

Trabajo Fin de Grado

Estudio para implementación de la radio Harris RF-5800-H en el Leopard 2E para enlace la aviación de apoyo

Autor

Alejandro Moreno del Castillo

Director/es

Director académico: Dra. Dña. Noelia Marcano Aguado

Director militar: Cap. D. Ignacio Navarro García-Gutiérrez

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar

2023



[PAGINA INTENCIONALMENTE EN BLANCO]



AGRADECIMIENTOS

En este punto, quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que han contribuido a hacer posible la ejecución de este proyecto. Sus aportes, respaldo y motivación desempeñaron un papel crucial en cada fase de este desarrollo.

En primer lugar, deseo agradecer a mi director académico la doctora Dña. Noelia Marcano Aguado, por su guía experta y paciencia constante. Sus consejos y conocimientos fueron esenciales para dar forma a este trabajo de investigación. Así mismo, quiero agradecer a mi director militar el capitán de Infantería D. Ignacio Navarro García-Gutiérrez, quien con su amplio conocimiento sobre el tema abordado y su colaboración en este trabajo ha ayudado en gran medida a la realización de este.

Agradezco a mi familia y seres queridos por su apoyo inquebrantable. Sus palabras de aliento y comprensión me motivaron a seguir adelante en los momentos más desafiantes.

También quiero agradecer al Regimiento de Infantería de carros de combate "Castilla" 16, y en especial a la 2ª Compañía del Batallón "Mérida" I/16, el haberme transmitido el conocimiento y la pasión por de los carros de combate. Gracias a vosotros mi labor en este período ha sido mucho más fácil y llevadera.

No puedo pasar por alto la colaboración valiosa de mis compañeros de estudio, quienes compartieron ideas y recursos que enriquecieron este trabajo.

Por último, agradezco a todas las fuentes de investigación, autores y profesores del Centro Universitario de la Defensa, cuyas obras e investigaciones previas fueron la base de este trabajo.

Gracias a todos por ser parte de este viaje y por contribuir al éxito de este trabajo.



[PAGINA INTENCIONALMENTE EN BLANCO]



RESUMEN

El estudio realizado representa un esfuerzo dirigido a mejorar las capacidades de comunicación y coordinación dentro del ámbito militar, un área que ha cobrado especial relevancia dada la complejidad creciente de las operaciones en el siglo XXI. El vehículo de combate Leopard 2E, que ya es una máquina imponente en términos de potencia y funcionalidad, ha sido objeto de esta investigación con el fin de potenciar aún más sus capacidades comunicativas.

La elección de la radio Harris RF-5800-H no es casual. Esta radio, reconocida por su robustez y eficiencia, promete establecer un enlace comunicativo de alta calidad con la aviación militar. En el escenario actual, donde los conflictos pueden variar desde enfrentamientos en el terreno hasta ciberataques sofisticados, la rapidez y claridad en la comunicación son vitales. Cada segundo cuenta y cualquier retraso o malentendido puede resultar en consecuencias desastrosas.

El objetivo principal detrás de esta integración es eliminar los obstáculos de comunicación entre las unidades terrestres y aéreas. Esta sinergia permitiría una respuesta más ágil y coordinada ante cualquier situación adversa, garantizando que las fuerzas terrestres y aéreas actúen como una entidad cohesiva y no como unidades separadas.

El proceso de integración no fue sencillo. Se llevó a cabo un análisis detallado de las capacidades y sistemas del Leopard 2E, poniendo especial énfasis en sus mecanismos de transmisión de datos y comunicación. La radio Harris RF-5800-H emergió como la solución ideal después de considerar diversas alternativas. La elección se basó no solo en la compatibilidad técnica, sino también en la confiabilidad y eficiencia de la radio.

Para garantizar una decisión informada, se aplicó el método AHP (Analytic Hierarchy Process), una técnica de toma de decisiones que permite evaluar múltiples criterios. El resultado fue claro: la transmisión a través del método HF (High Frequency) es la opción más adecuada para el vehículo, sobre todo por su alta prioridad en criterios esenciales, como la claridad de la señal y el alcance.

En conclusión, con la adopción de la radio Harris RF-5800-H, el vehículo de combate Leopard 2E no solo mejora su capacidad de comunicación, sino que también refuerza su posición como una herramienta esencial en el campo de batalla. Esta mejora en la comunicación garantiza que el vehículo y la aviación actúen de manera más sincronizada, lo que puede ser la diferencia entre el éxito y el fracaso en operaciones militares. Es un testimonio del compromiso continuo por mejorar y adaptarse a las necesidades cambiantes del ámbito militar.

