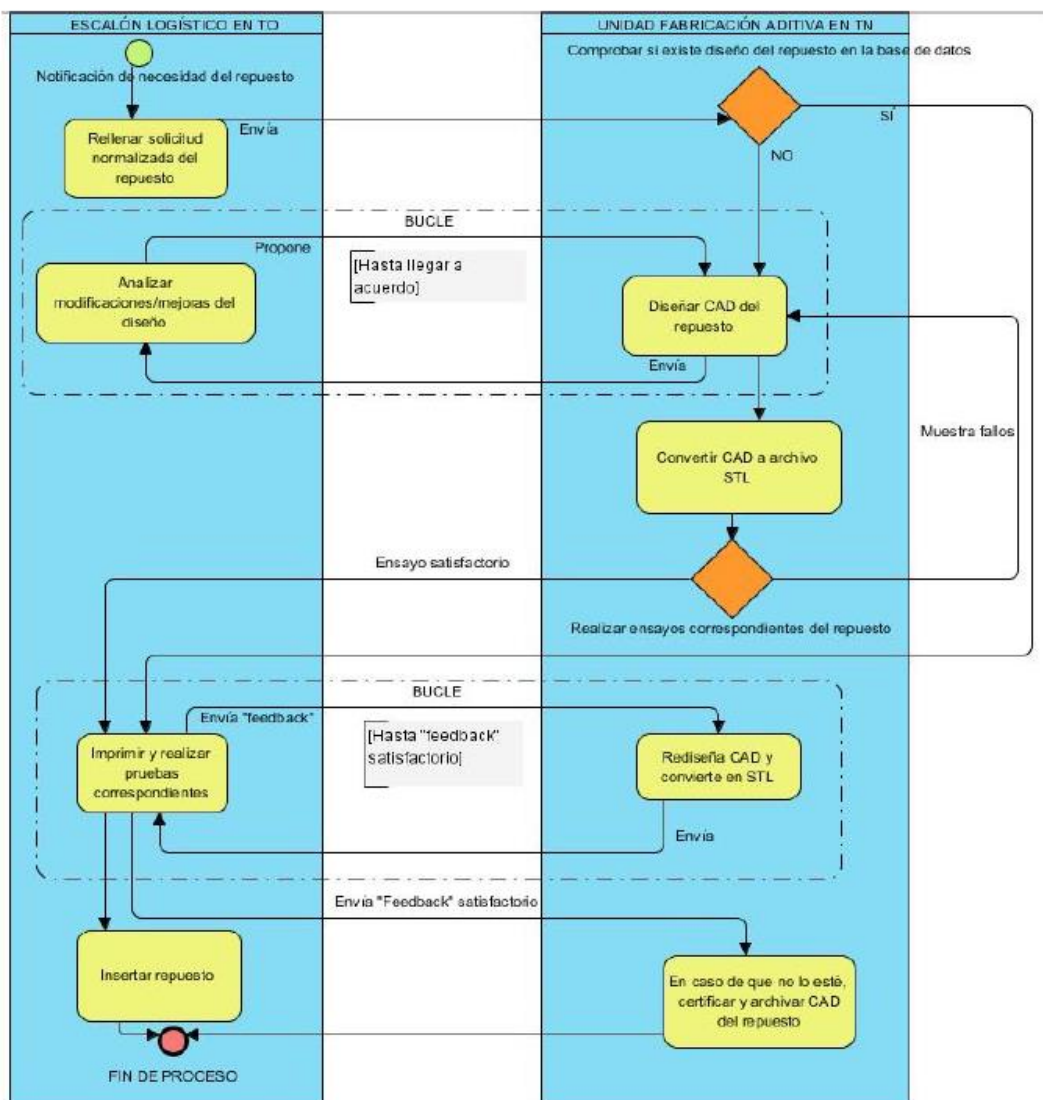


Figura 4 Modelo de proceso creado por el Teniente José María Blanco Borrego [3].



