Universidad Zaragoza
1542

Trabajo Fin de Grado

Dotar a un grupo de artillería de medios necesarios para garantizar el enlace con los equipos de observadores avanzados (OAV) a distancias de entre 40 Km y 100 Km

CAC Ignacio Javier González González

Directora académica: Tcol. Dª Elvira Navarro Palacio
Director militar: Cap. D. Rafael Díaz de San Pedro Sánchez-Barbudo

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar

2023

Repositorio de la Universidad de Zaragoza – Zaguan http://zaguan.unizar.es

Agradecimientos

Mi agradecimiento a la directora académica de este Trabajo Fin de Grado (TFG), Tcol. Dª Elvira Navarro Palacio, por su dirección y colaboración desde el principio, sus acertados consejos e indicaciones para que este trabajo sea una realidad. Al director militar del mismo, Cap. D. Rafael Díaz de San Pedro Sánchez-Barbudo, por su ayuda inestimable en todo momento, por servirme de inspiración y referente militar, durante la realización de mis prácticas externas en la Brigada Galicia VII.

A la Academia General Militar de Zaragoza, por haberme forjado como militar y como persona durante estos intensos años de formación.

A mi familia, a mis abuelos por su cariño y ánimo, a mi hermana, Julia, por su complicidad y a mis padres, Mariola y Francisco Javier. A mi madre, por su dedicación, paciencia y comprensión en todo momento, siempre con una sonrisa, a mi padre por su cordura y sentido común. A los dos, por su apoyo incondicional en los momentos difíciles.

RESUMEN

En este Trabajo Fin de Grado (TFG) se plantea la búsqueda de alternativas capaces de mejorar los medios de transmisión actuales con los observadores avanzados (OAV), en un grupo de artillería de campaña (GACA).

Tiene su origen en las lecciones aprendidas de conflictos recientes, donde se ha puesto de manifiesto la superioridad, en cuanto a alcance, de la artillería de campaña que está actuando en estos escenarios, donde se hace evidente que ésta juega un papel determinante en los conflictos bélicos actuales.

Como consecuencia del importante desarrollo que están experimentando los sistemas de armas de artillería, surgen otras oportunidades de mejora dentro de su ámbito de operaciones, como es el caso de las comunicaciones tácticas asociadas.

En línea con lo anterior, el objetivo principal de este TFG es proponer soluciones que aseguren una comunicación eficaz entre los grupos de artillería de campaña (GACA) y los equipos de observadores avanzados (OAV) a distancias de entre 40 km y 100 km, en el contexto de la modernización prevista de los sistemas de artillería del Ejército de Tierra español (ET).

Se han identificado alternativas válidas, considerando los requisitos y premisas de partida. Una vez identificadas las tecnologías cuya implementación, *a priori,* puede suponer un potencial de mejora para la situación actual, el estudio se ha centrado en la selección de la opción más recomendable para este escenario, tras el análisis comparativo de todas las alternativas.

Tras este análisis, se recomienda seguir avanzando en el estudio de alguna de las alternativas que está mostrando mayor potencial. Tal es el caso de la radio desarrollada por *software* (SDR).

El proceso de análisis comienza por la revisión de la bibliografía seleccionada, las entrevistas con expertos de la Brigada Galicia VII y la aplicación de técnicas de análisis para la ayuda a la toma de decisiones, utilizando múltiples criterios como AHP (*Analytic Hierarchy Process*) y análisis DAFO (debilidades-amenazas-fortalezas-oportunidades). Así, se analizan en este TFG cuatro alternativas: La utilización de radio PR4G v3 con relés, la comunicación vía satélite (SATCOM), la radio de banda de alta frecuencia (HF) y la radio definida por *software* (SDR).

Los resultados del análisis comparativo ponen de manifiesto que la radio VHF, PR4G-v3, medio utilizado en la actualidad para esta función, tiene limitaciones en el escenario futuro que se describe, sobre todo por la vulnerabilidad de los relés.

La comunicación satélite puede ser una opción válida para esta aplicación, pero menos indicada para el propósito de este TFG.

La radio definida por software (SDR), destaca por su flexibilidad y capacidad de adaptación a las diferentes situaciones que se puedan presentar en el campo de batalla, aunque requiere una inversión alta y especialización técnica.

La radio de banda de alta frecuencia (HF) es la que se propone como alternativa más indicada hoy en día, cumpliendo holgadamente con los requisitos planteados.

Las conclusiones de este TFG proporcionan una respuesta clara a los objetivos planteados, identificando las alternativas que representan una solución de mejora, realizando un análisis comparativo exhaustivo y proponiendo la radio de alta frecuencia (HF) como la mejor opción para garantizar la comunicación entre los GACA y los OAV en las condiciones descritas.

Palabras clave

Observadores avanzados (OAV), radio de alta frecuencia (HF), radio definida por *software* (SDR), método de análisis jerárquico AHP.

ABSTRACT

In this Final Degree Project (TFG), the search for alternatives capable of improving the current transmission means with forward observers (FO) in a field artillery group (ACA) is proposed.

It has its origin in the lessons learned from recent conflicts, where the superiority, in terms of range, of the field artillery that is acting in these scenarios has been revealed, where it is evident that it plays a determining importance in conflicts. current wars.

Because of the important development that artillery weapons systems are experiencing, other opportunities for improvement arise within their scope, such as associated tactical communications.

In line with the above, the main objective of this TFG is to propose solutions that ensure effective communication between field artillery groups (GACA) and advanced observer teams (OAV) at distances between 40 km and 100 km, in the context of the planned modernization of the artillery systems of the Spanish Army.

Valid alternatives have been identified considering the requirements and starting premises. Once the technologies whose implementation, a priori, can represent a potential for improvement for the current situation, have been identified, the study has focused on the selection of the most recommended option for this scenario, after the comparative analysis of all the alternatives. After this analysis, it is recommended to continue advancing in the study of some of the alternatives that are showing the greatest potential. Such is the case of software developed radio (SDR).

The analysis process begins by reviewing the selected bibliography, interviews with experts from the Galicia VII Brigade and the application of analysis techniques to help decision making, using multiple criteria such as AHP (Analytic Hierarchy Process) and analysis. SWOT (weaknesses-threats-strengths-opportunities). Thus, four alternatives are analyzed in this TFG: The use of PR4G v3 radio with relays, satellite communication (SATCOM), high frequency band radio (HF) and software defined radio (SDR).

The results of the comparative analysis show that the VHF radio, PR4G-v3, currently used for this function, has limitations in the scenario described, mainly due to the vulnerability of the relays. Satellite communication may be a valid option for this application, but less suitable for the purpose of this TFG. Software defined radio (SDR) stands out for its flexibility and adaptability to different situations that may arise in the battlefield, although it requires a high technical expertise and investment required.

High Frequency (HF) radio is proposed as the most suitable alternative today, comfortably fulfilling the requirements.

This TFG provide a clear answer to the objectives set, identifying the alternatives that represent a solution for improvement, carrying out an exhaustive comparative analysis and proposing high-frequency (HF) radio as the best option to guarantee communication between the GACA and the FO under described conditions.

KEYWORDS

Forward Observer (FO), High Frecuency Radio (HF), Software Defined Radio (SDR), Analytic Hierarchy Process (AHP)

INDICE DE CONTENIDO

Agradecimientos ..... *I*

RESUMEN ..... *II*

Palabras clave ..... *III*

ABSTRACT ..... *IV*

KEYWORDS ..... **IV**

INDICE DE FIGURAS ..... *VIII*

INDICE DE TABLAS ..... *IX*

ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS ..... *X*

1 INTRODUCCIÓN *1*

1.1 Situación y Contexto **1**

2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA *3*

2.1 OBJETIVOS Y ALCANCE **3**

2.2 METODOLOGÍA **4**

2.2.1. Métodos cualitativos 4

2.2.2. Métodos cuantitativos 4

3 ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO *4*

3.1 La figura del observador avanzado en artillería de campaña. **4**

3.1.1 Actividades de fuego indirecto 4

3.1.2 El observador de fuegos 5

3.2 Situación actual de las comunicaciones con los OAV. **7**

3.2.1 Subsistema táctico de TALOS 8

3.2.2 Subsistema técnico de TALOS 8

3.2.3 Red de mando de grupo (voz) 8

3.2.4 Red de mando y tiro de grupo 9

3.2.5 Red TALOS táctico 9

3.2.6. Red de observación 9

3.2.7 Red de tiro de grupo 9

3.2.8 Red de topografía (voz) 9

4 DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS 10

4.1 ALTERNATIVAS PLANTEADAS 10

4.1.1. Establecimiento de estaciones relé con la radio PR4G v3 10

4.1.2. Comunicación por Satélite 12

4.1.3. Comunicación vía radio de banda de alta frecuencia (HF) 13

4.1.4. Comunicación vía radio desarrollada por *software* (SDR) 14

4.2 Análisis DAFO (Debilidades-Amenazas-Fortalezas Oportunidades).....16

4.2.1. Análisis DAFO del uso de la radio PR-4G con relés. 16

4.2.2. Análisis DAFO del uso de comunicación vía satélite 18

4.2.3. Análisis DAFO del uso de radio de banda de Alta Frecuencia (HF) 20

4.2.4. Análisis DAFO del uso de radio desarrollada por software (SDR) 22

***4.3* Método de decisión multicriterio AHP (*Analytic Hierarchy Process*) 24**

4.3.1. Definición de criterios y subcriterios para la selección de alternativas. 24

4.3.2. Aplicación del método AHP por etapas 26

5 CONCLUSIONES 31

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 34

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Encuadramiento orgánico de los equipos OAV [6]..... 7

Figura 2. Órbitas típicas de satélites de comunicaciones. [8]..... 12

Figura 3. Esquema de receptor de doble conversor con IF digital [1] 15

Figura 4. DAFO para el uso de la radio PR-4G con relés para la comunicación con los OAV (Elaboración propia) 16

Figura 5. DAFO para el uso de la comunicación satélite para la comunicación con los OAV. (Elaboración propia) 18

Figura 6. DAFO uso de la radio HF para la comunicación con los OAV. (Elaboración propia).. 20

Figura 7. DAFO uso de la radio SDR para la comunicación con los OAV. (Elaboración propia)22

Figura 8. Jerarquización AHP con objeticos, criterios, subcriterios y alternativas. (Elaboración propia)..... 26

Figura 9. Representación jerárquica AHP [14] 44

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa OAV-NFO-JFO. [10] 6

Tabla 2. Tabla resumen de los análisis DAFO de las cuatro alternativas consideradas (Elaboración propia) 24

Tabla 3. Introducción de criterios, subcriterios y alternativas con programa DLF Herramienta de ayuda a la decisión. (Elaboración propia) 27

Tabla 4. Criterios ordenados de mayor a menor peso relativo en el análisis AHP. (Elaboración propia) 27

Tabla 5. Evaluación de criterios y matriz de pesos con programa DLF Herramienta de ayuda a la decisión. (Elaboración propia). 28

Tabla 6. Evaluación de subcriterios y matriz de pesos con programa DLF Herramienta de ayuda a la decisión. (Elaboración propia). 28

Tabla 7. Evaluación de alternativas y matriz de pesos con programa DLF Herramienta de ayuda a la decisión. (Elaboración propia). 29

Tabla 8. Evaluación de alternativas y matriz de pesos con programa DLF Herramienta de ayuda a la decisión. (Elaboración propia) 29

Tabla 9. Matriz de decisión con programa DLF Herramienta de ayuda a la decisión. (Elaboración propia). 30

Tabla 10. Escala Saaty [13] 44

Tabla 11. Cálculo de la consistencia aleatoria [13] 45

ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AAA: *Anti-Aircraft Artillery*
AAS: Autorización acceso Satélite.
AES: *Advanced Encryption Standard*
AFSO: *Auxiliar Fire Support Oficcer* Auxiliar. Oficial de apoyo de fuegos
AGM: Academia General Militar
AHP: Analytic Hierarchy Process. Proceso analítico jerárquico
ALE: Establecimiento Automático de Llamada

BMS: *Battlefield Management System*.

CIS *Communication and Information Systems* (Sistemas de Telecomunicaciones e Información)
COMSEC *Communication Security* (Seguridad en la Comunicación)
CUD Centro Universitario de la Defensa

DAFO Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades

DEN Destacamento de Enlace
DGAM Dirección General de Armamento y Material

ECM Contramedidas Electrónicas
EPM Medidas de Protección Electrónica
EW *Electronic War* (Guerra Electrónica)

FDC *Fire Director Centre* (Centro director de fuegos)
FDO *Fire Director Oficcer* (Oficial director de fuegos)
FSE *Fire Support Element* (Elemento de apoyo de fuegos)
FSO *Fire Support Oficcer* (Oficial de apoyo de fuegos)

GACA Grupo de Artillería de Campaña
GESCOMET Gestor de Comunicaciones del Ejército de Tierra
GPS *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamiento Global)

HF High Frecuency Alta frecuencia

IP *Internet Protocol* (Protocolo de Internet)
IR *Inconsistency Reason* Razón de inconsistencia
JEME: Jefe del Estado Mayor del Ejército
JFSE: *Joint Fire Support Element* Célula de apoyo de fuego

JTAC *Joint Terminal Attack Controller* Controlador de ataque terminal conjunto

MALE Mando de Apoyo Logístico del Ejército de Tierra
MINISDEF Ministerio de Defensa

NVIS *Near Vertical Incidence Skywave*. Onda celeste de incidencia casi vertical

OAV Observador Avanzado
OTAN Organización del Tratado Atlántico Norte

PC *Post Comander*. Puesto de Mando
PCAV Puesto de Mando Avanzado
PCBON *Post Comander Batallion*. Puesto de Mando de Batallón.
PCMOV Puesto de Mando Móvil
PCPRAL Puesto de Mando Principal
PCR Puesto de Mando Retrasado
Plan MC3 Plan de Modernización de los Sistemas de Mando y Control,
PLM Plana Mayor
PLMM Plana Mayor de Mando
PR4G Radio 4ª Generación

RF Radio Frecuencia
RRC Red Radio de Combate
RTP Red Táctica Principal

S/GT Subgrupo Táctico
SAP Servicio de Acceso a Paquetes
SAS: Solicitud de Acceso Satélite.
SATCOM Comunicación Satélite
SECOMSAT: Sistema Español de Comunicación Satélite.
SIMACET Sistema de Información para el Mando y Control del Ejército de Tierra
SOTM: *Sat On The Move*.

TCP *Transmission Control Protocol* (Protocolo de Control de Transmisión)
TDA Transmisión de Datos Asíncronos
TDAV Terminal de Datos a Alta Velocidad
TDS Transmisión de Datos Síncronos
TFG Trabajo de Fin de Grado.
TRANSEC *Transmission Security* (Seguridad en la Transmisión)

UAF Unidad de Apoyos de Fuego
VAMTAC Vehículo de Alta Movilidad Táctica
VHF *Very High Frequency* (Muy Alta Frecuencia)
VOCODER *Voice Coder (*Codificador de Vo

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Situación y Contexto

La Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN) ha demostrado siempre superioridad en medios aéreos y de fuego en todos los escenarios de operaciones, pero en un futuro próximo, sus Fuerzas Armadas se enfrentarán a un desafío diferente al actual. El nuevo adversario no se tratará de una fuerza insurgente, sino de un enemigo con tecnología avanzada y con capacidades en muchos ámbitos. En este contexto, aparecen conceptos que definen este nuevo desafío:

Near-peer enemy, en el que el adversario no sólo rivalizará en términos de capacidades, sino que también tendrá avanzados sistemas de fuego indirecto, defensa antiaérea (DAA) y podrá operar en otros espacios, como el ciberespacio y el electromagnético, en contraposición con la tradicional superioridad aérea y de fuego de la Alianza Atlántica.

A2/AD, definida como estrategia de anti-acceso y denegación de área que tratará de establecer "burbujas móviles", compuestas de diversos sistemas defensivos y ofensivos. Estas burbujas representarán zonas donde la OTAN tendrá dificultades para operar. Dispondrán de sistemas DAA, contrabatería (C/B), armas antisatélite y medios de guerra electrónica (EW).

Los países occidentales han intensificado sus esfuerzos en la investigación y desarrollo de sistemas de armas avanzados para contrarrestar y neutralizar esta nueva forma de amenaza. Ahora lo más importante es la anticipación a la posible aplicación de esta estrategia A2/AD por parte del adversario, manteniendo la superioridad tecnológica. [11]

En los últimos años, las plataformas de fuego representan una parte fundamental de la artillería moderna y han tenido evoluciones importantes para permitir su adaptación a las nuevas necesidades tácticas y operativas.

El Ejército de Tierra español (ET) está estudiando las opciones para hacer posible la evolución de su artillería de campaña. Estos cambios, que involucran tanto la actualización de sistemas existentes como la incorporación de tecnologías más avanzadas, sitúan al ET español en un lugar estratégico en el ámbito europeo y global de la defensa.

Para materializar estos avances, el Ministerio de Defensa de España (MINISDEF) ha destinado inversiones para actualizar sistemas de armas de artillería y la adquisición de munición avanzada. [12]

Dentro de las prioridades marcadas, destacan la compra de un sistema de lanzacohetes de alta movilidad y la búsqueda de un sustituto moderno para el veterano obús autopropulsado M109.

Los obuses 155/52 y el M109 son fundamentales para la artillería de campaña del Ejército de Tierra.

El 155/52, producido por Santa Bárbara Sistemas fue adquirido hace dos décadas, con el propósito de renovar y modernizar la capacidad artillera del ET español. Estos obuses tienen características destacables, pudiendo alcanzar grandes distancias utilizando municiones especiales.

El M109 ha jugado un papel importante en el Ejército de Tierra durante más de cincuenta años. Después de algunas actualizaciones de este sistema de armas, a corto plazo está prevista su sustitución por otros sistemas más avanzados. Esta necesidad forma parte del ambicioso proyecto Fuerza 2035[1].

[1] Fuerza 2035 es el proceso de planeamiento militar con la finalidad de mantener unas Fuerzas Armadas eficaces que da prioridad al diseño, la experimentación y el equipamiento.

Además de la sustitución del M109, el Ministerio de Defensa también considera la adquisición de artillería autopropulsada sobre ruedas. Si bien aún no se trata de una prioridad inmediata, el ET ha mostrado interés en sistemas como el Caesar de Nexter[2], que está teniendo una aceptación muy amplia en otros ejércitos de nuestro entorno.

Por otro lado, se ha decidido la adquisición del nuevo sistema lanzacohetes de alta movilidad táctica (SILAM), basado en el sistema PULS[3] de la empresa israelí Elbit System, pero cuya producción será principalmente española.

El incremento en alcance y precisión son objetivos claros en cuanto a municiones. Se ha adquirido munición de alcance extendido y el siguiente paso es la incorporación de proyectiles Excalibur. Estos proyectiles, que serán utilizados por el sistema integrado de artillería de campaña, SIAC, tienen capacidades superiores, permitiendo ataques más precisos y desde mayores distancias. [5]

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado (TFG) parte de la propuesta de mejora del Ejército de Tierra (ET) español en cuanto al empleo de artillería de campaña de largo alcance, identificada a partir de lecciones aprendidas de conflictos recientes y otros que se están desarrollando en la actualidad.