PALABRAS CLAVE: Carro de combate Leopard 2E; Radio transmisiones; Método AHP.



ABSTRACT

The study undertaken represents an effort aimed at enhancing the communication and coordination capabilities within the military sphere, an area that has taken on particular importance given the increasing complexity of operations in the 21st century. The Leopard 2E combat vehicle, already a formidable machine in terms of power and functionality, has been the subject of this research in order to further amplify its communicative abilities.

The choice of the Harris RF-5800-H radio is not arbitrary. This radio, known for its robustness and efficiency, promises to establish a high-quality communication link with military aviation. In the current scenario, where conflicts can range from ground confrontations to sophisticated cyberattacks, speed and clarity in communication are essential. Every second matters, and any delay or misunderstanding can result in disastrous consequences.

The primary goal behind this integration is to remove communication barriers between ground and air units. This synergy would allow for a more agile and coordinated response to any adverse situation, ensuring that ground and air forces operate as a cohesive entity and not as separate units.

The integration process was not straightforward. A detailed analysis of the capabilities and systems of the Leopard 2E was conducted, with a special focus on its data transmission and communication mechanisms. After considering various alternatives, the Harris RF-5800-H radio emerged as the ideal solution. The choice was based not only on technical compatibility but also on the reliability and efficiency of the radio.

To ensure an informed decision, the AHP (Analytic Hierarchy Process) method was applied, a decision-making technique that allows the evaluation of multiple criteria. The outcome was clear: transmission via the HF (High Frequency) method is the most suitable option for the vehicle, especially due to its high priority in essential criteria, such as signal clarity and reach.

In conclusion, with the adoption of the Harris RF-5800-H radio, the Leopard 2E combat vehicle not only enhances its communication capability but also solidifies its position as a vital tool on the battlefield. This improvement in communication ensures that the vehicle and aviation operate more synchronously, which could be the difference between success and failure in military operations. It is a testament to the ongoing commitment to improving and adapting to the ever-changing needs of the military domain.

KEY WORDS: Battle tank Leopard 2E; Radio transmissions; AHP Method.



[PAGINA INTENCIONALMENTE EN BLANCO]



1. INDICE DE CONTENIDO

Agradecimientos.....	I
RESUMEN.....	III
PALABRAS CLAVE.....	III
ABSTRACT.....	IV
KEY WORDS.....	IV
INDICE DE CONTENIDO	VI
INDICE DE ILUSTRACIONES.....	VIII
INDICE DE TABLAS	IX
ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS.....	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....	2
2.1 OBJETIVOS	2
2.2 ALCANCE	2
2.3 AMBITO DE LA APLICACIÓN	3
2.4 METODOLOGÍA	3
3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO	4
3.1 ANTECEDENTES.....	4
3.2 MARCO TEÓRICO	5
3.2.1 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO	5
3.2.2 RADIO HARRIS RF 5800-H.....	6
3.2.3 CARRO DE COMBATE LEOPARDO 2E.....	8
3.3. CONCEPTOS PREVIOS: BATALLÓN DE INFANTERÍA DE CARROS DE COMBATE	10



3.3.1.	CONCEPTO DE BICC.....	10
3.3.2.	ORGANIZACIÓN DE UN BICC.....	11
4.	DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	13
4.1	ANÁLISIS DE LAS NECESIDADES DE LAS RADIOTRASMISIONES Y LA COMUNICACIÓN	13
4.2	ANÁLISIS DE LAS CAPACIDADES DEL VEHICULO LEOPARDO 2E.....	14
4.2.1.	RED RADIO VHF.....	14
4.2.2.	SISTEMA BMS-LINCE	16
4.3	METODOLOGIA MULTICRITERIO AHP	17
4.4.	APLICACIÓN DEL METODO AHP AL ESTUDIO	17
4.4.1	PRIMERA ETAPA: FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	18
4.4.2	SEGUNDA ETAPA: EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS.....	21
4.4.3	TERCERA ETAPA: EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS.....	24
4.4.4	CUARTA ETAPA: JERARQUIZACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS.....	27
4.5	ANÁLISIS DAFO DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS.....	27
4.5.1	Análisis DAFO Radiotransmisión HF.....	28
4.5.2	Análisis DAFO Radiotransmisión VHF.....	30
5.	CONCLUSIONES.....	32
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	33
7.	ANEXO A: Modelo de cuestionario AHP.....	34



INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Diagrama del espectro radioeléctrico Fuente: Redeszone.....	IX
Ilustración 2. Radio Harris 5800H en un MERCURIO 2000.....	7
Ilustración 3. Antena de HF Chelton de un MERCURIO 2000.....	8
Ilustración 4. Carro de combate Leopard 2E. Fuente: Ministerio de Defensa.....	9
Ilustración 5. El batallón de infantería de carros de combate (BICC).....	11
Ilustración 6. La compañía de mando y apoyo.....	11
Ilustración 7. La compañía de servicios.....	12
Ilustración 8. La compañía de infantería.....	12
Ilustración 9. Radio PR4G v2 Fuente: Ministerio de Defensa.....	15
Ilustración 10. PR4G v3 Con acople Vehicular. Fuente: ABC.....	16
Ilustración 11. Sistema BMS-Lince. Fuente: ABC.....	16
Ilustración 12. Esquema de los Criterios, subcriterios y alternativas para la elección del medio óptimo de transmisión. Fuente: Elaboración propia	18
Ilustración 13. Matriz de pesos resultantes de la ponderación de criterios principales	23
Ilustración 14. Resultados del programa para la asignación de pesos a los subcriterios	24
Ilustración 15. Resultados de la Evaluación de Alternativas. Pesos obtenidos por cada alternativa en cada uno de los subcriterios y razón de inconsistencia	26
Ilustración 16. Matriz final en forma de tabla con los resultados del método AHP Fuente (Elaboración propia).....	27



INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de bandas de frecuencia. Fuente: Wikipedia.....	6
Tabla 2. Escala de Saaty.Fuente: Manual de Usuario del Programa Ayuda a la Decisión AHP	21
Tabla 3. Valores a incluir en la matriz en función de lo marcado en la encuesta	22
Tabla 4. Frecuencias sacadas de las encuestas al personal especialista a cerca de los criterios principales	22
Tabla 5. Resultado de encuestas sobre la importancia de los subcriterios	23
Tabla 6. Modelo simplificado de una de las encuestas realizadas.....	24
Tabla 7. Resultados de encuestas: frecuencias y valores medios obtenidos para el criterio Eficiencia	25
Tabla 8. Resultados de encuestas: frecuencias y valores medios obtenidos para el criterio Capacidad de datos	25
Tabla 9. Resultados de encuestas: frecuencias y valores medios obtenidos para el criterio Supervivencia	26
Tabla 10. Análisis DAFO HF	28
Tabla 11. Análisis DAFO VHF	30



ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

	SIGNIFICADO EN ESPAÑOL	MEANING IN ENGLISH
AES	Estándar de Encriptación Avanzado	Advanced Encryption Standard
ALE	Establecimiento automático de enlaces	Automatic Link Establishment
AM	Modulación de Amplitud	Amplitude Modulation
BICC	Batallón de Infantería de Carros de Combate	
CAS	Apoyo Aéreo Cercano	Close Air Support
CC	Carro de Combate	
CESC	Carro Escuela	
CIA	Compañía	
CICC	Compañía de Infantería de Carros de Combate	
CREC	Carro de Recuperación	
CW	Onda Continua	Continuous Wave
ECCM	Contramedidas Electrónicas	Electronic Counter-countermeasures
EVASAN	Evacuación Sanitaria	
FM	Frecuencia Modulada	
GHz	Gigahercios	
GPS	Sistema de Posición Global	Global Positioning System
GT	Grupo Táctico	



Alejandro Moreno del Castillo

GTAC	Grupo táctico	
HF	Alta Frecuencia	Hight Frequency
Hz	Hercio	
IP	Protocolo de Internet	Internet Protocol
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones	International Telecommunication Union
KHz	Kilohercio	
MAPO	Mando y Apoyo	
MELP	Codificador de voz de Predicción Lineal de Excitación Mixta	Mixed-excitation linear prediction vocoder
MHz	Megahercio	
PLM	Plana Mayor	
PPP	Protocolo Punto a Punto	Point-to-Point Protocol
RMS	Raíz Media Cuadrática	Root Mean Square
SGT	Sub-Grupo táctico	
SMS	Servicio de mensajes cortos	Short Message Service
SV	Servicios	
USB	Banda Lateral Superior	Upper Side Band
VHF	Muy Alta Frecuencia	Very Hight Frequency
RFC	Cuerpo Aéreo Real	Royal Flying Corps