Las principales limitaciones que presenta respecto a lo que se pretende implantar son:

- Se trata de un modelo orientado al suministro en zona de operaciones, por ello, no se definen los cuatro escalones de mantenimiento, sino que se propone un escalón logístico en territorio nacional y otro en zona de operaciones. Realmente intenta solucionar el problema de obtención de necesidades sobrevenidas, no de necesidades planificadas.
- Contempla interacciones detalladas entre los dos escalones en los procesos tanto de diseño de la pieza, como de las pruebas correspondientes una vez fabricada, hasta su certificación. En el caso que se propone, no se detalla este proceso, ya que se le ha asignado su realización a la UR, ya que es el elemento de mayor especialización y cuenta con los medios tanto personales como materiales para su realización. El objetivo es que, al operario de la máquina de fabricación aditiva, sea del escalón que sea, le llegue un archivo certificado, en forma de programa de fabricación, que garantice que la pieza fabricada cumple con sus funciones, sin necesidad de realizar pruebas a ese nivel.⁵

4.3.1 Propuesta inicial

Una vez asignada una máquina en función de sus características a cada escalón, se propone el modelo de funcionamiento del sistema (ver Figura 5).

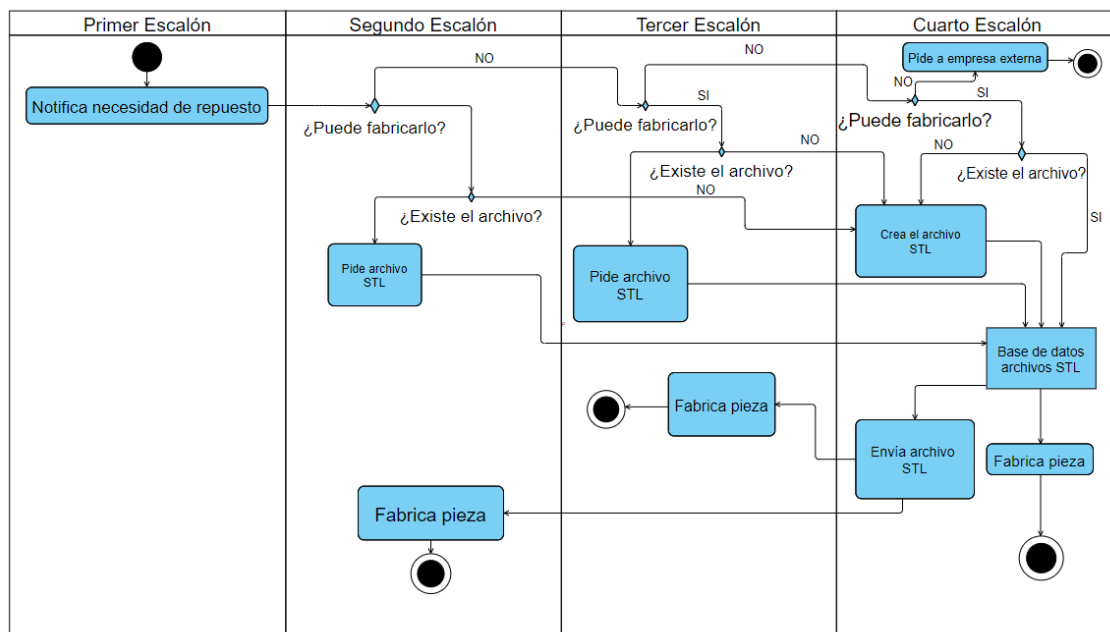


Figura 5 Propuesta inicial del modelo de funcionamiento del sistema (elaboración propia).

⁵ La UR está encargada de certificar los archivos, pudiendo delegar las pruebas al escalón logístico que crea conveniente.