Países como Rusia cuentan con sistemas de armas de artillería de campaña, con alcances muy superiores a los de los sistemas con que cuenta el Ejército español. Además, otros países occidentales también disponen de sistemas con capacidades similares a los rusos. Ante esta situación, España ha iniciado, entre otros, el proyecto de adquisición de un nuevo sistema de armas lanzacohetes, el sistema lanzador de alta movilidad, SILAM[4], con un alcance previsto de entre 40 km y 150 km. [3]

Se pone de relevancia la importancia de la artillería de campaña en los conflictos actuales, tomando como ejemplo la guerra en Ucrania y el uso de lanzacohetes Himars suministrados por Estados Unidos. Como consecuencia, España tiene previsto reforzar sus capacidades en este campo.

En este sentido, el Ministerio de Defensa de España ha iniciado un ciclo inversor que incluye la adquisición de un lanzacohetes de alta movilidad, una demanda importante del Ejército de Tierra. [5]

Cuando el ET español cuente con todos estos sistemas de armas previstos a medio plazo va a ser necesario la adaptación también de los sistemas de comunicación asociados a los GACA.

Actualmente, los medios de transmisión en dotación en los GACA, las radios VHF PR4G V3, presentan dificultades para establecer enlaces a distancias superiores a 40 km en áreas con relieve desfavorable. La comunicación con los OAV necesita comunicación de voz y datos para poder utilizar el sistema C2 Talos, pero ambas funciones no son del todo compatibles con su modo SUPERMUX con el que se podrían alcanzar mayores distancias.

Así, este TFG se centra en encontrar soluciones para asegurar el enlace entre los GACA y los OAV a distancias de entre 40 Km y 100 Km, considerando los nuevos sistemas de armas de artillería de largo alcance. Se analizan dos opciones, una primera consistente en adaptar los medios existentes y otra, que propone nuevos sistemas de comunicaciones tácticas para satisfacer las necesidades en un futuro cercano.

[2] Se trata de una nueva generación de armas de artillería. Un obús autopropulsado de 155 mm.

[3] Precise and Universal Launching System

[4] Proyecto español de lanzacohetes múltiples liderados por las empresas españolas Expal y Escribano en colaboración con la israelí Elbit System.

2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

2.1 OBJETIVOS Y ALCANCE

El objetivo principal de este TFG es proponer una alternativa válida y eficiente a los medios de transmisiones actualmente en uso por los observadores avanzados (OAV) de los grupos de artillería de campaña en el ET español.

Para la consecución del objetivo principal descrito se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Identificar las alternativas factibles, según las premisas iniciales y la opinión de expertos entrevistados, para la solución o mejora sustancial de la situación de partida considerada.
- Analizar de forma comparativa, mediante la utilización de las herramientas que se proponen en la metodología de este TFG, las alternativas consideradas factibles, teniendo en cuenta los criterios y subcriterios previamente definidos.
- Seleccionar la alternativa mejor considerada después de la aplicación del análisis comparativo de las mismas.
- Proponer estudios y desarrollos posteriores de tecnologías con potencial para mejorar estos medios transmisión con los OAV.

El alcance de este TFG se centra en proponer soluciones para garantizar el enlace entre los GACA y los OAV en distancias de entre 40 km y 100 km, considerando la situación actual y futura prevista por el ET español, basándolo en la información actual disponible y la opinión de personal experto en los temas tratados y consultados mediante entrevistas centradas y dirigidas hacia aspectos que permitan facilitar su comprensión y posterior análisis.

Para la realización de este TFG se han planteado las tareas por fases, como se muestra en la planificación desarrollada y que se incluye en el anexo IV. Las actividades de este TFG se han planificado en función de los plazos e hitos fijados por el CUD y la AGM en el calendario para la realización de trabajos fin de grado (TFG) y prácticas externas (PEXT) para el curso 2023-24. Se exponen en orden secuencial:

- Definición de la propuesta de estudio y requisitos de partida para el TFG, para lo que ha sido fundamental la colaboración de la directora académica (DIRACA) y el director militar (DIRMIL).
- Búsqueda, estudio y revisión de la bibliografía relativa al tema de estudio propuesto para el TFG, obtenida tanto en fuentes oficiales como en fuentes abiertas.
- Preparación y realización de entrevistas dirigidas a expertos de la unidad donde se han realizado las prácticas externas (PEXT). Tienen como objeto conocer de primera mano la opinión sobre la situación de partida que se plantea para el estudio y orientar posibles opciones de mejora.
- La redacción de la memoria del TFG, previa recopilación y análisis de toda la información, siguiendo todos los apartados propuestos en el mismo.
- La aplicación de la metodología propuesta en este TFG para la selección de la alternativa más recomendable.
- Las conclusiones obtenidas del estudio y análisis anteriores, proponiendo la alternativa de mejora y posibles estudios futuros.
- La defensa oral del Trabajo Fin de Grado (TFG).

2.2 METODOLOGÍA

La metodología empleada ha incluido tanto métodos de carácter cualitativo como cuantitativo. Estos se detallan en los siguientes apartados:

2.2.1. Métodos cualitativos

Revisión bibliográfica

El proceso de análisis y definición de los requisitos de partida comenzará con el estudio exhaustivo de la información relacionada con el TFG y seleccionada previamente, obtenida en fuentes abiertas y otra más específica, procedente de publicaciones oficiales del ET e información técnica de fabricantes de los equipos de las tecnologías consideradas.

Realización de entrevistas a expertos y encuestas

Otra fuente fundamental para la obtención de información ha sido la realización de entrevistas, previamente diseñadas y dirigidas a expertos de la Unidad donde se han realizado las prácticas externas previstas en el plan de estudios, en este caso, la Brigada Galicia VII. El diseño de estas entrevistas se ha enfocado hacia la obtención de los criterios de selección que permitan un análisis posterior por técnicas de análisis multicriterio AHP y DAFO para proponer la tecnología más recomendable.

DAFO

El análisis DAFO (debilidades, fortalezas, amenazas y oportunidades) pretende identificar tanto los puntos fuertes y débiles internos de cada alternativa, como las amenazas y oportunidades externas. Será de gran utilidad la realización del análisis DAFO de las tecnologías planteadas como alternativas de mejora para el mejor conocimiento de estas.

2.2.2. Métodos cuantitativos

Método de decisión Multicriterio AHP.

Para el análisis y valoración de las diferentes opciones que se van a considerar para determinar la más conveniente se utilizarán técnicas de análisis multicriterio AHP.

El Método de Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés *Analytic Hierarchy Process*) fue desarrollado por el matemático Thomas L. Saaty en la década de 1970. Es una metodología utilizada para la toma de decisiones en situaciones complejas que involucran múltiples criterios.

Se basa en la descomposición de un problema en una estructura jerárquica de subproblemas y criterios y en la evaluación de las alternativas en función de estos criterios. En el Anexo III se incluye una descripción detallada de este método de análisis. [13]

3 ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

3.1 La figura del observador avanzado en artillería de campaña.

3.1.1 Actividades de fuego indirecto

Dentro de las actividades de fuego indirecto, los observadores de fuego son responsables tanto de señalar objetivos, solicitar y corregir fuegos, así como de evaluar e informar sobre los resultados. Los observadores van a contar con distinto nivel de especialización, en función de los apoyos de fuego que deban gestionar.

Es importante que estos observadores conozcan los numerosos factores que pueden influir en la precisión de las operaciones, que incluyen desde las condiciones meteorológicas hasta los cálculos balísticos.

El sistema de mando y control cuenta con la presencia de oficiales específicos como el oficial de apoyos de fuego (FSO), asistido por el elemento de apoyos de fuego conjunto (JFSE).

El FSO ofrece una asistencia a unidades operativas en varios niveles, desde brigada hasta subgrupos tácticos (S/GT). En el escalón S/GT, puede haber un equipo diverso de especialistas, que incluye a los observadores avanzados.

Los fuegos indirectos terrestres siguen un protocolo estandarizado establecido por la OTAN. Este protocolo lleva a un mensaje específico llamado petición de fuego.

Las partes principales de la petición de fuego son: Alerta, situación del objetivo y descripción, método de ataque, sistema de ejecución y control de tiro.

Dependiendo de la situación, las peticiones de fuego pueden ser canalizadas a través de la cadena del JFSE o directamente dirigiéndose al elemento que efectúa el tiro, siempre con el JFSE a la escucha.

El observador avanzado es responsable de mantener una comunicación constante con el puesto de mando (PC) de la unidad responsable. Cuando el puesto de observador lo va a desarrollar una persona que no dispone de conocimientos suficientes y bajo determinadas circunstancias, se puede aplicar un procedimiento de fuego de emergencia propuesto por la OTAN. [10]

Para garantizar la fiabilidad de los datos recogidos por el observador es fundamental:

- Abarcar completamente la zona de fuego (ZF) de una unidad, asegurando su cobertura completa.
- La observación no debe ser interrumpida en ningún momento.
- Debe adaptarse, ajustándose a las necesidades de cada nivel de mando y la misión de la unidad, mediante el uso y ubicación más apropiados de los medios de observación.
- La información recogida debe ser precisa y útil, dependiendo del nivel de mando que la organice y el propósito.
- La transmisión y procesamiento de datos debe seguir procedimientos estandarizados. [6]

3.1.2 El observador de fuegos

El observador de fuegos juega un papel crítico en las operaciones militares. Su función principal es identificar y marcar objetivos, solicitar y ajustar el fuego indirecto y posteriormente, evaluar e informar sobre los efectos producidos. Pueden ser:

Observador avanzado (OAV), que opera en primera línea y está certificado para corregir acciones de fuego y proporcionar información de la operación. Son fundamentales para las unidades de artillería de campaña y actúan como sus ojos en el frente.

Observador de grupo: Cumplen funciones parecidas al OAV, pero desde observatorios establecidos por los grupos de artillería de campaña (GACA). Debido a su participación en el levantamiento topográfico, a menudo se encargan de tareas técnicas relacionadas con el disparo, como tiros experimentales.

Observador de morteros (OM): Su principal responsabilidad es localizar objetivos y solicitar y corregir el tiro de morteros. Estos observadores son muy importantes en grupos tácticos, especialmente cuando actúan como el recurso principal en operaciones. En ciertas unidades, como los grupos de caballería, que no disponen de observadores específicos, otros elementos asumen

esta función, actuando como observadores no certificados.

- Controlador de ataque terminal conjunto (JTAC)

Se trata de personal autorizado para dirigir la maniobra de una aeronave en su fase de ataque y para autorizar el uso de armamento. Esto lo posiciona en una relación directa con el mando de la unidad apoyada, a quien le ofrece recomendaciones sobre cómo implementar eficazmente las acciones de apoyo aéreo próximo (CAS), en colaboración con la maniobra terrestre.

- Observador de fuegos conjuntos (JFO) y observador nacional de fuegos (NFO)

El JFO y el NFO están capacitados y certificados para una serie de funciones esenciales en el campo de batalla. Estas incluyen:

Solicitar, controlar y corregir los fuegos superficie-superficie, actuando de manera similar a un OAV en esta función.

Dar información de objetivos a un JTAC. En operaciones de apoyo aéreo próximo (CAS) pueden proporcionar datos importantes para la ejecución de la misión. En algunas circunstancias, previa autorización de un JTAC, pueden hacerlo de forma autónoma.

Acciones CAS de emergencia (E-CAS). En ausencia de un JTAC y si la situación lo demanda, tienen la capacidad de llevar a cabo acciones CAS de emergencia.

El concepto de NFO surge como una variante del JFO, usado principalmente por Estados Unidos. A diferencia del JFO, el NFO tiene permisos adicionales en ciertas circunstancias, como la capacidad de guiar y controlar el fuego aéreo mediante comunicación directa con el piloto de la aeronave. Sin embargo, este rol no es reconocido por todos los miembros de la OTAN. Para llevar a cabo esta tarea, el NFO necesita una serie de certificaciones y entre otros requisitos, un dominio profundo del inglés, similar al nivel exigido a los JTAC [10]. La tabla 1 resume lo tratado anteriormente.

OAV	NFO(1)	JFO(2)
Superficie-superficie	• Superficie-superficie • Información de objetivos al JTAC para CAS 2 y 3 nacional	• Superficie-superficie • Información de objetivos al JTAC para CAS 2 y 3 nacional y multi-nacional (3) • Otros (en su caso)
(1) Sin nivel de inglés. (2) Con el nivel de inglés que se requiera. (3) Directamente al avión cuando esté autorizado por el JTAC.		

Tabla 1. Comparativa OAV-NFO-JFO. [10]

- Equipo de Operaciones Especiales (OE)

Los equipos de operaciones especiales están especializados en la obtención de información de objetivos de alto valor táctico o estratégico.

Estas unidades emplean medios avanzados para adquirir información y a menudo colaboran con la población local. También son capaces de evaluar rápidamente la información y adaptarse a cada situación. Además de solicitar apoyos de fuego superficie-superficie, estos equipos pueden actuar como JFO/NFO o incluso como JTAC para controlar apoyos aéreos.

- Equipo/destacamento de artillería en la compañía de reconocimiento avanzado (CRAV)

Específico de unidades paracaidistas, este destacamento tiene como misión solicitar y guiar apoyos de fuego terrestre y aéreo. También realizan reconocimientos específicos para las unidades de artillería y obtienen información para las fuerzas. Están entrenados en habilidades y capacidades

similares al personal principal de la CRAV.

- Observador de fuego naval de superficie (*Spotter*)

El observador de fuego naval de superficie, generalmente pertenece a la Armada y está especializado en la identificación de objetivos terrestres para solicitar, corregir y ajustar fuego naval de apoyo.

- Observador no certificado

A diferencia de los que están certificados, un observador no certificado no ha sido entrenado específicamente para controlar el fuego indirecto. Estos observadores se hacen necesarios en situaciones críticas o de emergencia, particularmente cuando están bajo fuego enemigo. En unidades de nivel GT y S/GT, dada la falta de observadores específicos, no es raro que se utilicen observadores no certificados para corregir fuegos de mortero. [10]

La red de observación desempeña un papel fundamental en la adquisición de objetivos, al identificar la presencia de estos, determinar su posición precisa y el contexto, proporcionar detalles específicos sobre sus características, así como monitorear y rastrear los cambios en su posición y comportamiento.

Esta red ha sido integrada en los grupos de artillería de campaña de las brigadas orgánicas polivalentes, donde cuentan con equipos de observadores avanzados. Estos equipos están encuadrados en la sección de enlace de la batería de plana mayor. Además, estos equipos de observador avanzado están destacados en las unidades de combate, específicamente en entidades de nivel S/GT o inferior. Su operatividad y coordinación están vinculadas al elemento de apoyo de fuegos (FSE) de grupo táctico, relación que es gestionada por un destacamento de enlace DEN como se muestra en la figura 1. [6]

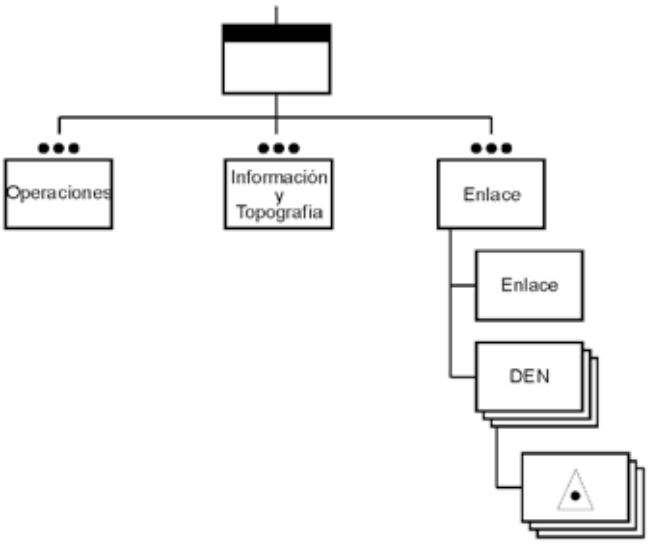


Figura 1. Encuadramiento orgánico de los equipos OAV [6]

3.2 Situación actual de las comunicaciones con los OAV.

La transmisión de peticiones de fuego y ajustes de la dirección de disparo a través de medios radio es un proceso complejo que requiere de protocolos estandarizados.

Esta transmisión de información crítica se realiza mediante el avanzado sistema de mando y

control de apoyo a fuegos C2APOFU[5] (TALOS). Para garantizar la operatividad, es esencial que TALOS sea interoperable con el sistema de gestión y control de la unidad operativa principal, así como con sistemas de mando y control de los sistemas de fuego indirecto (IFS) aliados. [10]

El sistema C2APOFU (TALOS) se estructura en dos subsistemas diferenciados:

3.2.1 Subsistema táctico de TALOS

– Permite la planificación y ejecución de operaciones.

– Realiza la gestión táctica del fuego.

– Facilita la integración logística, coordinando recursos y servicios.

– La recopilación, análisis y presentación de datos para la ayuda a la toma de decisiones.

– Sistema de mensajería entre unidades.

3.2.2 Subsistema técnico de TALOS

Se centra en la dirección técnica del disparo, garantizando la precisión y ejecución del fuego. Así como:

- Recepción, coordinación y transmisión a los PC de las unidades de apoyos de fuego las peticiones de fuego y listas de objetivos de sus observadores.
- Gestión de informes meteorológicos.
- Sistema de mensajería técnica.
- La creación y transmisión de instrucciones de tiro.

Un GACA, al proporcionar apoyo directo (A/D) a una unidad, prioriza la red radio por su capacidad de respuesta rápida y adaptación en movimiento. Esta red del GACA se segmenta en redes internas especializadas, como la red principal de mando, la red TALOS táctica y la red de observación, cada una con funciones y responsabilidades específicas. [10]

La red radio del GACA en un contexto táctico se estructura en diversas mallas internas, cada una con funciones y cometidos específicos. A continuación, se detallan estas redes y sus características.

3.2.3 Red de mando de grupo (voz)

Esta red constituye la principal vía de comunicación dentro del grupo. Todas las estaciones del grupo tienen potencialmente la capacidad de operar en ella.

Se emplea en la comunicación entre los puestos de mando (PC) del grupo y sus unidades subordinadas. También con el JFSE de brigada, el JFSE de los grupos tácticos y observatorios de grupo.

Se puede utilizar para el Talos técnico, si no fuera posible con las redes establecidas para ello para la dirección técnica de tiro.

El JFSE de brigada hace uso de esta red para la activación de la red TALOS táctico.

[5] El ET español en la actualidad utiliza como sistema de mando y control de apoyo a fuegos el sistema TALOS.

3.2.4 Red de mando y tiro de grupo

Esta red tiene la capacidad de transmitir datos y si los medios disponibles lo permiten, también voz. Puede bifurcarse en dos redes distintas, en función de la disponibilidad y uso de los medios de los distintos grupos: la red TALOS táctico y la red de observación.

3.2.5 Red TALOS táctico

Su finalidad principal radica en las funciones de mando y control. Facilita el planeamiento y dirección táctica del tiro, permitiendo el planeamiento de la maniobra y la inteligencia de objetivos a través del sistema TALOS táctico.

Como red prioritaria en la transmisión de datos, facilita la comunicación entre los órganos de enlace (JFSE de brigada y JFSE de GT) con los PC del GACA y otros elementos tácticos que necesiten establecerse.