1. INTRODUCCIÓN

La dinámica de los conflictos militares ha experimentado una profunda transformación en el siglo XXI. Los enfrentamientos bélicos ya no se limitan a los escenarios convencionales, sino que abarcan un espectro más amplio, incluyendo situaciones asimétricas, guerra urbana y ciberataques. En este nuevo paradigma, la comunicación efectiva y la movilidad estratégica se erigen como pilares fundamentales para el éxito en el campo de batalla.

El mundo actual es testigo de una realidad militar en constante evolución. Los conflictos ya no se limitan a las vastas extensiones de terreno, sino que han penetrado en los corazones de las ciudades y las zonas urbanas. La guerra urbana, con su complejidad y sus desafíos únicos, se ha convertido en una característica prominente de la contienda actual. Este cambio en la geografía del conflicto ha puesto de manifiesto la necesidad de adaptar y modernizar tanto la tecnología como las tácticas militares.

En este escenario de cambio constante, los medios de transmisión HF desempeñan un papel fundamental en la comunicación y coordinación de las operaciones militares. Estos sistemas, basados en la tecnología de alta frecuencia, permiten la comunicación a larga distancia, incluso en condiciones adversas y permiten a las fuerzas militares comunicarse a miles de kilómetros de distancia.

Por otro lado, los carros de combate, vehículos blindados de combate terrestre, desempeñan un papel esencial en la movilidad y la capacidad de respuesta de las fuerzas militares. Estos vehículos, dotados de un alto nivel de protección y armamento, son vitales para el éxito en el campo de batalla. Su adaptación a las necesidades actuales, particularmente en entornos urbanos, se ha convertido en una prioridad estratégica.

La guerra urbana plantea desafíos únicos para los carros de combate. Los entornos estrechos y complejos de las ciudades requieren vehículos altamente maniobrables que puedan operar de manera efectiva en calles estrechas y terrenos difíciles. Además, la protección contra amenazas como dispositivos explosivos improvisados (IED) es esencial. La adaptación de los carros de combate a estas necesidades ha llevado al desarrollo de nuevas tecnologías y tácticas para garantizar su efectividad en los entornos urbanos.

A lo largo de este trabajo de fin de grado, se explorarán en detalle tanto los medios de transmisión como los carros de combate y su relevancia en el panorama militar actual. Se hará un esfuerzo especial en resaltar la importancia de la comunicación entre carros de combate y aviación, ya que la comunicación efectiva entre estos desempeña un papel crucial en las operaciones militares modernas. Tanto los aviones de combate como los vehículos blindados requieren sistemas de comunicación avanzados para coordinar estrategias y mejorar la sinergia en el campo de batalla.

Se investigará cómo estos dos componentes, la comunicación y la movilidad estratégica proporcionada por los carros de combate, son fundamentales para abordar los desafíos actuales en el ámbito militar. Además, entender y utilizar de manera efectiva los medios de transmisión y los carros de combate se ha convertido en un imperativo estratégico para las fuerzas armadas. Este trabajo tiene como objetivo proporcionar una visión integral de su importancia y su papel en la contienda moderna.



2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

2.1 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la viabilidad de la implementación de un carro de combate Leopard 2E con capacidad de transmitir datos y fonía por medio del uso de la banda electromagnética HF mediante el uso de la radio táctica Harris RF-5800H que se encuentra, actualmente, en dotación en el Ejército de Tierra.