Tras una reunión con el Dr. Roberto Jiménez Pacheco, se detectó un gran error en este sistema. Se contempla una base de datos para archivos STL, así como su envío desde la UR a los escalones para la posterior fabricación de las piezas. Esto no resulta idóneo, ya que los archivos STL, aportan poca capacidad de modificación, por lo que lo idóneo es almacenar los archivos CAD en la base de datos, ya que aportan más información y además, permiten realizar cambios posteriores. Por otro lado, la conversión de un archivo CAD a un STL se realiza de manera rápida y sencilla, por lo que no tendría sentido almacenar los archivos STL y desechar los archivos CAD. Además, el archivo STL requiere ser transferido a un software compatible con la máquina, dando lugar al Programa de Fabricación. El programa de Fabricación lo introduce el operario en la máquina para fabricar la pieza. Debido a esto, se ha considerado idóneo que la conversión desde el CAD inicial hasta el Programa de Fabricación se realice en la UR, enviando al resto de escalones el Programa de Fabricación.

4.3.2 Propuesta mejorada

Para comprender el esquema (ver Figura 6), es necesario tener en cuenta:

- Todas las peticiones a partir de segundo escalón se realizan a través de SIGLE.
- La base de datos de Programas de Fabricación debe estar integrada en SIGLE a modo de almacén virtual. La Unidad de Reparaciones cuenta con un almacén físico por lo que la creación de un almacén virtual y su posterior integración en SIGLE no supone un gran reto para la unidad. Esto implica que cada archivo lleve asociada una referencia única.
- El diseño de los modelos CAD y posterior creación de Programas de Fabricación se realiza en cuarto escalón, en este caso la Unidad de Reparaciones. Esto se debe a que el diseño de una pieza conlleva ciertos conocimientos sobre su funcionamiento, y en esta unidad se encuentra el personal que mejor conoce el sistema, por lo que resulta idónea para esta función. Debe existir personal especializado en CAD para el diseño de las piezas.
- En los procesos llevados a cabo en el modelo, se omiten los procesos de validación y pruebas de cada pieza. La responsabilidad de realizar estos procesos recae en la Unidad de Reparaciones, por ser el órgano más especializado y que cuenta con recursos personales y materiales óptimos para este cometido. Podrá delegar las pruebas en otros escalones, diseñando previamente las pruebas en función de los medios del escalón que fabrica. Con estos procesos se consigue que el archivo CAD almacenado en la base de datos de lugar a un Programa de Fabricación que garantice el correcto funcionamiento de la pieza una vez fabricada. Se omite en el modelo del sistema para simplificarlo y hacerlo más visual.