3.2.6. Red de observación

Esta red conecta el PC con los JFSE de GT, centros directores de fuego (FDC) de grupo y equipo de apoyos de fuego conjunto (JFST / OAV). Se utiliza principalmente como red prioritaria en fonía.

3.2.7 Red de tiro de grupo

Estas redes de tiro son comúnmente redes de datos del sistema C2APOFU (TALOS técnico). Mediante esta red se efectúa la dirección técnica del tiro.

Genera automáticamente la mensajería durante la ejecución del fuego (como mensaje al observador, piezas listas, fuego, etc.), así como información al órgano que planeó el fuego sobre su estado de ejecución y en determinados casos, la autorización o denegación de la ejecución.

Conecta todos los centros directores de fuegos (FDC) con los JFST/OAV, destacamento de enlace, coordinación y observación (DECO) y el destacamento de reconocimiento (DRECO), pudiendo extenderse hasta las piezas.

Aunque se prioriza la transmisión de datos en esta red, también puede operar en fonía bajo la dirección del oficial director de fuegos (FDO).

En circunstancias específicas, el FDC del grupo puede conectarse con las piezas. Sin embargo, antes de ejecutar esta acción, es necesario evaluar que, al añadir las piezas a la red de observación (si está operativa), no se sature la misma, lo que podría causar interrupciones en el tráfico de mensajes entre los OAV, DECO y FDC.

3.2.8 Red de topografía (voz)

Esta red se establece de manera auxiliar, dependiendo de las necesidades de información de los equipos de topografía. Se utiliza especialmente para difundir mensajes relacionados con trabajos topográficos. Esta red se emplea para sustituir a la red de mando y tiro si los equipos de topografía no están integrados en ella.

El sistema BMS (*Battlefield Management System*), diseñado específicamente para pequeñas unidades de infantería y caballería, es una herramienta esencial que proporciona actualizaciones de posición en tiempo real. Para un observador en el terreno, la integración con BMS garantiza la coordinación y la precisión en la ejecución de disparos. Tanto BMS como TALOS están diseñados para integrarse de manera efectiva con el sistema de mando y control nacional del Ejército de Tierra

(SC2NET)[6], estableciendo un sistema operativo eficiente. [10]

4 DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este apartado se aplican los análisis comparativos de las alternativas consideradas factibles para dar respuesta al objetivo principal que se ha propuesto en este TFG. Estas alternativas han sido identificadas a través de análisis bibliográfico y, en primer lugar, se definen cada una de las tecnologías de comunicación táctica que se consideran en el posterior análisis, que permite seleccionar la más recomendable para esta función.

Las herramientas utilizadas en este análisis comparativo son las que se mencionan en el apartado metodología: El análisis DAFO (Debilidades-Amenazas-Fortalezas-Oportunidades), que se ha aplicado a cada una de las tecnologías consideradas como alternativas y el método de decisión multicriterio AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

Con la aplicación de ambas herramientas se ha llegado a la selección de la más recomendable para la aplicación planteada en este TFG y que constituye su objetivo principal.

Todo este análisis sirve como base para extraer de manera justificada las conclusiones y proponer, si proceden, acciones y estudios futuros.

4.1 ALTERNATIVAS PLANTEADAS

Las alternativas que se plantean en este punto, consideradas opciones factibles[7] en base a las premisas de partida y que pueden representar un potencial de mejora importante para la situación que se describe en este TFG son:

- Utilización radio PR4G v3 estableciendo estaciones relé
- Comunicación por satélite (SATCOM)
- Comunicación vía radio de banda de alta frecuencia (HF)
- Comunicación vía radio desarrollada por *software* (SDR)

En los apartados siguientes se hace una descripción detallada de cada una de ellas para, posteriormente, realizar el análisis comparativo según la metodología prevista.

4.1.1. Establecimiento de estaciones relé con la radio PR4G v3

Dentro de la variedad de dispositivos de comunicación disponibles para el Ejército de Tierra, el radioteléfono PR4G, del fabricante francés Thales, es uno de los más populares y utilizados. Estos dispositivos están disponibles en varias versiones, siendo la versión v3 la más reciente y avanzada, superando en prestaciones a sus predecesoras.

Aunque la denominación técnica precisa de este transceptor es PR4GE F@stnet, es comúnmente conocido como PR4G v3.

Existen principalmente dos configuraciones en las que se puede encontrar el PR4G: la configuración portátil, conocida como *man-pack* y la configuración vehicular, diseñada específicamente para ser instalada en vehículos.

El radioteléfono PR4G v3 puede ser empleado para diferentes tipos de transmisiones, ya sea de voz (fonía), de datos o como un relé, bien como formato analógico o digital.

El PR4G v3 requiere un cambio manual para operar en modo de transmisión o recepción. El

[6] SC2NET: Utilizado en escalones de brigada, división, así como superiores.
[7] Referido a las alternativas de tecnologías que son válidas y que se adaptan a las necesidades planteadas en este estudio.

equipo incluye un *vocoder*[8] interno que mejora la calidad de la señal en entornos con interferencias cuando se utiliza en modo voz.

En términos de seguridad, el PR4G v3 incorpora módulos TRANSEC (que permite el salto de frecuencia) y COMSEC (para cifrado). Estos módulos garantizan que la voz o los datos sean cifrados, evitando cualquier escucha no autorizada o intrusiones en la red. Una vez que se establece una clave COMSEC, el cifrado de las comunicaciones se realiza automáticamente.

El PR4G v3 tiene un rango de frecuencia de operación entre 30 a 87,975 MHz. La selección de canales se realiza mediante un sintetizador que permite un espaciado de 25 kHz entre canales. El dispositivo puede trabajar con hasta 2.320 frecuencias y tiene la capacidad de memorizar hasta 7 canales.

En función de la configuración que se adopte, la radio PR4G v3 dispone de varias potencias de emisión. Para la configuración portátil la potencia puede ser de 0,5 W, 5W y 10W y para la vehicular de 0,28W, 5W y 50W.

El alcance de la radio PR4G v3 que opera en la banda VHF, se ve influenciado por factores como la potencia de transmisión, el relieve del terreno o las interferencias.

Con la configuración portátil (*man-pack*), el alcance es de 6 a 8 Km con la antena de varilla o fleje y entre 12 y 15 Km utilizando la antena VHF en mástil HC30.

Para la configuración vehicular, el alcance está entre 20 y 25 Km con la antena vehicular 3088 VM y entre 45 y 50 con antena sobre el mástil HC30.

Los Equipos/Receptores (E/R) de la familia PR4G están diseñados para facilitar la transmisión de datos vía radio y para ello incorporan dos tipos de interfaces.

Interfaz síncrona: Esta interfaz está presente en todas las versiones de los E/R de la familia PR4G. Con respecto a la velocidad de transmisión, la versión PR4G v3 permite alcanzar una velocidad máxima de 43.000 bits por segundo (bits/s).

Interfaz asíncrona: Se encuentra en las versiones PR4G v2 y v3 de los E/R. En la versión PR4G v3, esta interfaz permite una velocidad de transmisión máxima de 57.600 bits/s.

La radio PR4G opera con el protocolo de red IP (*Internet Protocol*). Esto facilita la capacidad de establecer redes de datos propias y también su integración en redes existentes. Presenta dos modos de trabajo distintivos: IP/SAP e IP/MUX.

Para operar en estos modos, se requieren direcciones IP que el sistema genera automáticamente según el número de abonado. Sin embargo, en determinadas situaciones, estas direcciones IP se pueden modificar utilizando un *software* de gestión para el equipo. La instalación de este *software* no está dentro de las capacidades habituales de un operador y tiene que hacerlas un planificador.

La función relé en los radioteléfonos de la familia PR4G tiene como principal objetivo ampliar el alcance de la comunicación.

Una estación relé típica está formada por dos radios, cada una de estas radios operando en un canal distintos. Estas radios están conectadas por un cable, permitiendo que la información sea transmitida de una radio a la otra, funcionando como un puente entre las dos mallas.

Existen dos categorías de relé en función de la naturaleza y el formato de la información que se va a transmitir:

El relé analógico que se emplea cuando, al menos, uno de los canales de la estación relé opera en una frecuencia fija analógica, ya sea FFC o FFG. En esta configuración, únicamente se retransmite la voz.

[8] El *vocoder* es un analizador y sintetizador de voz

El relé digital que se utiliza cuando ambos canales de la estación relé trabajan en modo digital, lo que puede incluir modos como SFR, BCL, MIX, ORTO o FD. En esta configuración son retransmitidos tanto la voz como los datos. [7]

4.1.2. Comunicación por Satélite

En la actualidad se han desarrollado las estaciones *on the move.* Estas estaciones son parte del nuevo paradigma de medios CIS, destinados a mejorar las capacidades de las unidades del ET. Su principal ventaja es que están diseñadas para proporcionar enlaces satélites de alta velocidad, incluso mientras el vehículo está en movimiento. Esto las hace particularmente útiles para unidades pequeñas, eminentemente móviles que generalmente dependen de la red radio de combate para sus comunicaciones.

Los equipos *on the move* ofrecen flexibilidad a las operaciones de mando y control facilitando movilidad a las unidades que los utilizan. Una de sus principales características es su capacidad para aprovechar de manera óptima el ancho de banda disponible, garantizando así una comunicación eficiente y sin interrupciones.

Otra característica clave de estos satélites es su órbita. Como se muestra en la figura 2, de acuerdo con las altitudes en las que se encuentran, las órbitas de los satélites de comunicación se clasifican en tres categorías principales:

- LEO (*Low Earth Orbit*): Estos satélites se encuentran en altitudes que oscilan entre los 500 km y los 900 km.
- MEO (*Medium Earth Orbit*): Están posicionados a una distancia que varía entre los 5.000 km y los 12.000 km.
- GEO (*Geostationary Orbit*): Estos satélites mantienen una altitud constante de 36.000 km.

La selección de la órbita adecuada para un satélite influye directamente en muchos aspectos del diseño técnico y operativo del sistema de comunicación.

En lo que respecta a la cobertura proporcionada por estos satélites, se distinguen dos tipos: la cobertura geométrica y la cobertura radioeléctrica. La primera se refiere a la porción de superficie terrestre que es visible desde el satélite y se puede visualizar como un casquete esférico delimitado por un cono que es tangente a la Tierra, partiendo desde el satélite. Por otro lado, la cobertura radioeléctrica es un área menor en comparación con la cobertura geométrica. Esto se debe a que las antenas de las estaciones terrestres requieren un ángulo de elevación mínimo para evitar obstáculos y reducir al máximo la interferencia o captación de ruido proveniente de la superficie terrestre. [8]

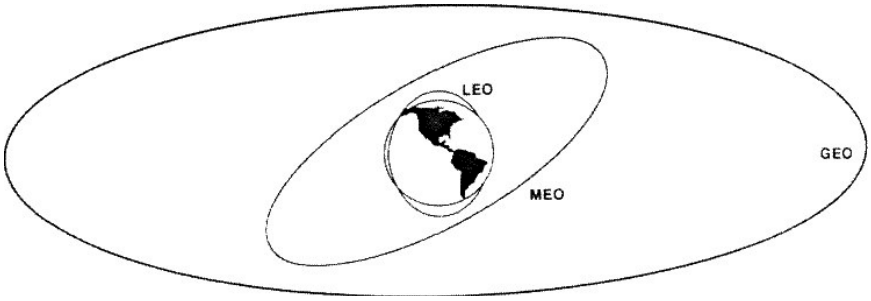


Figura 2. Órbitas típicas de satélites de comunicaciones. [8]

El sistema español de telecomunicaciones militares por satélite (SECOMSAT), representa un conjunto estratégico de comunicaciones destinado a las operaciones militares de España. Su estructura se basa en satélites que se ubican en órbita geoestacionaria (GEO). Esta peculiaridad les permite permanecer en una posición constante respecto a un punto fijo en la Tierra, facilitando así la comunicación continua y estable. Los satélites principales del sistema son:

Spainsat

- Operador: Hisdesat.
- Posición orbital: Se encuentra estratégicamente colocado en posición orbital de 30º W.
- Usuario principal: El principal usuario de este satélite es el Ministerio de Defensa de España, identificado como MINISDEF.
- El SPAINSAT también presta servicios a gobiernos aliados que tienen acceso secundario a estos.

Xtar-Eur

- Este satélite es operado por la empresa XTAR, fruto de la colaboración entre LORAL y Hisdesat.
- Posición orbital: Se ubica en una posición orbital de 29º E.
- Redundancia: Una de sus características es que ofrece una capacidad redundante respecto al satélite dedicado, lo que significa que puede asumir la carga de comunicaciones en caso de fallo o sobrecarga del otro satélite.
- Usuarios: El Xtar-Eur está diseñado para proporcionar capacidad a usuarios gubernamentales.

Las capacidades del SECOMSAT se complementan con diferentes terminales que varían según su forma de operación y las circunstancias de instalación. Estos se clasifican en:

Permanentes, cuando los terminales están destinados a ofrecer servicio a cuarteles generales u otros organismos que se encuentran en instalaciones fijas. Estos terminales no están diseñados para ser trasladados y garantizan la comunicación en su lugar de emplazamiento.

Desplegables que están diseñados para ofrecer servicios a los usuarios en ubicaciones concretas de forma temporal.

En Movimiento que son terminales que proporcionan servicios de comunicación al usuario incluso durante su desplazamiento. Dentro de esta categoría se encuentra el SOTM, que es un terminal que ha sido propuesto como alternativa de estudio para este Trabajo Fin de Grado (TFG). [8]

El terminal SOTM (*Satellite-On-The-Move*) proporciona comunicaciones de banda ancha por satélite a vehículos en movimiento, operando en la banda X.

Está compuesto del subsistema de radio frecuencia (RF), el subsistema de banda base que procesa las señales digitales antes de ser convertidas a señales de RF y viceversa y el subsistema de alimentación que suministra la energía necesaria para el funcionamiento de todos los componentes y subsistemas del terminal. [8]

4.1.3. Comunicación vía radio de banda de alta frecuencia (HF)

La radio de alta frecuencia HF (*High Frequency*) opera en un rango de frecuencias que oscila entre 3 y 30 MHz. Aunque las comunicaciones de largo alcance se realizan específicamente entre los 4 y 18 MHz, el segmento que va de los 18 a los 30 MHz también puede ser utilizado para

comunicaciones, dependiendo de factores tales como las condiciones de la ionosfera y la hora del día.

No todas las frecuencias están destinadas a un uso general. Por eso, se ha establecido un sistema organizado de asignación de frecuencias que tiene en cuenta diversos servicios de radio. Algunos de estos servicios incluyen a la aviación, navegación marítima, operaciones militares, funciones gubernamentales, servicios de radiodifusión y a la comunidad de radioaficionados.

Esta asignación no se establece arbitrariamente sino de conformidad con acuerdos tratados internacionalmente que garantizan el uso armonizado del espectro HF en diferentes países y regiones. [4]

La radio de alta frecuencia (HF) tiene como modo de propagación la onda ionosférica, aunque existen otras modalidades de transmisión en esta banda, como la propagación por onda terrestre y la comunicación basada en la línea de visión.

El desarrollo de las comunicaciones por alta frecuencia (HF) ha llevado a establecer protocolos y estándares para mejorar su funcionamiento.

El protocolo de enlace automático de cuarta generación (4G ALE) es una innovación importante, que permite diferentes anchos de banda, variaciones de patrones de modulación y diferentes parámetros de detección y corrección de errores.

Permite a las estaciones intercambiar información sobre sus capacidades, tipos de tráfico esperado y otros parámetros.

Con todas estas características, el 4G ALE no solo refuerza la eficiencia en la comunicación, sino que también sienta las bases para sistemas automatizados muy fiables, fundamentales en el panorama actual de las telecomunicaciones. [2]

Como radios HF tácticas podemos citar los modelos que mejor se adaptan a los requisitos de la aplicación que nos ocupa, la Falcon III RF-7800H-MP de fabricante norteamericano L3Harris, la TRC 3700 HF de la compañía francesa Thales y la HF-8000 del grupo israelí Elbit Systems.

Todos estos equipos disponen de los atributos básicos para su uso como medio de transmisión con los OAV en un grupo de ACA.

Naturalmente, en cuanto a alcance, los tres cumplen sobradamente las distancias requeridas. Considerando la seguridad, utilizan los estándares de encriptación de aplicación para estos entornos, disponen de establecimiento automático de enlace (ALE), suficiente capacidad de transmisión de datos, sistema de posicionamiento GPS integrado, posibilidad de integración con equipos actualmente en dotación y soporte técnico por parte del fabricante. Además, estos tres dispositivos tienen características definidas por *software* (SDR) lo que permite actualizaciones para adaptaciones futuras.

Si bien, todos estos dispositivos cumplen los requisitos básicos para la función definida en el objetivo principal de este TFG, es la Falcon III RF-7800H-MP de L3 Harris, la considerada más recomendable por los expertos entrevistados, además de sobresalir claramente en algunas características consideradas fundamentales para el enlace con los OAV, como son, la posibilidad de operar tanto en la banda HF como VHF, la capacidad de transmisión de datos, con hasta 120 kbps, tasa muy superior a la ofrecida por los otros dos equipos, establecimiento automático de enlace (ALE) 2G, 3G y 4G e interoperabilidad con las radios HF Falcon II RF-5800H, actualmente en dotación en el ET español.

4.1.4. Comunicación vía radio desarrollada por *software* (SDR)

La radio definida por *software* (SDR) supone un avance en el ámbito de las comunicaciones tácticas por radio que permite implementar con *software* adaptaciones del sistema para diferentes

situaciones.

Esta adaptación basada en el *software* ofrece mucha flexibilidad a esta tecnología ya que la configuración del sistema de comunicación SDR se determina mediante aplicaciones o formas de onda programadas en los equipos.

Estos sistemas SDR se pueden configurar durante la operación, adaptándose a las circunstancias de las misiones en tiempo real.

Hay un gran consenso en el ámbito de las comunicaciones tácticas sobre que la radio SDR va a revolucionar las formas de transmisión convencionales, de una manera más flexible y capaz de adaptarse a cada entorno de operaciones.

A diferencia de los sistemas de comunicación convencionales, que requieren un *hardware* específico, las SDR pueden adaptarse rápidamente a cada necesidad tan sólo actuando sobre el *software*.

Destacan también por la capacidad de realizar análisis avanzados de la señal, mediante la identificación de patrones de salto de frecuencia o demodulación de la señal

Por parte de las Fuerza Armadas se plantea la conveniencia de investigar la utilización de esta tecnología SDR para apoyo a la guerra electrónica (EW).

Las Fuerzas Armadas buscan no solo proteger su acceso y uso del espectro, sino también impedir o limitar el acceso del adversario al mismo. En este contexto, los sistemas SDR son interesantes para llevar a cabo medidas de apoyo de guerra electrónica (ESM).

El propósito principal es explorar y maximizar las capacidades de los sistemas SDR en el contexto de la EW táctica, especialmente en áreas como la radiogoniometría, la exploración del espectro de frecuencias y la interceptación de comunicaciones digitales.

Tradicionalmente, las radios basadas en *hardware* se apoyaban en operaciones matemáticas que se ejecutaban en circuitos electrónicos específicos contenidos dentro de la misma radio. Esta metodología de procesamiento de señales ha experimentado una transformación con la llegada de la programación digital. Los ordenadores actuales han permitido que estas operaciones matemáticas se realicen a través de *software*, dando lugar a lo que conocemos como radio definida por software o SDR.

Una configuración que se adopta en los receptores SDR es la del receptor de doble conversor con frecuencia intermedia, IF (*Intermediate Frequency*), cuyo mecanismo de operación se muestra en la figura 3. [1]

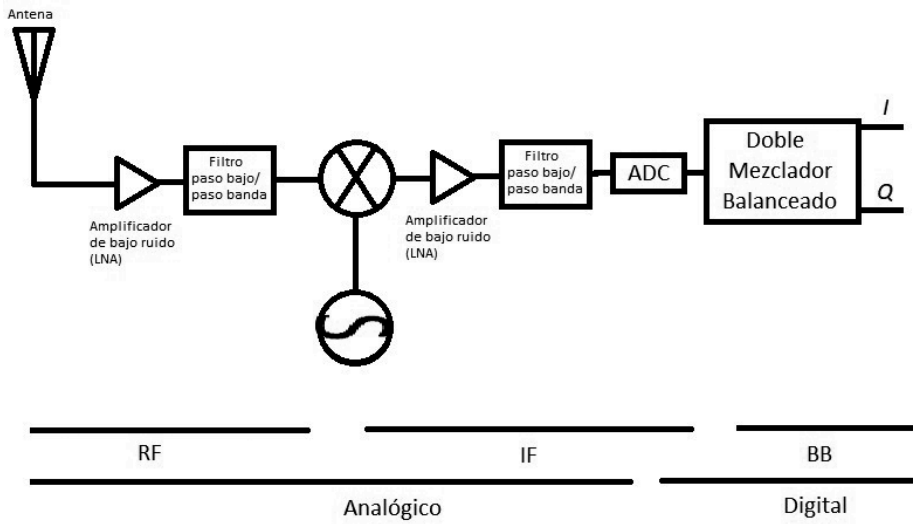


Figura 3. Esquema de receptor de doble conversor con IF digital [1]

En la actualidad, entre las radios tácticas desarrolladas por software (SDR), podemos citar la Bittium Tough SDR de fabricación finlandesa, la alemana serie Severon de Rohde&Swarz, la Synaps V de la compañía francesa Thales o la serie E-Lynx del fabricante israelí Elbit System.

4.2 Análisis DAFO (Debilidades-Amenazas-Fortalezas Oportunidades)

En este apartado se realiza el análisis DAFO de cada una de las cuatro alternativas propuestas.

4.2.1. Análisis DAFO del uso de la radio PR-4G con relés.

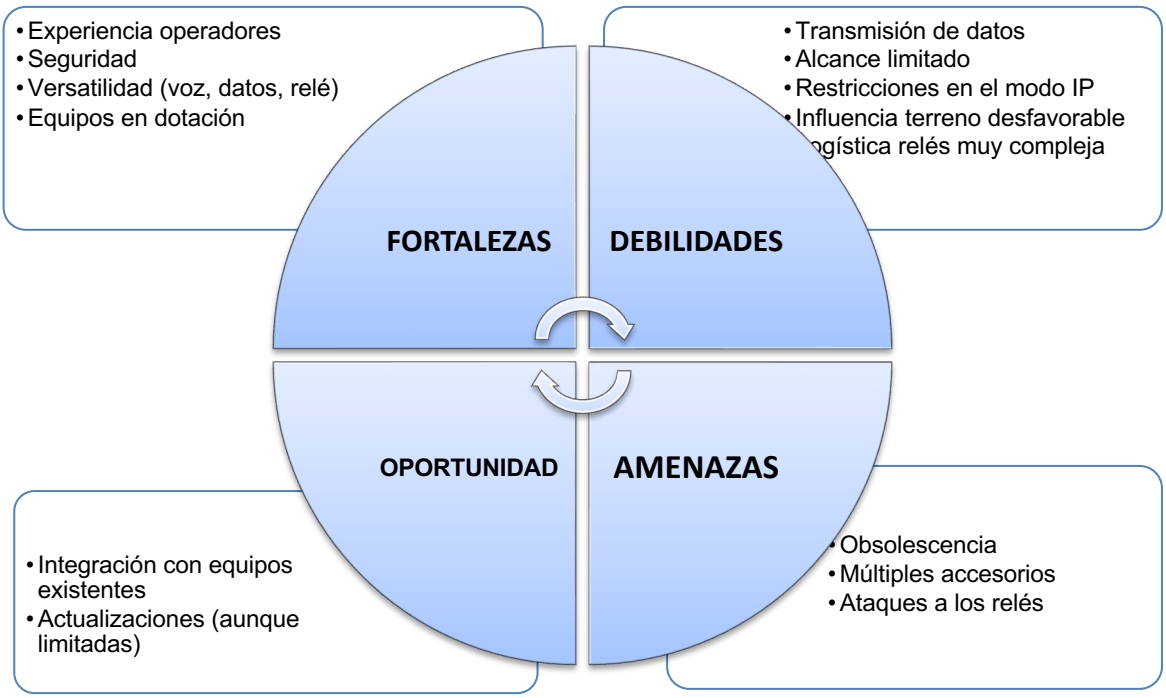


Figura 4. DAFO para el uso de la radio PR-4G con relés para la comunicación con los OAV (Elaboración propia)

Fortalezas

- La radio PR4G v3 es un equipo versátil y polivalente que permite la transmisión de voz y datos simultáneamente o funcionar como relé mediante la formando de mallas para hacer posible la comunicación a mayores distancias.
- Puede realizar comunicaciones seguras gracias a los módulos TRANSEC (Salto de frecuencia) y COMSEC (Cifrado).
- Está disponible en versión portátil (*man-pack*) o vehicular.
- Estos equipos están en dotación actualmente y se utilizan desde hace décadas en cada una de sus versiones, por lo que el personal encargado de su manejo está bastante familiarizado con su uso.

Debilidades

- Su alcance es limitado debido a que la transmisión de radio en banda VHF es susceptible de ser afectado en zonas de difícil orografía.
- Tanto en su modo IP/SAP como IP/MUX ofrece un ancho de banda muy limitado para la transmisión de datos que se necesita actualmente.
- El número de abonados en modo IP puede ser insuficiente para operaciones grandes ya que está limitado a 32 abonados.
- La logística de su operación en modo de relé es compleja, ya que implica una organización que necesitaría mucho personal y que aumentaría con el número de equipos necesarios para formar la malla.

Oportunidades

- No sería necesario la compra de nuevos equipos porque se utilizarían los medios existentes actualmente en dotación.
- Puede operar integrándolo junto con los equipos existentes.
- Aunque sus actualizaciones son limitadas, las adaptaciones tecnológicas de versiones modernas de esta radio PR4G podrían ampliar sus prestaciones.

Amenazas

- Accesorios necesarios: Las diferentes antenas y otros accesorios, necesarios en función de las circunstancias, que permiten aumentar el alcance, podrían requerir una logística excesiva.
- Aparición de otras tecnologías: Los nuevos sistemas de transmisión de otras tecnologías podrían acelerar su obsolescencia.
- Ataques a los relés: Los relés serían objetivos muy vulnerables por el adversario. Esto pondría en juego el éxito de la operación.
- Configuración en modo relé: Requiere una instalación complicada para asegurar que la malla del sistema es operativa.

Considerando la información extraída del análisis DAFO para esta tecnología, podemos decir que la radio PR4G v3 ha sido durante varias décadas un equipo que ha asegurado una comunicación eficaz para la función de los observadores avanzados en los grupos de artillería de campaña. No obstante, para el nuevo escenario que se plantea en este TFG, en el que los requisitos más importantes son el alcance y la capacidad de transmisión de datos no parece ser el más apropiado teniendo en cuenta otras opciones. La operación en modo relé no sería suficiente para cubrir las distancias que ahora se plantean. Además, la compleja logística para el montaje de los relés sería otro punto débil a tener en cuenta.

Este equipo presenta también limitaciones en cuanto a la capacidad de transmisión de datos, que es escasa para los requisitos de ancho de banda que precisan aplicaciones asociadas al desarrollo de la función de los OAV, como el uso de la aplicación Talos.

También su dependencia del uso de antenas con distinta configuración, para asegurar la transmisión a estas distancias, podría presentar limitaciones en cuanto a su transporte y logística.

Además, las operaciones podrían verse comprometidas, ya que las estaciones relé podrían ser objetivo de ataque enemigo. También se convierte en amenaza para esta tecnología, la obsolescencia por la aparición de otras que ofrecen mayores ventajas para los nuevos escenarios que se describen. [7]

4.2.2. Análisis DAFO del uso de comunicación vía satélite

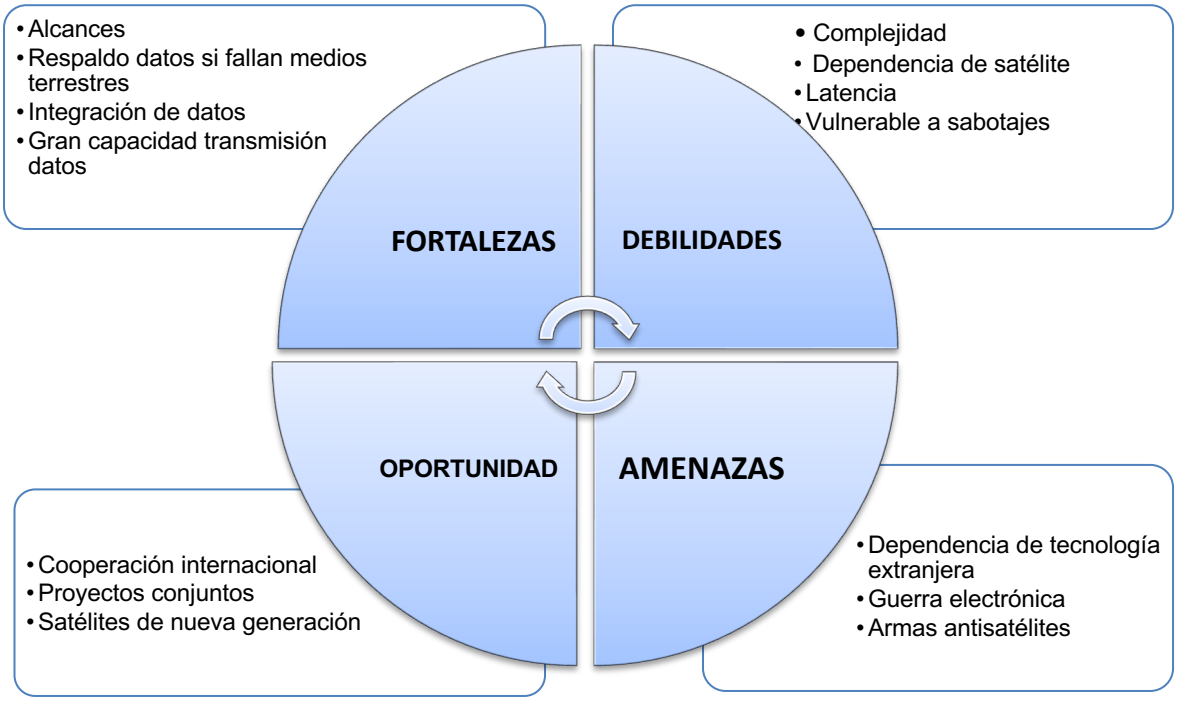


Figura 5. DAFO para el uso de la comunicación satélite para la comunicación con los OAV. (Elaboración propia)

Fortalezas

- La comunicación satélite permite las transmisiones a grandes distancias y su señal no se ve afectada por el relieve del terreno.
- En la actualidad están disponibles las versiones portátiles, vehiculares y fijas.
- Se podría utilizar como respaldo para la información si fallan las comunicaciones terrestres.
- Dispone de gran capacidad para la transmisión de datos, facilitando el manejo de paquetes de información, incluso de imágenes y videos. También se puede integrar el sistema C2 Talos.

Debilidades

- El retardo de la señal satélite (*satellite delay*) puede ser un problema cuando se precisa respuesta en tiempo real.
- Se requiere una inversión inicial alta en tecnología e infraestructuras, así como para su operación, mantenimiento y actualización.
- Es susceptible de ser objeto de interferencias intencionadas.
- Depende de un satélite asociado. Esto puede provocar que la comunicación se interrumpa si el satélite tiene algún problema.
- Puede ser objetivo de ataque y sabotaje.

Oportunidades

- Los avances de los nuevos satélites de comunicación presentan mejoras en las características, como la capacidad de transmisión de datos y el retardo en las comunicaciones. También se está potenciando el desarrollo de satélites que operen en órbita baja (LEO), que tienen un coste menor.
- Mediante acuerdos de cooperación internacional, España puede beneficiarse del desarrollo tecnológico, compartir conocimiento, capacidades e infraestructuras en común con otros países de su entorno.
- A corto plazo, se plantean soluciones para su integración con otras tecnologías, combinando las comunicaciones satélites con otras tecnologías como sistemas de transmisiones terrestres o vehículos aéreos no tripulados (UAV).
- Se van a fomentar proyectos conjuntos dentro de la OTAN y la UE para el desarrollo de tecnologías y su implementación.

Amenazas

- Guerra electrónica (EW). Los posibles adversarios están invirtiendo continuamente en mejorar sus capacidades de guerra electrónica, encaminadas a influir y alterar las comunicaciones.
- Los satélites de comunicación son objetivos preferentes de ataque con armas antisatélite (ASAT)[9] en caso de conflicto.
- La necesidad de tener que importar componentes y repuestos para las instalaciones a través de proveedores de otros países puede suponer un riesgo para el mantenimiento y la actualización de estos sistemas.
- Las regulaciones nacionales e internacionales pueden afectar negativamente al desarrollo de los avances tecnológicos.

Por tanto, según el análisis DAFO, podemos afirmar que las transmisiones por satélite permiten comunicaciones tácticas en áreas remotas e inaccesibles. Tienen la capacidad para poder intercambiar grandes cantidades de datos, permitiendo trabajar con imágenes y videos, lo que supone una ventaja en operaciones militares.

El retardo de la señal puede ser una desventaja en aplicaciones que requieren una operación en tiempo real. Otro inconveniente es la inversión inicial requerida en medios tecnológicos e infraestructura, así como los gastos elevados en mantenimiento y actualizaciones.

En cuanto a las oportunidades destacan el desarrollo de satélites de nueva generación, la posibilidad de alianzas estratégicas con países del entorno para facilitar el acceso a la tecnología, experiencia y de infraestructuras, compartiendo los costes asociados.

Otros aspectos positivos son la integración en un futuro próximo con otras tecnologías y los proyectos conjuntos en el contexto de la OTAN o la UE, dirigidos a su desarrollo e implantación.

Como aspectos que representen amenazas para esta tecnología podemos destacar la guerra electrónica (EW), la excesiva dependencia de tecnología y proveedores de otros países y el desarrollo de armas antisatélite (ASAT) por parte de posibles adversarios. [8]

[9] En la actualidad, se supone que este tipo de armas sólo las poseen Estados Unidos, Rusia, China e India.

4.2.3. Análisis DAFO del uso de radio de banda de Alta Frecuencia (HF)

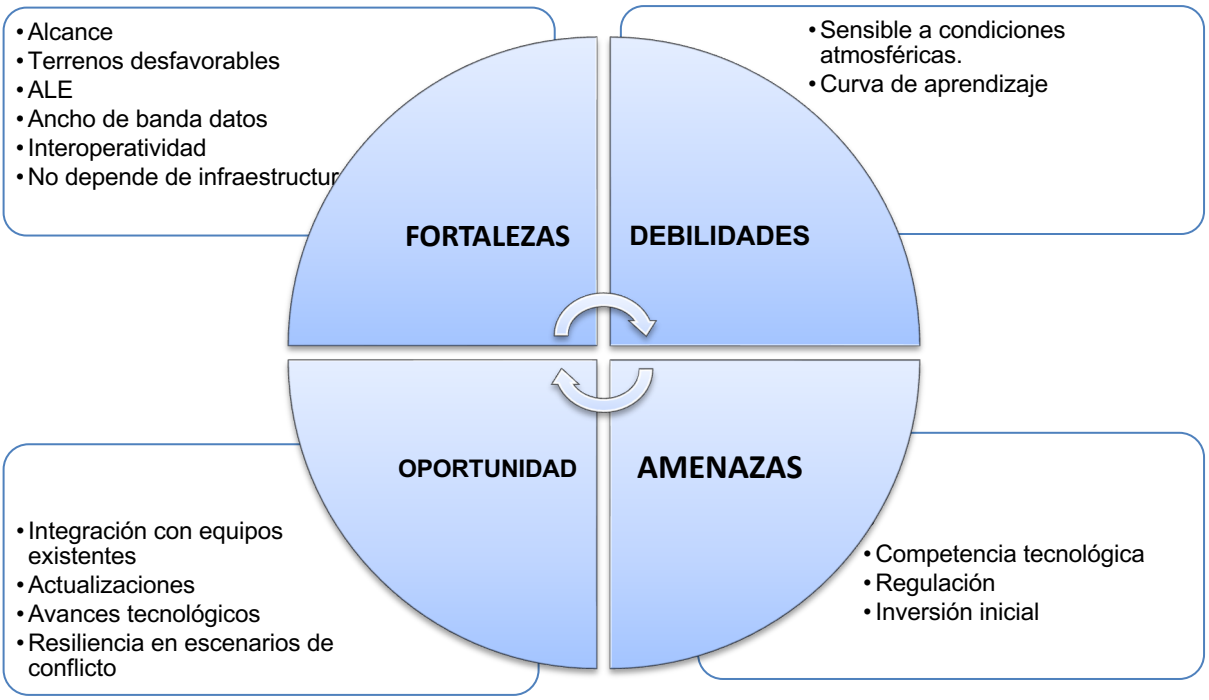


Figura 6. DAFO uso de la radio HF para la comunicación con los OAV. (Elaboración propia)

Fortalezas

- Alcance: La radio de banda de alta frecuencia (HF) es capaz de ofrecer enlaces de transmisión a grandes distancias, muy superiores a las que ofrece la banda VHF y en zonas donde la orografía es difícil.

- Establecimiento automático de enlaces (ALE): La nueva generación de radios HF tiene la capacidad de seleccionar de manera automática la frecuencia más favorable para establecer la comunicación.

- Capacidad de transmisión de datos: Las nuevas radios HF con características desarrolladas por *software* disponen de ancho de banda amplio para permitir operar con aplicaciones de voz y datos (Talos) de manera simultánea.

- No requiere de infraestructuras fijas: No precisa de instalaciones permanentes como torres repetidoras o satélites.

- Interoperabilidad: El uso de la radio HF hace posible la compatibilidad con medios de aliados que utilizan la misma tecnología.

Debilidades

- La influencia de las condiciones atmosféricas.
- La limitación de frecuencias puede hacer que no estén disponibles frecuencias para determinados usos.

- La necesidad de antenas, en ocasiones, de configuraciones complejas.
- La curva de aprendizaje, debido a que la operación y el mantenimiento de radios HF pueden ser más complejos que los de las radios VHF y su uso requiere formación específica.