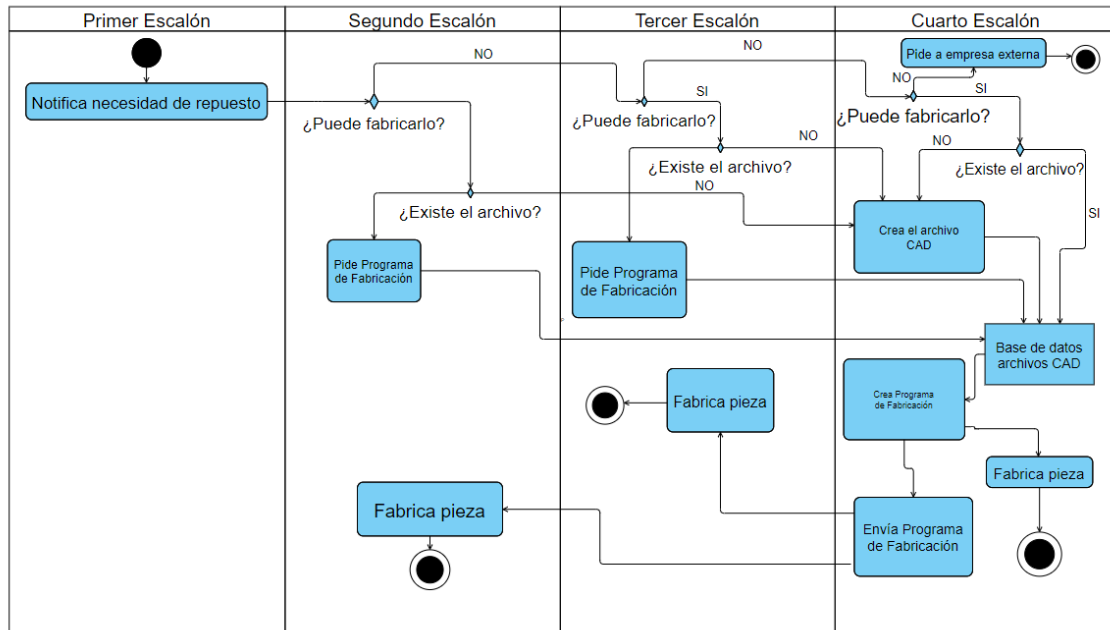


Figura 6 Modelo del sistema final (elaboración propia).

En la figura 6 se puede observar en modelo del sistema propuesto. Se pueden diferenciar los 4 escalones de mantenimiento, donde se llevan a cabo las acciones. Su funcionamiento es similar al del proceso de mantenimiento clásico, tal que, cuando los cometidos de un escalón se ven superados por las características de la avería, se pasa al siguiente escalón, finalizando en el cuarto escalón que contacta con las empresas externas.

De esta manera, el proceso se inicia cuando el usuario (primer escalón) detecta una necesidad de un repuesto. Como no tiene capacidad para fabricarla se lo notifica al segundo escalón.

Al llegar al segundo escalón existen dos opciones, reflejadas en un nodo de decisión:

- Si tiene medios para la fabricación del repuesto solicitado, necesitará el Programa de Fabricación. El siguiente paso es contactar con la Unidad de Reparaciones, que buscará en la base de datos el correspondiente archivo CAD, en caso de existir, creará el Programa de Fabricación y lo enviará al segundo escalón, que procederá a la fabricación del repuesto. Si el archivo no existe, procederá a su diseño CAD, para posteriormente introducirlo en la base de datos y generar el Programa de Fabricación para enviarlo al segundo escalón que fabricará el repuesto.
- Si el segundo escalón no es capaz de fabricar el repuesto, enviará la solicitud al tercer escalón.

En el tercer escalón ocurre el mismo proceso que en el segundo. Se inicia con un nodo de decisión en el que se valora la capacidad para la fabricación del repuesto o no:



- En caso de ser capaz, pedirá el Programa de Fabricación a la Unidad de Reparaciones. De la misma manera que en el caso anterior, si existe lo envía y si no existe, crea el CAD, lo introduce en la base de datos, genera el programa de Fabricación y lo envía, para que tercer escalón pueda fabricar el repuesto.
- Si el tercer escalón no es capaz de fabricar el repuesto, pasa la solicitud a la Unidad de Reparaciones.

Al llegar a la unidad de reparaciones ocurre lo mismo que en los casos anteriores, un nodo de decisión:

- Si puede fabricarlo, simplemente busca el archivo CAD o lo crea, genera el Programa de Fabricación y procede a la fabricación.
- En caso de no ser capaz, establecerá contacto con las empresas externas, para la obtención del correspondiente repuesto.

Este proceso escalonado es muy eficiente, ya que siempre que exista la posibilidad, la fabricación del repuesto se llevará a cabo en el escalón más bajo posible, y, además, al pasar progresivamente por todos los escalones, se evitan posibles fallos ya sea en la percepción del problema o en la petición en sí, y no se saturan los medios de los escalones más altos para pequeñas reparaciones.

El sistema propuesto, está diseñado únicamente para el sistema HAWK, por limitaciones del alcance del trabajo, pero al estar diseñado por escalones, puede implementarse para cualquier otro sistema y ejército. Una de las claves a destacar es que, al estar la base de datos integrada en SIGLE, cualquier unidad puede realizar las peticiones. Otra de las claves en el funcionamiento del sistema tal y como se plantea es el papel del cuarto escalón. Al estar la Unidad de Reparaciones integrada dentro del RAAA74 y formada en su mayor parte por personal que previamente ha estado destinada en los grupos, son expertos conocedores del sistema, por lo que el proceso de diseño, pruebas y validación del archivo CAD, que da lugar al programa de fabricación, y el repuesto, se optimiza en gran medida.

Otro punto a tener en cuenta para la viabilidad de este sistema es el estudio de los repuestos susceptibles de ser creados mediante fabricación aditiva. Este estudio se encuentra fuera del alcance de este proyecto, ya que se ha realizado con anterioridad, en el TFG del Teniente José María Blanco Borrego [3], quien concluyó que existe un gran número de repuestos que es posible fabricar utilizando esta tecnología.



5 CONCLUSIONES

A través del desarrollo del trabajo se han determinado las siguientes conclusiones en función del desarrollo del objetivo principal:

- La integración de la fabricación aditiva en la estructura orgánica del RAAA74 resulta viable, ya que se han determinado las características que debe poseer cada máquina en función de las necesidades de cada escalón logístico, en el caso concreto del RAAA74, con las peculiaridades⁶ anteriormente citadas que posee.
- La integración del sistema en SIGLE se materializa con una base de datos de archivos CAD de los repuestos a modo de almacén virtual, cuya gestión recae en la Unidad de Reparaciones.
- El diagrama de funcionamiento del sistema resulta viable, ya que contempla los cuatro escalones de mantenimiento, con sus relaciones escalonadas, realizando las peticiones de mantenimiento y abastecimiento a través de SIGLE. Además, resulta similar al sistema de abastecimiento y mantenimiento utilizado hoy en día, gestionando las peticiones a través de SIGLE, con la novedad que se utiliza la Fabricación Aditiva como método de obtención de los repuestos.
- El papel de la Unidad de Reparaciones en el desarrollo y funcionamiento del sistema resulta fundamental, ya que, por ser el órgano de mayor especialización presente en el regimiento, tiene asociados unos cometidos específicos⁷ imprescindibles para el correcto funcionamiento del sistema.

Como resultado del estudio, aparecen las siguientes limitaciones:

- Presupuesto: la implantación de la fabricación aditiva requiere la adquisición de las máquinas, lo que supone una inversión significativa para el RAAA74.
- Necesidad de personal especializado: se requiere de personal especializado en el uso de máquinas de fabricación aditiva, presente en la Unidad de Reparaciones, pero no necesariamente en el resto de los escalones.
- Diseño exclusivo orientado al sistema HAWK: este trabajo está únicamente orientado al sistema HAWK, que difiere del resto de sistemas del ET en que el cuarto escalón está integrado en la orgánica del regimiento usuario del sistema.

⁶ Como se ha mencionado, el cuarto escalón forma parte de la estructura orgánica del regimiento, materializado en la Unidad de Reparaciones.

⁷ Como se menciona en el desarrollo, la Unidad de Reparaciones está encargada de la gestión del almacén virtual de archivos CAD, y de la validación de estos archivos, pudiendo delegar las pruebas.



Las líneas futuras para desarrollar sobre la base de este proyecto son:

- Asignación de un modelo concreto de máquina por escalón: A partir de las características de la máquina asignadas a cada escalón en función de sus cometidos y necesidades, se puede realizar en futuros trabajos un estudio de mercado con el objetivo de seleccionar un modelo concreto de máquina para cada escalón.
- Extrapolación del modelo de sistema: El modelo propuesto puede ser utilizado como referencia a trabajos futuros sobre la implementación de la fabricación aditiva en el mantenimiento o abastecimiento de otros sistemas, más allá del caso concreto del HAWK.
- Diseño del almacén virtual de archivos CAD: la base de datos de archivos CAD mencionada, puede ser desarrollada a modo de almacén virtual integrado en SIGLE.