Oportunidades

- Los fabricantes de radios tácticas HF continúan desarrollando mejoras a esta tecnología y están disponibles equipos HF con bastantes características de radio desarrollada por *software* (SDR), lo que permite su adaptación a las diferentes circunstancias y entornos operativos.
- Las nuevas radios HF son compatibles con equipos actuales en dotación, lo que las convierte en un paso intermedio que no requiere de inversiones demasiado grandes.
- La radio de banda de alta frecuencia (HF) es una tecnología muy robusta que permite comunicaciones eficaces en entornos y condiciones extremas.

Amenazas

- El uso de la banda HF podría verse afectado por regulaciones nacionales e internacionales.
- La competencia con otras tecnologías como la radio desarrollada por *software* (SDR) que tiene bastante potencial.
- Requiere inversión porque actualmente los equipos HF de última generación no están disponibles en el ET.

De acuerdo con este análisis DAFO, podemos concluir que esta tecnología de radio de banda de alta frecuencia (HF) cumple con todas las características requeridas como medio de transmisión para observadores avanzados.

Una de sus ventajas de la radio HF es su rango de alcance y sus capacidades en cuanto a transmisión de datos que son, en gran medida, suficientes para la mejora de la situación que aquí se propone.

La radio HF no presenta limitaciones en su alcance que se deban al relieve del terreno u obstáculos naturales y no depende de instalaciones fijas como torres o satélites.

También destaca por su robustez que permite una comunicación segura en entornos complicados y zonas hostiles.

Permite su integración con equipos existentes en dotación, por lo que el cambio hacia los nuevos modelos de radio HF, con características SDR, se podría hacer de una manera paulatina con el consecuente ahorro en la inversión inicial requerida.

Esta alternativa de radio HF se presenta como una opción muy interesante para cubrir los requisitos de la comunicación con los equipos de OAV de un grupo de artillería de campaña. [2]

4.2.4. Análisis DAFO del uso de radio desarrollada por software (SDR)

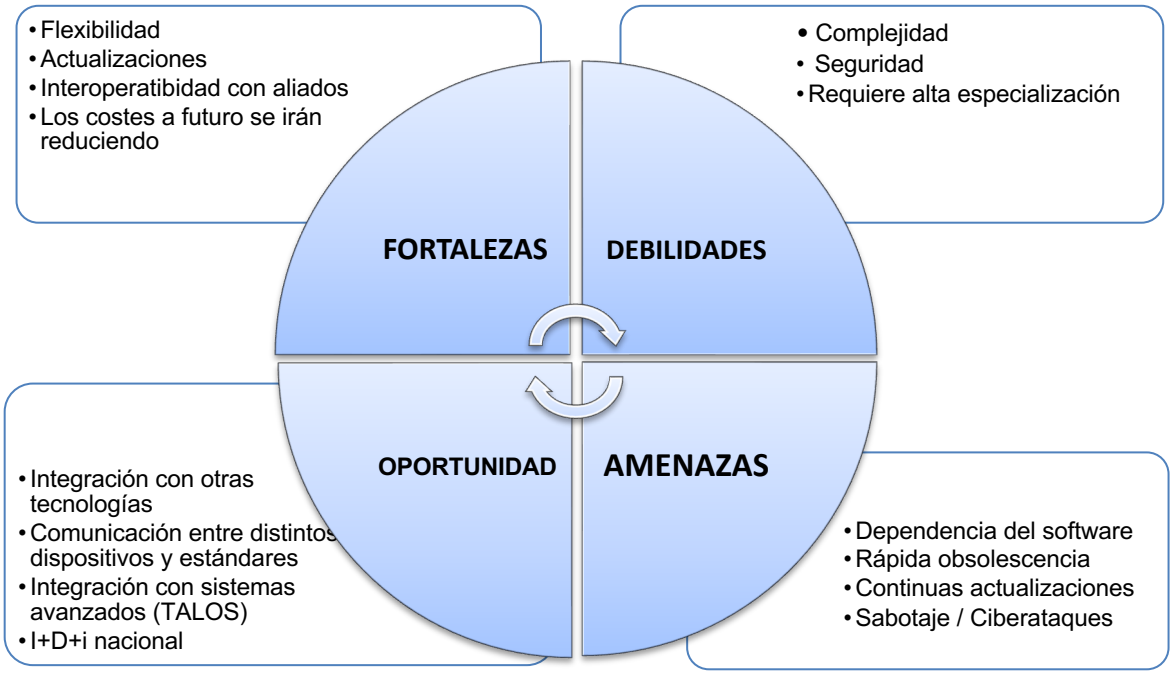


Figura 7. DAFO uso de la radio SDR para la comunicación con los OAV. (Elaboración propia)

Fortalezas

- La flexibilidad y adaptación de la radio SDR que se puede realizar gracias a que la configuración del equipo se realiza mediante software. De esta forma, la radio SDR se adapta a otros entornos de operación según cada circunstancia.
- Aunque la inversión inicial es alta, por ser equipos tecnológicamente muy avanzados, en un futuro, los costes pueden ir reduciéndose ya que las adaptaciones y mejoras se harán mediante *software* sobre la plataforma de *hardware* original ahorrando costes.
- La tecnología SDR se puede actualizar rápidamente, a diferencia de la radio convencional, ya que todos los cambios se hacen mediante software.
- La radio SDR, por sus propias características, facilita la compatibilidad entre dispositivos, incluso de diferentes tecnologías. Esto es especialmente importante en operaciones conjuntas.

Debilidades

- La radio SDR es una tecnología más compleja que la radio tradicional, por lo que la puesta en marcha inicial de un sistema de este tipo requiere de más medios y recursos.
- Para la SDR, los requisitos de hardware dependerán de las capacidades requeridas para el equipo.
- La seguridad, ya que, como toda plataforma basada en software, está más expuesta a ataques que puedan provocar su fallo.
- Requiere formación del personal asociado al uso de la SDR y relacionado con la operación y mantenimiento del equipo.

Oportunidades

- Integración con nuevas tecnologías: En un futuro la tecnología SDR evolucionará hacia su integración con otras tecnologías como las redes 5G, la inteligencia artificial (IA) y otras.
- Integración con sistemas asociados: Dentro de las operaciones, la integración y coordinación con programas como el sistema de C2 TALOS.
- La tecnología SDR va a permitir la investigación y el desarrollo a nivel nacional para atender a las necesidades específicas del ET español, potenciando la industria de defensa española en el campo de las comunicaciones y reduciendo la dependencia de otros países.

Amenazas

- Dependencia del software: El buen funcionamiento del sistema SDR se verá en peligro por fallos en el software o ciberataques, lo que lo hace vulnerable.
- Obsolescencia: Las plataformas donde se implemente la SDR se deberán mantener constantemente actualizadas ante el riesgo de quedar obsoletas.
- Dependencia de fabricantes y proveedores extranjeros si no existe soporte técnico de mantenimiento y repuestos.
- Ciberataques: Por sus propias características esta tecnología puede ser susceptible de ataques informáticos.

De la aplicación del método DAFO para esta tecnología podemos destacar que las características propias de la radio definida por *software* SDR son las que hacen que esta tecnología destaque por su flexibilidad y capacidad de adaptación, que le permiten un cambio de su configuración para su adecuación, dependiendo del entorno operativo.

Dado que las adaptaciones y mejoras se programan mediante *software*, siempre sobre la misma plataforma *hardware*, aunque la inversión inicial pueda ser importante, a futuro los costes de actualizaciones y mejoras, que se podrán implementar de manera rápida, se verán reducidos.

Por otra parte, la puesta en marcha inicial del sistema requerirá de medios y recursos dedicados. También es importante, personal experto formado para su operación y manejo además de hacer frente a posibles ciberataques.

De cara a futuro, la integración con otras tecnologías emergentes abre amplias oportunidades para la SDR. A nivel nacional, representa una oportunidad para impulsar la industria de defensa y reducir la dependencia de tecnologías extranjeras.

En la tabla 2 se muestra el resumen de los análisis DAFO realizados para las alternativas. [1]

Alternativas	DEBILIDADES	AMENAZAS	FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
Radio PR4G v3 + relés	• Transmisión de datos • Alcance limitado • Restricciones en el modo IP • Influencia terreno desfavorable • Logística relés muy compleja	• Obsolescencia • Múltiples accesorios • Ataques a los relés	• Experiencia operadores • Seguridad • Versatilidad (voz, datos, relé) • Equipos en dotación	• Integración con equipos existentes • Actualizaciones (aunque limitadas)
Comunicación satélite	• Complejidad • Dependencia de satélite • Latencia • Vulnerabilidad a sabotajes	• Dependencia de tecnología extranjera • Guerra electrónica • Armas antisatélite	• Cobertura global • Redundancia • Integración de datos • Gran capacidad transmisión datos	• Cooperación internacional • Proyectos conjuntos • Satélites de nueva generación
Radio HF	• Sensible a condiciones ambientales • Curva de aprendizaje	• Competencia tecnológica • Regulación • Inversión inicial	• Alcance • Terrenos desfavorables • Seguridad • Ancho de Banda • Compatibilidad • No depende de infraestructuras	• Integración con equipos existentes • Actualizaciones • Avances Tecnológicos • Resiliencia en escenarios de conflicto
Radio SDR	• Complejidad • Seguridad • Requiere alta especialización • Los costes a futuro se irán reduciendo	• Dependencia del *software* • Rápida obsolescencia • Continuas actualizaciones • Sabotaje / Ciberataques	• Flexibilidad • Actualizaciones • Interoperabilidad con aliados	• Integración con otras tecnologías • Comunicación entre distintos dispositivos y estándares • Integración con sistemas avanzados (TALOS) • I+D+i nacional

Tabla 2. Tabla resumen de los análisis DAFO de las cuatro alternativas consideradas (Elaboración propia)

4.3 Método de decisión multicriterio AHP (*Analytic Hierarchy Process*)

En este apartado, se analiza de forma comparativa, mediante el método de decisión multicriterio AHP, las cuatro alternativas descritas como opciones para la mejora del enlace con los OAV en un grupo de artillería de campaña.

Como paso previo, se han definido siete criterios considerados importantes a la hora de seleccionar la alternativa más recomendable. Cada criterio cuenta a su vez, con dos subcriterios.

Posteriormente, se ha procedido a aplicar este método de ayuda a la decisión por etapas, para lo que se ha utilizado la aplicación DLF Herramienta de Ayuda a la Decisión, desarrollado por la Academia de Logística del ET de Calatayud.

4.3.1. Definición de criterios y subcriterios para la selección de alternativas.

En base a la información analizada y la experiencia de expertos, obtenida mediante entrevistas,

se han identificado y definido los criterios de selección fundamentales, con dos subcriterios cada uno, para proceder al análisis comparativo de las cuatro alternativas consideradas y seleccionar el medio de comunicación más idóneo con los observadores avanzados (OAV) de un grupo de artillería de campaña (GACA).

- Alcance

La alternativa tecnológica para la comunicación con los OAV debe asegurar transmisiones a distancias de entre 40 Km y 100 Km. A esta distancia se la ha denominado subcriterio de alcance estándar. El otro subcriterio se ha llamado, alcance extendido y valora cuando el alcance de comunicación ofrecido sobrepasa los 100 Km. Subcriterios:

El alcance estándar que asegura la comunicación con los OAV para alcances de entre 40 Km y 100 Km.

El alcance extendido, con el que se valora que la alternativa analizada es capaz de mantener comunicaciones a distancias superiores a 100 Km.

- Integración con los sistemas en dotación

Se valora que la alternativa analizada permita la integración con sistemas asociados como el C2 TALOS y con otros equipos de transmisión en la actualidad en dotación, para reducir la necesidad de adquisición de nuevos equipos o acometer cambios tecnológicos importantes. Los dos subcriterios son:

La integración con sistemas existentes con el que se valora la capacidad de la conexión con equipos existentes en dotación.

Que el equipo o sistema de comunicaciones permita realizar ampliaciones y mejoras, sin que esto suponga grandes inversiones (escalabilidad).

- Adaptación al terreno

Se tiene en cuenta el comportamiento del medio de transmisión en terrenos de relieve desfavorable y en situaciones donde existan interferencias artificiales. Los subcriterios son:

El comportamiento del equipo en terrenos de relieve desfavorable.

La resistencia del equipo a interferencias artificiales.

- Seguridad y encriptación

Este criterio se refiere a las medidas de encriptación de mensajes, de autentificación o acreditación del personal con permisos y la defensa contra ataques. Los dos subcriterios seleccionados son:

La autenticación/acreditación del personal que está autorizado para el acceso al sistema.

La protección contra ataques y sabotaje.

- La capacidad para la transmisión de datos

Es importante la capacidad para transmitir una cantidad de datos grande que permita operar con sistemas como el C2 Talos y la calidad de esta transmisión. Los subcriterios son:

El sistema debe tener la capacidad para transmitir la suficiente cantidad de datos a una velocidad ajustada a las necesidades de la operación.

Se debe asegurar una transmisión de datos de calidad y sin interrupciones.

- La flexibilidad y adaptación

La alternativa tecnológica debe contar con la flexibilidad y capacidad de adaptación tanto para

las necesidades de la misión como para la integración de los sistemas de comunicación y de armas. Los subcriterios identificados son:

El equipo o sistema debe ser configurable según las necesidades de la operación.

Se debe adaptar a la evolución y avances futuros en comunicaciones o sistemas de armas de artillería de campaña.

- La fiabilidad y mantenimiento:

Se valora la mantenibilidad y el soporte técnico del fabricante del sistema. Son requisitos el fácil mantenimiento en operación y contar con un soporte técnico permanente por parte del fabricante. Los subcriterios son:

Facilidad de mantenimiento y reparación en operación.

Disponibilidad de soporte técnico del fabricante para solucionar problemas de funcionamiento, operación y dar formación si fuera preciso.

En la figura 8 se representa la jerarquización de los criterios, subcriterios y alternativas analizas según el método de análisis multicriterio AHP.

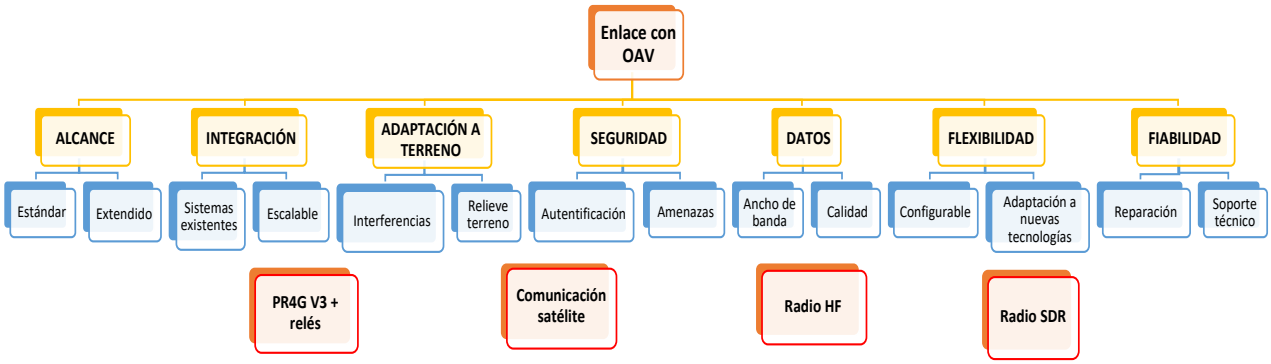


Figura 8. Jerarquización AHP con objeticos, criterios, subcriterios y alternativas. (Elaboración propia).

4.3.2. Aplicación del método AHP por etapas

Para la aplicación del método AHP y la obtención de la matriz de decisión se ha utilizado el programa DLF Herramienta de Ayuda a la Decisión desarrollado por la Academia de Logística del ET de Calatayud.

El análisis se ha desarrollado en cuatro etapas y al final se interpretan los resultados obtenidos, que se resumen en la matriz de decisión, mostrada en la tabla 9.

Etapa 1. Introducción de criterios, subcriterios y alternativas.

En esta etapa, se introducen uno a uno, los siete criterios con sus dos subcriterios cada uno y las cuatro alternativas. La tabla 3 muestra este proceso.

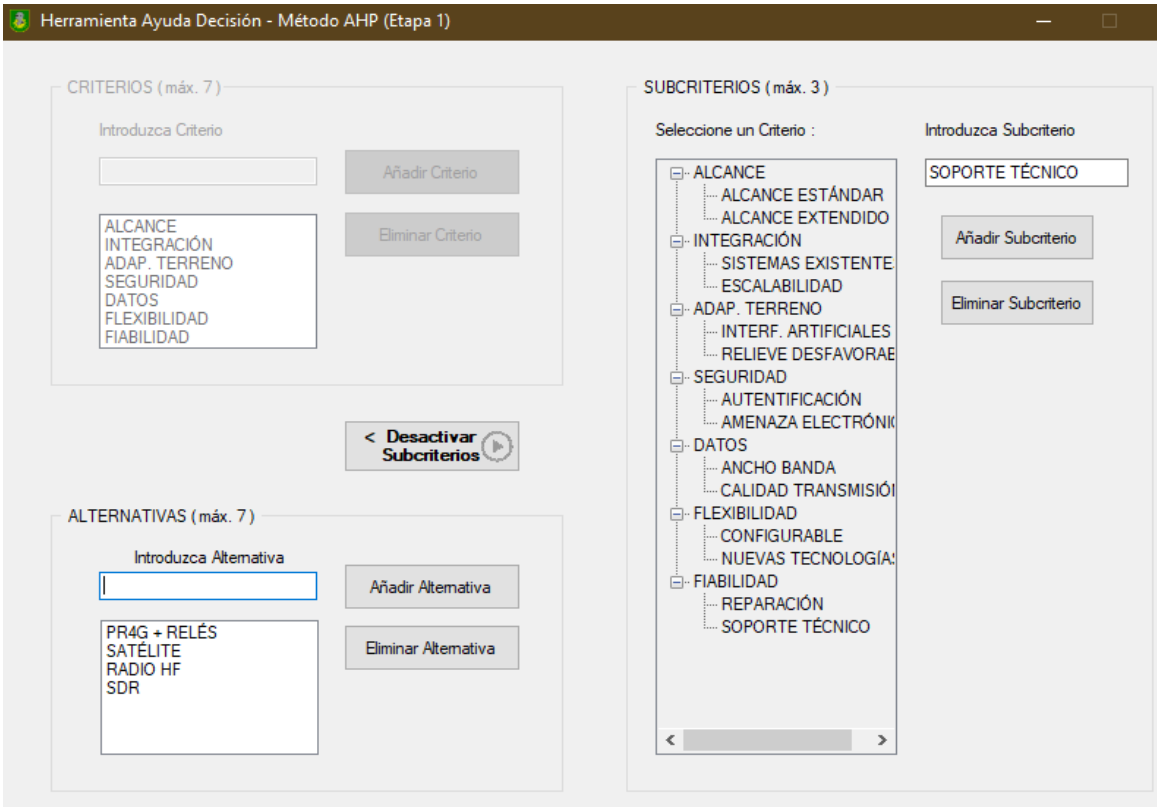


Tabla 3. Introducción de criterios, subcriterios y alternativas con programa DLF Herramienta de ayuda a la decisión. (Elaboración propia).

Etapa 2. Evaluación de Criterios y Subcriterios

- Evaluación de Criterios

Se procede a la valoración de cada uno de los criterios de selección. Se hará comparando cada uno de los criterios con otro (comparación por pares), considerando los valores indicados según la escala Saaty que se puede ver en la información de la tabla 5.