6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. Gibson, D. Rosen y B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, Nueva York: Springer, 2015.
- [2] Academia de Artillería, «Sistema de Armas HAWK».
- [3] J. M. B. Borrego, *Impresión 3D como sistema logístico alternativo en operaciones*, Zaragoza, 2017.
- [4] M. Pueo, S. Vicente, R. Jiménez Pacheco, R. Cajal, C. Mur y García García, «Fabricación Aditiva en la Misión Antártica,» Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza, 2018.
- [5] Centro Universitario de la Defensa, «Logística de la Defensa,» de *Sesión 1: Generalidades de la Logística. Definiciones.*, Zaragoza, 2019-2020.
- [6] Centro Universitario de la Defensa, «Logística de la Defensa,» de *Sesión 4: Función logística Mantenimiento*, Zaragoza, 2019-2020.
- [7] Centro Universitario de la Defensa, «Logística de la defensa,» de *Sesión 3: Función logística Abastecimiento*, Zaragoza, 2019-2020.
- [8] Galaxia Militar, «Galaxia Militar,» 2021. [En línea]. Available: <http://galaxiamilitar.es/el-ejercito-espanol-recibe-los-primeros-misiles-de-defensa-aerea-hawk-21-actualizados/>.
- [9] E. P. García, *Estudio de la necesidad de repuestos del sistema HAWK a corto y medio plazo*, Zaragoza: Repositorio de la Universidad de Zaragoza – Zagan <http://zagan.unizar.es>, 2018.
- [10] E. M. García, *Propuesta de software de simulación para el sistema de armas HAWK*, Zaragoza: Repositorio de la Universidad de Zaragoza – Zagan <http://zagan.unizar.es>, 2020.



- [11] J. V. Gutiérrez, *Proyecto Seis Sigma para la mejora del mantenimiento en el sistema HAWK*, Zaragoza: Repositorio de la Universidad de Zaragoza – Zagan <http://zagan.unizar.es>, 2019.
- [12] I. Marinero, «Omicrono - El Español,» 4 Junio 2022. [En línea]. Available: https://www.elespanol.com/omicrono/tecnologia/20220604/impresora-permitira-fabricar-satelites-enteros-piezas-espacio/676932494_0.html.
- [13] Formlabs, «Formlabs,» 6 Marzo 2020. [En línea]. Available: <https://formlabs.com/es/blog/impresion-3D-atencion-sanitaria/>.
- [14] Sicnova, «Sicnova,» 27 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://sicnova3d.com/blog/maestranza-area-madrid-ejercito-aire-impresion-3d/>.
- [15] Imprimalia3D, «Imprimalia3D,» 3 Agosto 2017. [En línea]. Available: <http://imprimalia3d.com/noticias/2017/07/27/009244/defensa-incorpora-una-impresora-3d-no-tener-que-pedir-piezas-estados>.
- [16] Imprimalia3D, «Imprimalia3D,» 3 Junio 2019. [En línea]. Available: <http://imprimalia3d.com/noticias/2019/06/08/0011019/armada-esp-ola-incorporar-impresoras-3d-fragatas-f110>.



7 ANEXOS

Anexo I: La logística en el Ejército de Tierra

La logística puede ser definida de diversas maneras. Según la doctrina del Ejército de Tierra, *la logística es una rama del arte militar que planifica y ejecuta las actividades necesarias para construir y sostener las fuerzas en lugares adecuados y momentos oportunos.* [5] Para la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN), la logística se define como *la ciencia del planeamiento y ejecución del movimiento y sostenimiento de las fuerzas.* [5] Como se puede observar, un concepto clave, común a las dos definiciones es el sostenimiento. El sostenimiento se define como *la provisión continuada de apoyo logístico que posibilita la consecución y continuidad del ritmo deseado de las operaciones.* [5]

Según su finalidad, la logística se divide en:

- **Logística de obtención:**
 - Determinación de necesidades.
 - Adquisición.
 - Recepción.
- **Logística de distribución:**
 - Distribución.
- **Logística de consumo:**
 - Almacenamiento.
 - Transporte.
 - Entrega.
 - Mantenimiento.
 - Baja.