Se obtiene por cálculo (tabla 5) el valor del peso de cada uno de los criterios, PESOS (W), con respecto a los demás. Se calcula, además, la razón de Inconsistencia (RI) de la matriz de pesos que representa el nivel de incoherencia en la valoración de los criterios por pares. En este caso la RI es 0,1233, un valor no considerablemente mayor que 0,1 (valor de referencia), por lo que las valoraciones se consideran consistentes según el método empleado.

En el caso de estudio, los criterios ordenados de mayor a menor peso relativo se muestran en la tabla 4.

CRITERIO	Alcance	Capacidad Transmisión Datos	Adaptación al Terreno	Seguridad	Flexibilidad	Integración con sistemas	Fiabilidad y Mantenimiento
PESO (%)	23	23	21	10	9	8	7

Tabla 4. Criterios ordenados de mayor a menor peso relativo en el análisis AHP. (Elaboración propia).

La tabla 5 muestra la matriz de valoración de criterios y el resultado del cálculo de los pesos de cada uno de ellos en la decisión final.

Método AHP - Evaluación de Criterios (Etapa 2)

Evaluación de CRITERIOS

CRITERIO	ALCANCE	INTEGRAC	ADAP.	SEGURID/	DATOS	FLEXIBILID	FIABILIDAI	PESOS(W)
ALCANCE	1	3	1	3	1	3	5	0,23
INTEGR...	1/3	1	1/3	1/3	1/3	1	3	0,08
ADAP. T...	1	3	1	3	1	3	3	0,21
SEGURI...	1/3	3	1/3	1	1/3	1/3	3	0,10
DATOS	1	3	1	3	1	3	5	0,23
FLEXIBI...	1/3	1	1/3	3	1/3	1	1/3	0,09
FIABILID...	1/5	1/3	1/3	1/3	1/5	3	1	0,07

Escala de SAATY

Valor	Definición
1	a - Igual Importancia
3	b - Importancia Moderada v 1/3
5	c - Importancia Grande v 1/5
7	d - Importancia Muy Grande v 1/7
9	e - Importancia Extrema v 1/9

R.I. : 0,1233

Tabla 5. Evaluación de criterios y matriz de pesos con programa DLF Herramienta de ayuda a la decisión. (Elaboración propia).

- Evaluación de subcriterios

Se realiza la evaluación de los subcriterios por pares. Se obtienen las matrices de peso de los subcriterios. En este caso, las razones de inconsistencia (R.I) de cada una de las matrices tiene valor cero, ya que las comparaciones de sólo dos elementos no pueden ser inconsistentes (tabla 6)

Método AHP - Evaluación de SubCriterios (Etapa 2.bis)

ALCANCE	ALCANCE ESTÁNDAR	ALCANCE EXTENDIDO	PESOS(W)
ALCANCE ESTÁNDAR	1	1/3	0,25
ALCANCE EXTENDIDO	3	1	0,75

R.I. : 0,0000

INTEGRACIÓN	SISTEMAS EXISTENTES	ESCALABILIDAD	PESOS(W)
SISTEMAS EXISTENTES	1	3	0,75
ESCALABILIDAD	1/3	1	0,25

R.I. : 0,0000

ADAP. TERRENO	INTERF. ARTIFICIALES	RELIEVE	PESOS(W)
INTERF. ARTIFICIALES	1	1/3	0,25
RELIEVE DESFAVORAB...	3	1	0,75

R.I. : 0,0000

SEGURIDAD	AUTENTIFICACIÓN	AMENAZA	PESOS(W)
AUTENTIFICACIÓN	1	1/3	0,25
AMENAZA ELECTRÓNICA	3	1	0,75

R.I. : 0,0000

R.I. : 0,0000

R.I. : 0,0000

DATOS	ANCHO BANDA	CALIDAD TRANSMISIÓN	PESOS(W)
ANCHO BANDA	1	3	0,75
CALIDAD TRANSMISIÓN	1/3	1	0,25

R.I. : 0,0000

FLEXIBILIDAD	CONFIGURABLE	NUEVAS TECNOLOGÍAS	PESOS(W)
CONFIGURABLE	1	3	0,75
NUEVAS TECNOLOGÍAS	1/3	1	0,25

R.I. : 0,0000

FIABILIDAD	REPARACIÓN	SOPORTE TÉCNICO	PESOS(W)
REPARACIÓN	1	1/3	0,25
SOPORTE TÉCNICO	3	1	0,75

Tabla 6. Evaluación de subcriterios y matriz de pesos con programa DLF Herramienta de ayuda a la decisión. (Elaboración propia).

Etapa 3. Evaluación de Alternativas

En esta etapa se compara cada alternativa considerando cada uno de los subcriterios. Se calculan los pesos relativos de cada subcriterio y la razón de inconsistencia (R.I.) para cada una de las matrices resultantes. Los resultados se muestran en las tablas 7 y 8.

Método AHP - Evaluación de Alternativas (Etapa 3)

R.I. : 0,0000

ALCANCE ESTÁNDAR	PR4G + RELÉS	SATÉLITE	RADIO HF	SDR	PESOS(W)
PR4G + REL...	1	1/5	1/5	1/5	0,06
SATÉLITE	5	1	1	1	0,31
RADIO HF	5	1	1	1	0,31
SDR	5	1	1	1	0,31

R.I. : 0,0000

ALCANCE EXTENDIDO	PR4G + RELÉS	SATÉLITE	RADIO HF	SDR	PESOS(W)
PR4G + REL...	1	1/5	1/5	1/5	0,06
SATÉLITE	5	1	1	1	0,31
RADIO HF	5	1	1	1	0,31
SDR	5	1	1	1	0,31

R.I. : 0,1806

SISTEMAS EXISTENTES	PR4G + RELÉS	SATÉLITE	RADIO HF	SDR	PESOS(W)
PR4G + REL...	1	3	3	1/3	0,30
SATÉLITE	1/3	1	1/3	1/3	0,09
RADIO HF	1/3	3	1	1	0,23
SDR	3	3	1	1	0,38

R.I. : 0,0428

ESCALABILIDA	PR4G + RELÉS	SATÉLITE	RADIO HF	SDR	PESOS(W)
PR4G + REL...	1	1	1/5	1/3	0,10
SATÉLITE	1	1	1/3	1/3	0,12
RADIO HF	5	3	1	3	0,51
SDR	3	3	1/3	1	0,27

R.I. : 0,3070

INTERF. ARTIFICIALES	PR4G + RELÉS	SATÉLITE	RADIO HF	SDR	PESOS(W)
PR4G + REL...	1	1/3	1	1/3	0,15
SATÉLITE	3	1	1/3	1/3	0,18
RADIO HF	1	3	1	3	0,39
SDR	3	3	1/3	1	0,28

R.I. : 0,0163

RELIEVE DESFAVORABI	PR4G + RELÉS	SATÉLITE	RADIO HF	SDR	PESOS(W)
PR4G + REL...	1	1/5	1/5	1/3	0,07
SATÉLITE	5	1	1	3	0,39
RADIO HF	5	1	1	3	0,39
SDR	3	1/3	1/3	1	0,15

R.I. : 0,0586

AUTENTIFICAC	PR4G + RELÉS	SATÉLITE	RADIO HF	SDR	PESOS(W)
PR4G + REL...	1	1/3	1/3	1/3	0,10
SATÉLITE	3	1	1/3	1/3	0,17
RADIO HF	3	3	1	1	0,36
SDR	3	3	1	1	0,36

R.I. : 0,1806

AMENAZA ELECTRÓNICA	PR4G + RELÉS	SATÉLITE	RADIO HF	SDR	PESOS(W)
PR4G + REL...	1	1/3	1/3	1/3	0,09
SATÉLITE	3	1	1/3	3	0,30
RADIO HF	3	3	1	1	0,38
SDR	3	1/3	1	1	0,23

Tabla 7. Evaluación de alternativas y matriz de pesos con programa DLF Herramienta de ayuda a la decisión. (Elaboración propia).

R.I. : 0,0427

ANCHO BANDA	PR4G + RELÉS	SATÉLITE	RADIO HF	SDR	PESOS(W)
PR4G + REL...	1	1/5	1/3	1/3	0,08
SATÉLITE	5	1	3	1	0,42
RADIO HF	3	1/3	1	1	0,22
SDR	3	1	1	1	0,28

R.I. : 0,0745

CALIDAD TRANSMISIÓN	PR4G + RELÉS	SATÉLITE	RADIO HF	SDR	PESOS(W)
PR4G + REL...	1	1/3	1/5	1/5	0,07
SATÉLITE	3	1	1/5	1/3	0,13
RADIO HF	5	5	1	3	0,53
SDR	5	3	1/3	1	0,27

R.I. : 0,0572

CONFIGURABL	PR4G + RELÉS	SATÉLITE	RADIO HF	SDR	PESOS(W)
PR4G + REL...	1	1	1/5	1/5	0,08
SATÉLITE	1	1	1/5	1/5	0,08
RADIO HF	5	5	1	1/3	0,31
SDR	5	5	3	1	0,52

R.I. : 0,0161

NUEVAS TECNOLOGÍAS	PR4G + RELÉS	SATÉLITE	RADIO HF	SDR	PESOS(W)
PR4G + REL...	1	1/3	1/3	1/5	0,08
SATÉLITE	3	1	1	1/3	0,20
RADIO HF	3	1	1	1/3	0,20
SDR	5	3	3	1	0,52

R.I. : 0,0593

REPARACIÓN	PR4G + RELÉS	SATÉLITE	RADIO HF	SDR	PESOS(W)
PR4G + REL...	1	5	1	5	0,41
SATÉLITE	1/5	1	1/5	1/3	0,07
RADIO HF	1	5	1	5	0,41
SDR	1/5	3	1/5	1	0,12

R.I. : 0,1869

SOPORTE TÉCNICO	PR4G + RELÉS	SATÉLITE	RADIO HF	SDR	PESOS(W)
PR4G + REL...	1	3	3	3	0,44
SATÉLITE	1/3	1	1/5	1/3	0,08
RADIO HF	1/3	5	1	5	0,34
SDR	1/3	3	1/5	1	0,14

Tabla 8. Evaluación de alternativas y matriz de pesos con programa DLF Herramienta de ayuda a la decisión. (Elaboración propia)

Etapa 4. Jerarquización de alternativas

Para finalizar el análisis AHP, se trasladan todos los resultados de los pesos relativos obtenidos con anterioridad a la matriz de decisión (tabla 9).

Método AHP - Jerarquización de Alternativas (Etapa 4)

MATRIZ DE DECISIÓN

CRITERIOS / SUBCRITERIOS	PESOS	PR4G + RELÉS	SATÉLITE	RADIO HF	SDR
ALCANCE	**0,23**	**0,06**	**0,31**	**0,31**	**0,31**
+ ALCANCE ESTÁNDAR	0,25	0,06	0,31	0,31	0,31
+ ALCANCE EXTENDIDO	0,75	0,06	0,31	0,31	0,31
INTEGRACIÓN	**0,08**	**0,25**	**0,10**	**0,30**	**0,35**
+ SISTEMAS EXISTENTES	0,75	0,30	0,09	0,23	0,38
+ ESCALABILIDAD	0,25	0,10	0,12	0,51	0,27
ADAP. TERRENO	**0,21**	**0,09**	**0,34**	**0,39**	**0,19**
+ INTERF. ARTIFICIALES	0,25	0,15	0,18	0,39	0,28
+ RELIEVE DESFAVORABLE	0,75	0,07	0,39	0,39	0,15
SEGURIDAD	**0,10**	**0,09**	**0,27**	**0,37**	**0,27**
+ AUTENTIFICACIÓN	0,25	0,10	0,17	0,36	0,36
+ AMENAZA ELECTRÓNICA	0,75	0,09	0,30	0,38	0,23
DATOS	**0,23**	**0,08**	**0,35**	**0,30**	**0,28**
+ ANCHO BANDA	0,75	0,08	0,42	0,22	0,28
+ CALIDAD TRANSMISIÓN	0,25	0,07	0,13	0,53	0,27
FLEXIBILIDAD	**0,09**	**0,08**	**0,11**	**0,29**	**0,52**
+ CONFIGURABLE	0,75	0,08	0,08	0,31	0,52
+ NUEVAS TECNOLOGÍAS	0,25	0,08	0,20	0,20	0,52
FIABILIDAD	**0,07**	**0,43**	**0,08**	**0,35**	**0,14**
+ REPARACIÓN	0,25	0,41	0,07	0,41	0,12
+ SOPORTE TÉCNICO	0,75	0,44	0,08	0,34	0,14
		0,12	**0,27**	**0,33**	**0,28**

Tabla 9. Matriz de decisión con programa DLF Herramienta de ayuda a la decisión. (Elaboración propia).

Interpretación de los resultados

En la matriz de decisión, mostrada en la tabla 9, se establece la jerarquización de las cuatro alternativas analizadas en función de los criterios y subcriterios que se han considerados más significativos para su selección, derivados de la bibliografía consultada, de las entrevistas a expertos de la unidad y encuestas.

Con respecto al criterio alcance, cabe destacar que es, junto con el criterio de capacidad de transmisión de datos, los considerados de más peso en la selección de las alternativas. Así, tiene un peso de un 23% sobre la decisión final. Con respecto a este criterio, la alternativa peor valorada es la radio PR4G v3 (actualmente en dotación) con el uso de relés. Las otras tres alternativas están igualmente valoradas, por considerar que cubren ampliamente este requisito.

Para el criterio integración, que resulta con un peso relativo de un 8%, interpretado como la capacidad para integrarse con otros sistemas que están siendo utilizados, como el Sistema C2 TALOS y otros equipos de comunicación existentes, la alternativa mejor valorada es la radio SDR, seguida de la radio de banda de alta frecuencia (HF).

En el criterio de adaptación al terreno, considerada de gran importancia para esta aplicación, por lo que tiene un peso de un 21%, la mejor valorada en la alternativa de la radio HF, destacando en ambos subcriterios, en el de resistencia a interferencias artificiales como en el de adaptabilidad a relieve del terreno. Destaca también con respecto a este criterio la alternativa de comunicación por satélite.

Considerando la seguridad, las tecnologías tomadas como alternativas deben contar con

medidas de encriptación y protección contra intentos de interceptación, sabotaje o *hacking*. En este sentido, resulta con un peso de un 10% en la decisión y la alternativa mejor valorada es la radio HF, que destaca en los dos subcriterios, mecanismos de autenticación y el de protección contra amenazas electrónicas.

Teniendo en cuenta el criterio de capacidad de transmisión de datos, con un peso en la decisión considerable, un 23%, al igual que el alcance, por lo que son los criterios más influyentes. Destaca la tecnología basada en la comunicación vía satélite (SATCOM), que permite dar una cobertura con la capacidad de transmitir datos, como videos e imágenes en tiempo real, muy interesantes para operaciones militares modernas.

La alternativa de la radio HF, con una valoración también importante en este criterio, dispone de una capacidad de transmisión de datos, en los equipos en sus versiones más actuales, holgadas en cuanto a anchos de banda requeridos por las aplicaciones necesarias para el desarrollo eficaz de las funciones de los OAV (Talos).

En relación con el criterio de flexibilidad, con un peso de un 9%, destaca ampliamente la tecnología basada en radio desarrollada por *software* (SDR). Por su propia definición, esta tecnología de radio destaca por su flexibilidad y adaptabilidad, dado que hace posible la modificación de su configuración de manera flexible adecuándola a distintos escenarios. Además, esta tecnología basada en *software* facilita actualizaciones que permiten adaptarlas a nuevas necesidades que surjan.

Por último, bajo el criterio de la fiabilidad y mantenimiento, considerada con un peso de un 7%, la tecnología mejor valorada es la radio PR4G v3, actualmente en dotación.

Estos equipos se utilizan desde hace décadas en cada una de sus versiones, por lo que el personal que lo opera está bastante familiarizado con su manejo, por ello, la experiencia acumulada significa una ventaja

Se trata de un equipo con un mantenimiento mínimo en el campo y con reparaciones fáciles y rápidas en caso de ser necesarias. También en caso de problemas el soporte técnico está disponible.

La alternativa de la radio HF también sale bien parada aplicando este criterio, por ser una opción técnicamente consolidada.

Como se aprecia en la matriz de decisión de la tabla 9, después de aplicar la metodología AHP, de las cuatro alternativas consideradas factibles para la mejora de las necesidades planteadas para el enlace de los OAV, la alternativa más recomendable es la correspondiente a la radio de banda de alta frecuencia (HF), en base a los criterios de selección y su importancia sobre la decisión final.

5 CONCLUSIONES

En este TFG se ha puesto de manifiesto el rápido desarrollo y mejora constante de los sistemas de armas en la artillería de campaña actual que, en especial, ha extendido su radio de acción y alcance. Esta circunstancia se traduce en la necesidad de mantener enlaces de comunicación fiables sobre mayores distancias y en condiciones adversas. Además, las características de los conflictos actuales, donde las líneas del frente ya no están claramente definidas y el enemigo puede disponer de sistemas tecnológicamente avanzados, aumenta la complejidad para mantener la comunicación y coordinación entre unidades que se encuentren en ubicaciones dispersas.

En concreto, en este TFG se ha abordado el potencial de mejora de los sistemas de transmisión de los equipos de observadores avanzados en un grupo de artillería de campaña (GACA) y la necesidad de adoptar tecnologías mejor adaptadas a los nuevos escenarios, para garantizar comunicaciones eficientes y seguras.

Para hacer posible la obtención de las conclusiones que se plantean en el objetivo principal de este TFG, referidas a proponer la mejor opción de medio de enlace a un grupo de artillería con los equipos de observadores avanzados (OAV), a distancias de entre 40 km y 100 km, se ha ido dando respuesta de manera paulatina a todos los objetivos específicos del mismo.

Para responder al objetivo de identificación de las alternativas factibles, inicialmente se ha procedido a la recopilación de información relevante sobre los temas tratados en este trabajo, obtenida tanto en fuentes oficiales como abiertas. Dicha información, una vez seleccionada, se ha estudiado y analizado de manera exhaustiva, para construir la base teórica que soporta el desarrollo siguiente de este TFG.

Como etapa fundamental, previa a los procesos de análisis comparativo, se han identificado cuatro alternativas consideradas factibles para mejorar la situación de partida planteada: La utilización de la radio PR4G v3, con la incorporación de relés para aumentar el alcance de la comunicación con los OAV, las comunicaciones vía satélite (SATCOM), la radio de banda de alta frecuencia (HF) y la radio desarrollada por *software* (SDR).

Para cubrir el siguiente objetivo establecido, relativo al análisis de las alternativas identificadas como soluciones de mejora, estas han sido sometidas a un proceso de análisis comparativo para seleccionar la que mejor se adapta a los planteamientos y necesidades de comunicación con los OAV de un grupo de artillería de campaña (GACA), según las premisas de partida.

Para este análisis, se ha empleado el método de análisis jerárquico AHP (*Analytic Hierarchy Process*), para lo que previamente se han definido siete criterios, con dos subcriterios cada uno. Estos criterios de referencia se han establecido considerando su importancia para la toma de la decisión sobre la tecnología más idónea para esta aplicación concreta.

Adicionalmente, se ha aplicado el método DAFO (Debilidades-Amenazas-Fortalezas-Oportunidades) que ha ayudado a una comprensión más profunda de cada una de las tecnologías consideradas.