En el marco de las unidades, aparece el concepto de apoyo logístico, que se divide en:

- **Apoyo orgánico o de unidad:**

Elementos logísticos orgánicos de la propia unidad de entidad Batallón/Grupo.

- **Apoyo directo:**

De un Órgano Logístico a una unidad consumidora de entidad Brigada.

- **Apoyo general:**

De un Órgano Logístico a otro Órgano Logístico para mantener una capacidad.



- **Apoyo refuerzo:**

De un Órgano Logístico a otro Órgano Logístico para aumentar su capacidad.

Por otro lado, es necesario explicar qué es una Función Logística. Una Función Logística es un conjunto de tareas y métodos logísticos, realizados fundamentalmente por los sistemas o subsistemas logísticos, para satisfacer las necesidades de la fuerza y orientados a una misma finalidad. Las funciones logísticas son:

- **Personal:**

Consiste en satisfacer las necesidades de las unidades en gestión y apoyo al personal. Incluye:

- Formación, instrucción y encuadramiento del personal.
- Gestión y control de efectivos.
- Reemplazo de efectivos por bajas.
- Control de detenidos e internados.
- Gestión de fallecidos.
- Apoyo al personal (duchas, lavandería, calidad de vida, telefonía, etc.).
- Apoyos a familias.
- Servicio postal personal y oficial.
- Atención religiosa.
- Asistencia jurídica y notarial.
- Perspectiva de género.

- **Administración económica:**

Consiste en satisfacer las necesidades de las unidades en materia de asuntos económicos. Incluye:

- Asesoramiento económico-financiero.
- Contratación.
- Ejecución de pagos.
- Recepción, liquidación y justificación de fondos.
- Control del gasto.
- Expedientes de evaluación y compensación de daños.

- **Movimiento y transporte:**



Consiste en satisfacer las necesidades de las unidades en cuanto a movimientos, transportes o terminales, relacionados con cualquier recurso ya sea personal, material o ganado. Incluye:

- Control de movimientos.
- Montaje y explotación de terminales.
- Ejecución y control de transportes.

• **Sanidad:**

Consiste en satisfacer las necesidades de las unidades proporcionando medios sanitarios para la conservación y recuperación de la salud e integridad física y psíquica. Incluye:

- Apoyo médico.
- Apoyo veterinario.
- Protección sanitaria en ambiente NBQ.
- Apoyo odontológico.
- Apoyo psicológico.
- Apoyo farmacéutico.
- Mantenimiento y Abastecimiento de recursos sanitarios.

• **Infraestructuras y obras:**

Consiste en satisfacer las necesidades de las unidades en lo relativo a diseño, construcción, rehabilitación y mantenimiento de infraestructuras. Incluye:

- Obras de inversión.
- Mantenimiento de infraestructura.
- Gestión medioambiental.

• **Abastecimiento:**

Consiste en satisfacer las necesidades de las unidades en lo relativo a obtención, almacenamiento, distribución, y entrega de recursos materiales y ganado, mantenimiento del flujo, y desembarazo de lo innecesario. Incluye:

- Obtención, recepción, almacenamiento y distribución de recursos.
- Mantenimiento del flujo.
- Desembarazo de lo inútil.
- Control del inventario.
- Baja del material.
- Reforzar y apoyar con materiales móviles.



Esta función logística está estrechamente relacionada con la función logística mantenimiento, la cual es la principal razón de ser de este trabajo.

- **Mantenimiento:**

Consiste en satisfacer las necesidades de las unidades en cuanto a la conservación del material en las mejores condiciones técnicas de empleo, devolvérselas si se deteriora, desembarazar de lo averiado o recoger lo capturado al enemigo. Incluye:

- Mantenimiento preventivo.
- Mantenimiento correctivo/reparación.
- Recuperación.
- Evacuación.