Para la aplicación de estas metodologías se ha tenido en cuenta la opinión de los expertos consultados mediante entrevistas personales, realizadas durante el periodo de Prácticas Externas realizadas en la Brigada Galicia VII.

Tras el análisis, mediante la interpretación de los resultados del mismo, se ha dado cumplimiento al siguiente objetivo planteado, la selección de la mejor alternativa para el enlace de comunicación con los OAV en un grupo de artillería de campaña (GACA).

En la actualidad, el medio de transmisión empleado por los OAV en el escenario descrito es la radio PR4G-v3. Este equipo lleva proporcionando desde hace tiempo enlaces de comunicación de manera satisfactoria, sin embargo, presenta limitaciones en cuanto al alcance, lo que lo excluye para el uso en la situación que se plantea en este TFG.

Aunque su alcance pueda ampliarse utilizando relés, estos van a ser elementos vulnerables en el campo de batalla, comprometiendo las operaciones, además, la logística necesaria para la implantación de los relés es muy compleja desde el punto de vista de la orgánica.

La comunicación vía satélite se ha visto como una opción factible para las comunicaciones tácticas, aunque no se considera indicada para el propósito de este TFG. Esta tecnología presenta ventajas importantes y en un futuro próximo, los satélites de comunicación mejorarán sus características. Las alianzas estratégicas y proyectos conjuntos podrían permitir a España compartir costes de inversión y beneficiarse de la experiencia de otros países aliados.

En cuanto a la tecnología de la radio desarrollada por *software* (SDR), cabe destacar que una vez adquirido el *hardware* necesario, cualquier modificación o mejora se puede realizar a través de *software*, evitando así la necesidad de invertir continuamente en equipos.

Los aspectos negativos de las radios SDR se relacionan con su vulnerabilidad a los

ciberataques debido a su dependencia del *software*. Este aspecto requerirá de personal altamente especializado, encargado de gestionar esta tecnología para evitar o mitigar este tipo de ataques.

Su adaptabilidad y flexibilidad lo hacen muy interesante en el panorama de las comunicaciones tácticas, caracterizado por entornos operativos VUCA[10].

En cuanto a la tecnología de radio HF se considera la tecnología más recomendable para las comunicaciones tácticas en estos entornos de operaciones.

No requiere una instalación permanente, como una torre de transmisión o un satélite, lo que le otorga una ventaja para su uso en operaciones tácticas.

La interoperabilidad de esta tecnología con sistemas utilizados por aliados internacionales facilita las operaciones conjuntas y la coordinación en el campo de operaciones.

Se diferencia del resto de tecnologías analizadas en cuanto a robustez y seguridad aportada en las comunicaciones, convirtiéndose actualmente en la mejor opción entre las tecnologías consideradas para asegurar una comunicación válida y eficiente entre GACA y OAV, para los nuevos escenarios que se exponen en este TFG.

Para cubrir el último de los objetivos específicos de este TFG, se proponen estudios y acciones futuras acerca de alguna de las tecnologías analizadas en este trabajo y que muestran un claro potencial de desarrollo en un futuro próximo, que pueden significar un avance significativo y oportunidad de mejora para su empleo en esta y en otras aplicaciones relacionadas con las comunicaciones tácticas. Tal es el caso de la radio SDR.

Se espera que la radio definida por *software* (SDR) revolucione los sistemas de transmisión tácticos en los próximos años. Su flexibilidad y capacidad para adaptarse a las circunstancias operativas, van a representar importantes ventajas sobre otras tecnologías.

Aunque en el escenario que se aborda en este TFG no se considera la mejor alternativa, se recomienda la conveniencia de desarrollar estudios futuros para profundizar en su conocimiento y aplicación en el ET español.

[10]El término “VUCA” es un acrónimo originado en la década de 1990 en el Ejército de los EE. UU. y que describe entornos que se caracterizan por su Volatilidad, la Incertidumbre, la Complejidad y la Ambigüedad.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Castilla Cerezo, R. Rey García, R. (2020) "Desarrollo de medidas de apoyo electrónico basadas en la utilización de radio definida por software". *Memorial de Ingenieros* 105. Disponible en: https://publicaciones.defensa.gob.es/media/downloadable/files/links/m/e/memorial_ingenieros_105.pdf [Consultado 30/10/2023]

[2] P. Denisowski. (2020). *Renacimiento de HF. Informe Técnico*. Rohde&Schwarz. (KO4LZ). Disponible en:

https://cdn.rohde-schwarz.com/lat/campaigns_37/documents/hf_doc/Rohde-Schwarz_Rebirth-of-HF_WhitePaper_ESP.pdf [Consultado 30/10/2023]

[3] Fernández Rosado, D. (2020) "La Artillería de la próxima década". *Memorial de Artillería*. 176/1. Disponible en: https://publicaciones.defensa.gob.es/pprevistas/REVISTAS_PDF21547/page_2.html [Consultado 30/10/2023]

[4] *Comunicaciones de radio en la era digital. Volumen 2. Tecnología VHF/UHF.* (2000) Harris Corporation. Recuperado de: https://www.ea1uro.com/pdf/COMUNICACIONES%20DE%20RADIO%20EN%20LA%20ERA%20DIGITAL.pdf [Consultado 30/10/2023]

[5] "La futura artillería del Ejército: SIAC modernizados, sustitución del M109, lanzacohetes y obuses sobre ruedas". (2023). *Infodefensa.com.* Recuperado de: https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/4129476/futura-artilleria-ejercito-siac-modernizados-sustitucion-m109-lanzacohetes-obuses-sobre-ruedas [Consultado 30/10/2023]

[6] MADOC. Mando de Adiestramiento y Doctrina (2015). *MI-304. Equipo de observador de artillería de campaña.* Granada. Uso Oficial.

[7] MADOC. Mando de Adiestramiento y Doctrina (2016). *MI-500. Manual de instrucción radioteléfono PR4G V3.* Granada. Uso Oficial.

[8] MADOC. Mando de Adiestramiento y Doctrina (2019) *MI-508.* Manual de instrucción terminal satélite SOTM. Granada. Uso Oficial.

[9] MADOC. Mando de Adiestramiento y Doctrina (2020) *PD4-507. Táctica. Empleo del batallón de transmisiones desplegable.* Granada. Uso Oficial.

[10] MADOC. Mando de Adiestramiento y Doctrina (2023) *MP-300. Observador de fuegos. Manual de procedimientos*. Granada. Uso Oficial.

[11] MADOC. Mando de Adiestramiento y Doctrina (2020). *Tendencias 2018-2019. VOLUMEN II. Artillería*. Dirección de Investigación, Doctrina, Orgánica y Materiales. Granada. Uso Oficial.

[12] MADOC. Mando de Adiestramiento y Doctrina (2022) *DIDOM-IV-31-03. Tendencias 2019-2020. VOLUMEN II. Artillería*. Dirección de Investigación, Doctrina, Orgánica y Materiales. Granada. Uso Oficial.

[13] Martínez, E. (2007). “Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la localización de una PYME”. *Anuario jurídico y económico escurialense*. Recuperado de: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiSgtDqoYqCAxX4XaQEHdhDvAQFnoECAkQAQ&url=https%3A%2F%2Fdialnet.unirioja.es%2Fdescarga%2Farticulo%2F2267954.pdf&usg=AOvVaw3P_y4eae7NJdtpRFXLd0sL&opi=89978449 [Consultado 30/10/2023]

[14] Ruiz López, C. “Una propuesta de empleo para la toma de decisiones en el Ministerio de Defensa. Analytic Hierarchy process”. *VI Congreso Nacional de I+D en Defensa y Seguridad.* Academia de Caballería de Valladolid. 2018. Recuperado de: https://publicaciones.defensa.gob.es/actas-del-vi-congreso-nacional-de-i-d-en-defensa-y-seguridad-desei-d-2018.html [Consultado 30/10/2023]

ANEXOS

Anexo I

ENTREVISTA A EXPERTOS

Entrevista realizada a la Cte. de Transmisiones Dª Jara Gregorio Ramón, de la Brigada "Galicia VII"

El objetivo planteado en este TFG tiene su origen en la propuesta de mejora por parte del Ejército de Tierra español en cuanto al empleo de artillería de campaña de largo alcance, como repuesta a las lecciones aprendidas de conflictos recientes.

Países como Rusia cuentan con sistemas de armas de artillería de campaña con alcances significativamente superiores a los sistemas disponibles por el Ejército de Tierra español. Además, otros países de su entorno también disponen de sistemas con capacidades similares a los rusos. Ante esta situación, España ha iniciado el proyecto de adquisición de un nuevo sistema de armas lanzacohetes, el SILAM, con un alcance previsto de entre 40 km y 100 km.

Se pone de relevancia la importancia de la artillería de campaña en los conflictos actuales, tomando como ejemplo el conflicto de Ucrania y el uso de lanzacohetes Himars, suministrados por Estados Unidos. Como consecuencia, España tiene previsto reforzar sus capacidades en este campo y el Ministerio de Defensa ha iniciado un ciclo inversor que incluye la adquisición de un lanzacohetes de alta movilidad, una demanda importante del Ejército de Tierra.

Por tanto, la llegada del SILAM o cualquier otro sistema con un rango de alcance similar implicaría la necesidad de adaptar los Grupos de Artillería de Campaña (GACA) para garantizar el enlace con los Observadores Avanzados (OAV) a estas distancias.

las radios VHF PR4G V3, actualmente en dotación en los GACA, presentan dificultades para establecer enlaces a distancias superiores a 40 km en áreas cuando el relieve del terreno es desfavorable. El enlace con los OAV requiere, no sólo comunicación de voz, sino también transmisión de datos para utilizar el sistema de C2 Talos.

Este TFG se centrará en proponer soluciones para garantizar el enlace entre los GACA y los OAV en distancias de entre 40 km y 100 km, por lo que se plantean dos posibles soluciones:

La primera consistente en realizar adaptaciones orgánicas en los GACA, utilizando los medios de transmisión existentes, sin adquirir nuevos equipos, planteando la utilización relés para extender el alcance de las radios PR4G V3 actuales.

La segunda opción implicaría la adquisición de un nuevo sistema de transmisiones que permita establecer el enlace requerido que requerirá realizar un estudio de mercado para identificar el medio de transmisión y el modelo de radio adecuado.

1. **(P) En relación con las limitaciones mencionadas con las radios VHF PR4G V3, ¿Considera una alternativa válida la utilización de relés para aumentar el alcance de estas radios asegurando la comunicación de voz de datos eficaz y la integración del sistema C2 Talos? ¿Qué desafíos logísticos y técnicos ve en la implementación de esta opción de mejora?**

(R) La Compañía de Transmisiones está concebida, pensada y preparada, en cuanto a materiales, sólo para dar servicio a las necesidades de enlace de los puestos de mando a nivel de Brigada para enlazar con los grupos tácticos, con lo cual, ni en cuanto a personal ni en cuanto a medios, ni en cuanto apoyos logísticos serviría para hacer este tipo de relés. Cada unidad tiene que ser autosuficiente para garantizarse sus propios enlaces. Quizá el grupo táctico podría apoyar este tipo de enlace, pero tampoco tiene esos medios, con lo cual lo suyo sería seguir investigando conforme buscar una radio que permita mayores alcances y ancho de banda.

(P) ¿La opción de introducir esta Compañía dentro de la Orgánica del Grupo?
Una de las propuestas de mejora iría por esa línea. En la Artillería, hasta ahora, se trataba de una unidad específica artillera, de tal modo que en la Orgánica del Grupo está su batería de Plana Mayor y su batería de armas. Quizás se podría incorporar a la orgánica de todos los GACAS, aunque sea de forma ideal, ya veremos de dónde sacamos los medios, una batería relés, por ejemplo, que tenga tantas estaciones tal que su misión sea sólo garantizar ese enlace.

(R) Ahora mismo ya existe algo y la composición podría estudiarse o elevarse a nivel Artillería, pero las Unidades deben tener un equipo de apoyo CIS a la Unidad. Viene siendo ahora mismo un Suboficial y tres de personal de tropa, pero con poco material y que está enfocado a garantizar el enlace con el escalón superior.
Ahora mismo, está dimensionado para garantizar el enlace, es decir, es una solución que se ha dado para garantizar el enlace de los grupos tácticos. Va a tener en el grupo subordinados de Brigada con el puesto de mando de Brigada. No está dimensionado para enlaces y necesidades de enlace que tenga la Unidad propia con sus unidades subordinadas de cada unidad, entonces ese sí que podría ser una parte del estudio la posibilidad de ampliar esa sección, crear una sección de transmisiones que esté sólo enfocada a los enlaces de grupo hacia abajo. Probablemente orgánicos del Grupo de artillería a la hora de ir a apoyar a un grupo táctico en una maniobra táctica. Esos enlaces que necesite hacia abajo ya están pensados desde dentro, no crearle una necesidad a la unidad a la que se le va a apoyar.
Pero, no debemos olvidar que un relé está pensado para un campo de maniobras, pero no para una zona de operaciones ya que debe primar la seguridad, física, de los medios y la integridad del personal. Un relé tiene un medio de transmisiones con un “cripto” que no se puede dejar sólo abandonado por medio del campo de maniobras porque también se está poniendo en riesgo la seguridad de la operación.

2. **(P) Los enlaces vía satélite se podrían presentar como una opción para superar limitaciones que se plantean, ¿Qué ventajas e inconvenientes identifica para su empleo en un escenario de combate? ¿Considera que representen riesgo de dependencia o vulnerabilidad al depender de este tipo de comunicaciones?**

(R) Los enlaces vía satélite, al igual que los enlaces HF, tienen la ventaja de la distancia, el alcance que van a proporcionar.
Con respecto al ancho de banda, conviene investigar en el mercado entre las radios con las que trabaja el Ministerio de Defensa o alguna otra que se introduzca en el estudio para garantizarte el ancho de banda mínimo necesario para las necesidades de transmisión de datos (p.e. Talos).
Con respecto a la vulnerabilidad de las comunicaciones por satélite, si son terminales militares van cifrados, aunque, hoy en día, no sabemos con la guerra electrónica en todo el Mundo, ni los rusos, pero en las operaciones en las que estamos, no vemos ese riesgo de guerra electrónica sobre nuestros satélites si son militares y cifrados y no un satélite de cobertura global que te da un enlace abierto y que lo puede ver “todo el Mundo”.

3. **(P) Dada la naturaleza de las ondas de radio HF (Alta Frecuencia), que permiten comunicaciones de larga distancia mediante refracción en la ionosfera, ¿Cree que la radio HF sería preferible a VHF para la comunicación entre los Grupos de Artillería de Campaña (GACA) y los Observadores Avanzados (OAV) en el entorno futuro descrito?**

(R) En comparación la radio HF, por logística y por facilidad en la operación, sería más conveniente para esta aplicación, aunque es importante asegurar el ancho de banda para asegurar la transmisión de datos que se necesitan

4. **(P) ¿Considera suficiente el estado actual de madurez y fiabilidad de las radios SDR (Radios desarrolladas por software) específicamente diseñadas para aplicaciones militares? ¿Hay sistemas SDR que ya hayan sido probados y adoptados por fuerzas armadas de otros países con éxito?**

(R) Es algo nuevo, seguro que algún ejército ya lo tiene implementado. Nosotros actualmente no tenemos, aunque hay algún proyecto trabajando en ello. En realidad, ese es el futuro, ya no sólo por los alcances sino porque cualquier tipo de enlace en una misma radio nos puede servir para cualquier tipo de Unidad. Para cualquier distancia, con suficiente ancho de banda. Será la configuración la que modifique los parámetros para obtener una configuración determinada.

5. **(P) ¿Cuáles deberían ser los criterios que se deberían valorar y ponderar para la selección del mejor medio de transmisiones para la aplicación que estamos considerando? *Seguridad, Integración con otros sistemas (C2 Talos, otros), Fiabilidad, Soporte técnico, Coste, Formación para operadores, otros, …***

(R) Pues los ha indicado todos.
Lo primero de todo, seguridad. En estos temas de seguridad de las radios en España el CNI. Que el CNI puede acceder a su cripto y ver qué es lo que está pasando por ahí. ¿Qué nos está pasando con las radios de Harris? Pues que no nos permite acceder a su cripto. Es una radio muy buena. La tenemos porque somos miembros de la OTAN y nos da unas capacidades amplísimas, pero no nos sirve como la única radio que podamos tener con los compromisos de España. Las radios, o sea, por una parte, seguridad y modelos criptos.
El ancho de banda hay que asegurarlo, el alcance (las Harris son las mejores), la formación.

ENTREVISTA A EXPERTOS

Entrevista realizada al Cap. de Transmisiones D. Juan Manuel García Sobrido, de la Brigada "Galicia VII"

El objetivo planteado en este TFG tiene su origen en la propuesta de mejora por parte del Ejército de Tierra español en cuanto al empleo de artillería de campaña de largo alcance, como repuesta a las lecciones aprendidas de conflictos recientes.

Países como Rusia cuentan con sistemas de armas de artillería de campaña con alcances significativamente superiores a los sistemas disponibles por el Ejército de Tierra español. Además, otros países de su entorno también disponen de sistemas con capacidades similares a los rusos. Ante esta situación, España ha iniciado el proyecto de adquisición de un nuevo sistema de armas lanzacohetes, el SILAM, con un alcance previsto de entre 40 km y 100 km.

Se pone de relevancia la importancia de la artillería de campaña en los conflictos actuales, tomando como ejemplo el conflicto de Ucrania y el uso de lanzacohetes Himars, suministrados por Estados Unidos. Como consecuencia, España tiene previsto reforzar sus capacidades en este campo y el Ministerio de Defensa ha iniciado un ciclo inversor que incluye la adquisición de un lanzacohetes de alta movilidad, una demanda importante del Ejército de Tierra.

Por tanto, la llegada del SILAM o cualquier otro sistema con un rango de alcance similar implicaría la necesidad de adaptar los Grupos de Artillería de Campaña (GACA) para garantizar el enlace con los Observadores Avanzados (OAV) a estas distancias.

las radios VHF PR4G V3, actualmente en dotación en los GACA, presentan dificultades para establecer enlaces a distancias superiores a 40 km en áreas cuando el relieve del terreno es desfavorable. El enlace con los OAV requiere, no sólo comunicación de voz, sino también transmisión de datos para utilizar el sistema de C2 Talos.

Este TFG se centrará en proponer soluciones para garantizar el enlace entre los GACA y los OAV en distancias de entre 40 km y 100 km, por lo que se plantean dos posibles soluciones:

La primera consistente en realizar adaptaciones orgánicas en los GACA, utilizando los medios de transmisión existentes, sin adquirir nuevos equipos, planteando la utilización relés para extender el alcance de las radios PR4G V3 actuales.

La segunda opción implicaría la adquisición de un nuevo sistema de transmisiones que permita establecer el enlace requerido que requerirá realizar un estudio de mercado para identificar el medio de transmisión y el modelo de radio adecuado.

1. **(P) En relación con las limitaciones mencionadas con las radios VHF PR4G V3, ¿Considera una alternativa válida la utilización de relés para aumentar el alcance de estas radios asegurando la comunicación de voz de datos eficaz y la integración del sistema C2 Talos?, ¿Qué desafíos logísticos y técnicos ve en la implementación de esta opción de mejora?**

(R) Para empezar, no es factible el montaje de esos relés por el número de personal que dispone la compañía de transmisiones y los medios. Estamos hablando de un observador avanzado dentro del GACA. Para empezar, la Compañía de Transmisiones, salvo que sea un apoyo muy puntual o una petición, da apoyo a nivel Brigada.

(P) Sería introducir por orgánica en cada Grupo artillería de campaña una compañía de redes.

(R) Bien, digamos un elemento como un pelotón de relés. Ahora mismo se tiene un pelotón destacado de CIS, pero no tienen capacidad suficiente para lo que describes. Tendría que ser

un mínimo para poder montar los relés dependiendo de la distancia, es decir, eso con respeto personal, con respecto a la logística sería mucho más difícil porque si hablamos ya entre 40 y 100 Km, la cantidad de relés será de, entre 2 y 5, dependiendo del terreno. Es decir, una logística considerable y muy complicada en la práctica.
En cuanto a seguridad, es mucho más vulnerable, obviamente, es decir, para alimentar o abastecer a esa gente lleva su tiempo, conlleva sus planes de seguridad y demás, carburante, etcétera. Y, sobre todo, la vulnerabilidad si falla uno de esos repetidores fracasaría toda la comunicación. Por lo tanto, lo más factible es un elemento aislado, una radio con capacidad para enlace. Por tanto, yo descartaría el uso de una de una sección de relés.

2. **(P) Los enlaces vía satélite se podrían presentar como una opción para superar limitaciones que se plantean, ¿Qué ventajas e inconvenientes identifica para su empleo en un escenario de combate? ¿Considera que representen riesgo de dependencia o vulnerabilidad al depender de este tipo de comunicaciones?**

(R) Ahora mismo no tenemos un terminal táctico que haga un enlace vía satélite. Estaban los CLX 5 pero ya están prácticamente desuso. Claro, hay terminales de cobertura global, como Inmarsat BGAN, Iridium o Thuraya, pero eso no es factible a nivel táctico.

(P) Por tanto, parece que a nivel grupo táctico no sería apto un medio satélite sería una mejor opción la radio HF

(R) Así es, HF, o incluso UHF TAS que es una opción de radio que tienen los Soria. Las que se utilizan son las Harris modelo 117, en varias versiones.
Es una radio no es satélite, ese enlace es radio satélite, es decir, tú tienes el satélite y utiliza la comunicación UHF Radio con satélites OTAN en el enlace, pero es una radio con varias modalidades.

3. **(P) Dada la naturaleza de las ondas de radio HF (Alta Frecuencia), que permiten comunicaciones de larga distancia mediante refracción en la ionosfera, ¿Cree que la radio HF sería preferible a VHF para la comunicación entre los Grupos de Artillería de Campaña (GACA) y los Observadores Avanzados (OAV) en el entorno futuro descrito?**

(R) Si estamos hablando de línea de visión, por supuesto, más que nada por distancia.

(P) ¿Como por ejemplo la Harris RF 7800H?
(R) La 7800H con el firmware actualizado y el ancho de banda de 120 Kbps. Sí sería muy buena opción, quizás la mejor.

(P) También estaría la Thales HF3000…
(R) En base a mi experiencia la Harris sería mejor opción.

4. **(P) ¿Considera suficiente el estado actual de madurez y fiabilidad de las radios SDR (Radios desarrolladas por software) específicamente diseñadas para aplicaciones militares? ¿Hay sistemas SDR que ya hayan sido probados y adoptados por fuerzas armadas de otros países con éxito?**

(R) Si, hay ejércitos que ya la tienen en uso. De hecho, la nueva radio adquirida por el ejército español, la Elbit tanto en sus versiones “hand-held”, “man-pack” o vehicular, su mayor componente es SDR.
La ventaja es que muchos de sus componentes pasan de ser físicos hardware a software, lo cual permite muchas actualizaciones. Son radios que permiten mayores anchos de banda, pero como inconvenientes son más difíciles de gestionar.

(P) ¿Podríamos considerar Harris RF 7800H una SDR?
(R) Se podrían considerar radios SDR ya que tiene componentes SDR. Tiene firmware que le permiten actualización.
A pesar de todo, la radio SDR en el Ejército español todavía no está en un estado de consolidación muy maduro y la Harris es muy fiable.

5. **(P) ¿Cuáles deberían ser los criterios que se deberían valorar y ponderar para la selección del mejor medio de transmisiones para la aplicación que estamos considerando?**

(R) Capacidad de enlace, donde incluimos ancho de banda, alcance, etc.
Luego, la compatibilidad. Como es obvio, la Seguridad. El Costo, lo dejaría aparte, ya que es lógico que una radio de esas características tenga un coste elevado.
Hay otro criterio, la Logística. Cuando se adquiere una radio, necesito un soporte detrás. Por una parte, adquirir las suficientes unidades y por otro, ese soporte de segundo, tercero y cuarto escalón de mantenimiento que permita el sostenimiento de ese equipo radio a lo largo del tiempo. De nada sirve adquirir una radio si luego no hay disponibilidad de repuestos o no tengo una empresa que garantice este soporte a lo largo del tiempo. También la formación podría considerarse dentro de este soporte técnico.
Importante, tenerlo en cuenta. En el caso de EE. UU., no permite una venta ilimitada de unidades a un país y obviamente, las claves que no son proporcionadas por los fabricantes, claro si no se pagan aparte, lo que supone un extra coste importante.

Anexo II

Cuestionario de valoración de criterios

MEJORAS EN LA COMUNICACIÓN CON LOS OBSERVADORES AVANZADOS

PONDERACIÓN DE CRITERIOS DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS
En este Trabajo Fin de Grado (TFG) se propone la mejora de los medios de comunicación con los Observadores Avanzados en un grupo de Artillería de Campaña. Con este objetivo, se han considerado unos determinados criterios cuya evaluación facilitará la selección de las alternativas planteadas en este TFG.

En el cuestionario se solicita valorar de 1 a 9 según el nivel de importancia que se considera para cada criterio (siendo 1 poco importante y 9 muy importante). En cada pregunta se dará la definición de cada criterio para facilitar su interpretación.

1. Indique la escala a la que pertenece:

- [ ] Oficial
- [ ] Suboficial
- [ ] Tropa

2. Valore de 1 a 9 la importancia del criterio **ALCANCE EFECTIVO (ALCANCE)**: El sistema de comunicación seleccionado debe ser capaz de establecer conexiones fiables y claras en las distancias (entre 40 km y 100 km). El alcance real podría necesitar ser aún mayor, teniendo en cuenta posibles obstáculos y desplazamientos en el campo de batalla.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
○	○	○	○	○	○	○	○	○

3. Valore de 1 a 9 la importancia del criterio **INTEGRACIÓN CON SISTEMAS EXISTENTES (INTEGRACIÓN)**: Es esencial que el medio de comunicación adoptado pueda integrarse con sistemas ya en uso, como el Sistema C2 TALOS y otros equipos de comunicación existentes, minimizando la necesidad de infraestructuras totalmente nuevas o cambios radicales.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
○	○	○	○	○	○	○	○	○

4. Valore de 1 a 9 la importancia del criterio **COMPORTAMIENTO A RELIEVES DEL TERRENO (TERRENO)**: El sistema debe ser resistente a interferencias naturales y artificiales y ser capaz de operar eficientemente en zonas con obstáculos naturales como montañas o bosques.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

5. Valore de 1 a 9 la importancia del criterio **SEGURIDAD Y ENCRIPTACIÓN (SEGURIDAD):** El sistema seleccionado debe contar con medidas robustas de encriptación y protección contra intentos de interceptación, sabotaje o hacking.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

6. Valore de 1 a 9 la importancia del criterio **CAPACIDAD TRANSMISIÓN DE DATOS (DATOS)**: Además de la comunicación de voz, el sistema debe ser capaz de transmitir datos (para el Sistema C2 TALOS). Esto implica que debe tener un adecuado ancho de banda y capacidad para manejar diferentes tipos de información.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

7. Valore de 1 a 9 la importancia del criterio **FLEXIBILIDAD Y ADAPTABILIDAD (FLEXIBILIDAD)**: El entorno operativo puede cambiar rápidamente, por lo que el medio de comunicación debe ser adaptable.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

8. Valore de a 9 la importancia del criterio **FIABILIDAD Y MANTENIMIENTO (FIABILIDAD)**: Es esencial que el sistema de comunicación sea robusto y requiera un mantenimiento mínimo en el campo. Además, cuando se necesiten reparaciones o ajustes, estos deben ser rápidos y sencillos de realizar

1 2 3 4 5 6 7 8 9

9. ¿Considera algún otro criterio que pudiera facilitar la selección de un medio de transmisión eficaz para la aplicación descrita?
Por favor, indíquelo.

Texto de respuesta corta

Anexo III

Método de Análisis Jerárquico AHP (Analytic Hierarchy Process)

El Método de Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés Analytic Hierarchy Process) fue desarrollado por el matemático Thomas L. Saaty en la década de 1970. Es una metodología utilizada para la toma de decisiones en situaciones complejas que involucran múltiples criterios.

Se basa en la descomposición de un problema en una estructura jerárquica de subproblemas y criterios, y luego en la evaluación de las alternativas en función de esos criterios. A continuación, se detallan los principales pasos y características de la metodología AHP:

Definición del problema y estructuración jerárquica:

Se descompone el problema en una estructura jerárquica, donde el nivel superior representa el objetivo global, los niveles intermedios representan criterios y subcriterios, y el nivel inferior representa las alternativas.

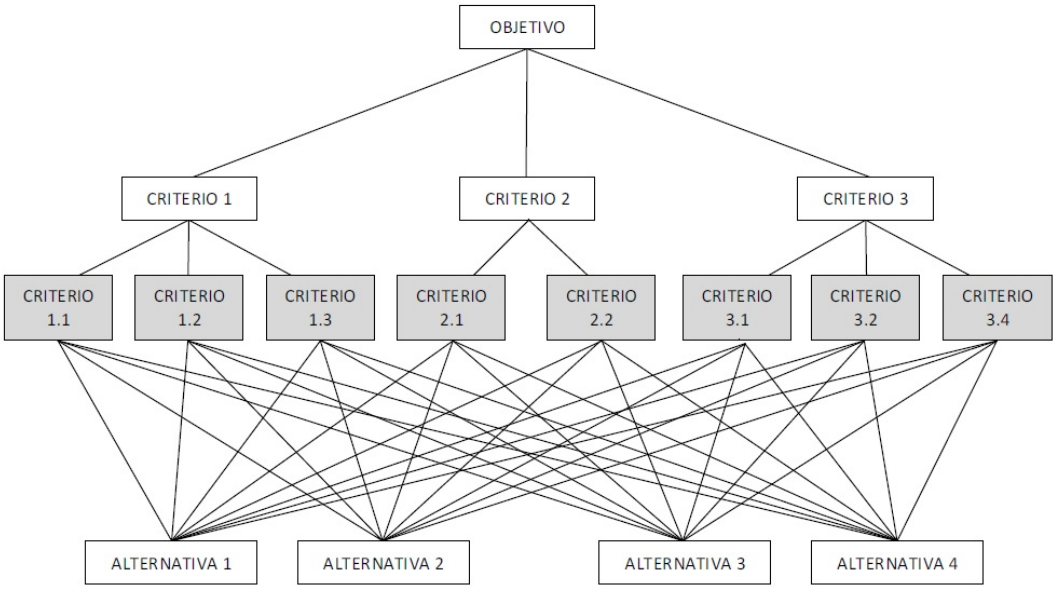


Figura 9. Representación jerárquica AHP [14]

Comparación por pares:

Para cada nivel jerárquico, se hacen comparaciones por pares de los elementos con respecto a su importancia o prioridad en relación con el elemento de nivel inmediatamente superior.

Las comparaciones se realizan mediante una escala de 1 a 9, donde 1 significa que los dos elementos son igualmente importantes y 9 indica que uno es extremadamente más importante que el otro. [13]

VALOR	DEFINICIÓN	COMENTARIOS
1	Igual importancia	El criterio A es igual de importante que el criterio B
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre el B
5	Importancia grande	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente el criterio A sobre el B
7	Importancia muy grande	El criterio A es mucho más importante que el B
9	Importancia extrema	La mayor importancia del criterio A sobre el B está fuera de toda duda
2,4,6 y 8	Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar	

Tabla 10. Escala Saaty [13]

Esta comparación por pares resulta en matrices cuadradas para cada conjunto de criterios o subcriterios.

•Si tenemos n elementos a comparar, generamos una matriz A de dimensiones n×n, donde el elemento aij representa la importancia relativa del elemento i con respecto al elemento j.

•Por definición, aii=1 (ya que un elemento comparado consigo mismo tiene igual importancia) y aij=1/aji (si el elemento i es 3 veces más importante que j, entonces j es 1/3 de i)

Obtención de los vectores de prioridad:

Utilizando los valores de la matriz resultante de la comparación por pares, se determinan los vectores de prioridad, que representan la importancia relativa de cada elemento en un nivel particular.

Se suele utilizar el método de los valores propios, especialmente el valor propio máximo, para determinar estos vectores.

•Se busca el vector propio w correspondiente al valor propio máximo λmax de la matriz A. Este vector propio representa las prioridades relativas de los elementos.

•Normalmente, w se normaliza de manera que la suma de sus componentes sea 1

Verificación de la consistencia:

Es fundamental verificar que las decisiones tomadas en las comparaciones por pares sean consistentes. Para ello, se calcula el índice de consistencia (IC) y la razón de consistencia (RC).

Si la RC es aceptable, entonces la matriz de comparación es consistentemente juzgada. Si no, es necesario revisar y corregir las comparaciones.

•El valor propio máximo λmax es utilizado para calcular el índice de consistencia (IC).

IC= (λmax−n)/(n-1)

Donde n es el número de elementos comparados.

•El índice de consistencia es comparado con un índice de consistencia aleatoria (ICA) que representa el IC de una matriz generada aleatoriamente. La razón de consistencia (RC) se calcula como: RC = IC/ICA

n Tamaño de la matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CA Consistencia aleatoria	0	0	0,58	0.90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45

Tabla 11. Cálculo de la consistencia aleatoria [13]

Síntesis global:

Las prioridades locales de cada nivel se combinan para obtener las prioridades globales de las alternativas en relación con el objetivo principal.

Esta síntesis se realiza multiplicando las prioridades locales de los criterios con las de las alternativas respecto a esos criterios y sumando los resultados.

Matemáticamente, si wc es el vector de prioridades de los criterios y wa1, wa2..., wan son los

vectores de prioridades de las alternativas respecto a cada criterio, las prioridades globales Wg se calculan como:

Wg=wc[1]×wa1+wc[2]×wa2+...+wc[n]×wan

Decisión:

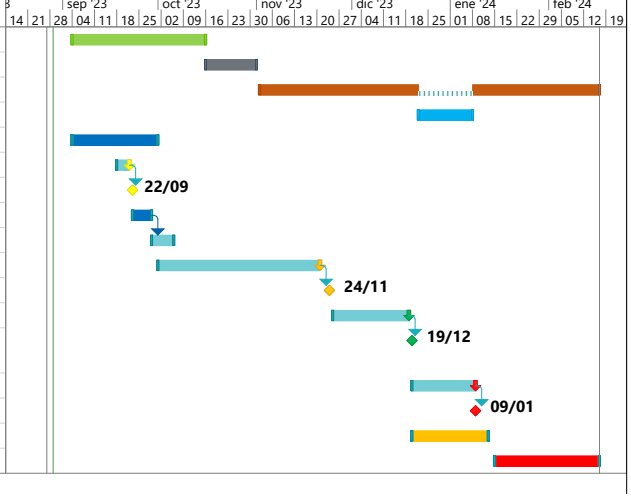
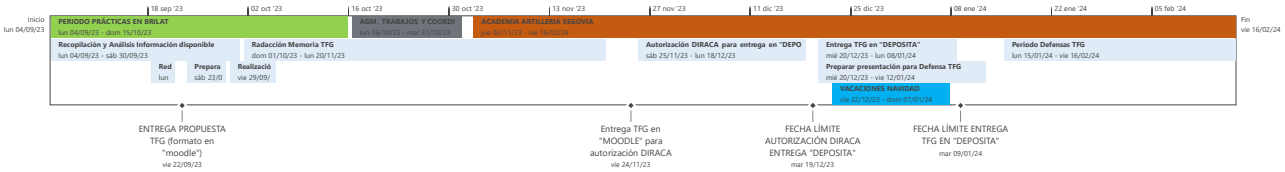
La alternativa con la mayor prioridad global es considerada la mejor opción en función de los criterios establecidos.

AHP es ampliamente utilizado en diversas áreas, incluyendo planificación estratégica, selección de proveedores, gestión de proyectos, diseño de productos, y muchas otras decisiones multicriterio.

AHP proporciona una estructura formal y matemáticamente rigurosa para abordar problemas de decisión multicriterio. Permite a los tomadores de decisiones descomponer problemas complejos en partes manejables, juzgar cualitativamente la importancia relativa de los criterios y alternativas, y finalmente llegar a una decisión basada en esas evaluaciones. [13]

Anexo IV

Planificación general del TFG (Realizada con el programa *Microsoft Project*)

PLANIFICACIÓN TRABAJO FIN DE GRADO CAC IGNACIO JAVIER GONZÁLEZ GONZÁLEZ

Id	Nombre de tarea	Duraci	Comienzo	Fin
1	PERIODO PRÁCTICAS EN BRILAT	31 días	lun 04/09/23	dom 15/10/23
2	AGM. TRABAJOS Y COORDINACIÓN TFG	12 días	lun 16/10/23	mar 31/10/23
3	ACADEMIA ARTILLERIA SEGOVIA	66 días	jue 02/11/23	vie 16/02/24
4	VACACIONES NAVIDAD	12 días	vie 22/12/23	dom 07/01/24
5	Recopilación y Análisis Información disponible	21 días	lun 04/09/23	sáb 30/09/23
6	Redacción y entrega Propuesta TFG	4 días	lun 18/09/23	jue 21/09/23
7	ENTREGA PROPUESTA TFG (formato en "moodle")	0 días	vie 22/09/23	vie 22/09/23
8	Preparación de Entrevistas a Expertos Unidad	5 días	sáb 23/09/23	jue 28/09/23
9	Realización de Entrevistas	5 días	vie 29/09/23	jue 05/10/23
10	Radacción Memoria TFG	37 días	dom 01/10/23	lun 20/11/23
11	Entrega TFG en "MOODLE" para autorización DIRACA	0 días	vie 24/11/23	vie 24/11/23
12	Autorización DIRACA para entrega en "DEPOSITA"	17 días	sáb 25/11/23	lun 18/12/23
13	FECHA LÍMITE AUTORIZACIÓN DIRACA ENTREGA "DEPOSITA"	0 días	mar 19/12/23	mar 19/12/23
14	Entrega TFG en "DEPOSITA"	14 días	mié 20/12/23	lun 08/01/24
15	FECHA LÍMITE ENTREGA TFG EN "DEPOSITA"	0 días	mar 09/01/24	mar 09/01/24
16	Preparar presentación para Defensa TFG	18 días	mié 20/12/23	vie 12/01/24
17	Periodo Defensas TFG	25 días	lun 15/01/24	vie 16/02/24