El objetivo principal se desglosa en los siguientes objetivos parciales:

1. **Analizar la situación actual de las comunicaciones del Carro de Combate Leopard 2E:** Es imperativo llevar a cabo un estudio exhaustivo que permita determinar la eficacia, robustez y confiabilidad de los sistemas de comunicación integrados en el carro de combate Leopard 2E. Este análisis debe considerar aspectos tecnológicos, la interoperabilidad con otros sistemas y la capacidad de adaptación a las nuevas tendencias en comunicaciones militares.
2. **Establecer los requisitos necesarios del sistema de comunicaciones:** Para garantizar una comunicación efectiva entre el carro de combate Leopard 2E y la Aviación de Ejército, es crucial definir un conjunto de requisitos técnicos y operativos. Estos requisitos deben asegurar la rapidez, seguridad y claridad de las transmisiones, así como la capacidad de resistir interferencias.
3. **Diseñar un método de toma de decisiones para elegir el medio más conveniente:** Para determinar el medio de radiotransmisión más apropiado, es necesario desarrollar un método estructurado de toma de decisiones. Este proceso debe considerar factores como el alcance de transmisión y resistencia a interferencias.
4. **Evaluar la viabilidad del sistema seleccionado:** Una vez seleccionado el medio de radiotransmisión, es esencial evaluar su viabilidad basándose en los requisitos previamente definidos. Esta evaluación debe considerar aspectos técnicos y operativos, garantizando que el sistema cumpla con las expectativas y necesidades del Ejército.

2.2 ALCANCE

La radio Harris 5800h, reconocida en el ámbito militar como uno de los equipos de comunicación táctica más avanzados, se distingue por varias características esenciales para la operatividad de un carro de combate.

Esta radio garantiza comunicaciones seguras gracias a su avanzada encriptación, evitando interceptaciones enemigas. Su capacidad para operar en múltiples bandas y modos facilita la interoperabilidad con diversos sistemas en el campo. Además, su diseño robusto la hace resistente a impactos y condiciones extremas, mientras que su interfaz intuitiva acelera la capacitación de los operadores.

La Harris 5800h, con su amplia cobertura, asegura comunicaciones efectivas en áreas desafiantes, y su arquitectura modular permite futuras actualizaciones. En conjunto, su instalación en un carro de combate potenciaría significativamente las operaciones militares al garantizar comunicaciones seguras, confiables y efectivas. Este trabajo se centra en realizar un análisis de las necesidades de las radiotransmisiones y la comunicación en los carros de combate Leopard 2E y en la evaluación de las diferentes posibilidades a disposición del ET.



2.3 AMBITO DE LA APLICACIÓN

El sistema abordado en este TFG está diseñado para el conjunto del Ejército de Tierra, poniendo especial énfasis en las unidades de Caballería e Infantería Acorazada del ET. Se enfoca en estas unidades por una razón principal: la capacidad de medios acorazados y de tecnología de las que disponen.

Las unidades de carros de combate se caracterizan por su gran blindaje y potentes sistemas de armas. Generalmente usan cañón principal y armas secundarias como ametralladoras, su movilidad gracias a orugas, que les permiten desplazarse por terrenos difíciles. Los carros de combate son esenciales en el campo de batalla debido a su capacidad para llevar a cabo ataques directos, proporcionar apoyo de fuego y resistir fuego enemigo. Además, cuentan con sistemas avanzados de comunicación y tecnología de punta en detección y protección.

Debido a la elevada tasa de supervivencia de estas unidades, resulta imperativo equipar los carros de combate Leopard 2E con sistemas avanzados que permitan la comunicación efectiva con la Aviación del Ejército.

2.4 METODOLOGÍA

Se han utilizado diferentes herramientas en función de la fase del trabajo abordada. Las herramientas aplicadas han sido:

1. Durante el periodo de análisis correspondiente a la situación actual de las comunicaciones del Carro de Combate Leopard 2E, se efectuaron exhaustivas revisiones de fuentes bibliográficas, además de llevar a cabo consultas con profesionales destacados en el ámbito.
2. A lo largo de la etapa destinada a la definición de requisitos del sistema comunicativo, se organizaron entrevistas con expertos especializados en el tema en cuestión y se emplearon cuestionarios estructurados con el propósito de obtener un conocimiento profundo de las necesidades del sistema.
3. En la tercera etapa, se estructuró un método de toma de decisiones multicriterio fundamentado en el AHP, considerando meticulosamente los pesos de los criterios determinados en la etapa previa.
4. Durante la fase final, se procedió a la evaluación de los riesgos asociados a las alternativas prevalecientes mediante la implementación de un análisis DAFO, conforme a los resultados derivados del método AHP.



3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

3.1 ANTECEDENTES

Los tanques se utilizaron por primera vez en septiembre de 1916 durante la Primera Guerra Mundial, aunque se realizaron pruebas con vehículos comerciales con placas blindadas desde finales del siglo XIX. En el inicio de la guerra, solo había unos pocos vehículos blindados con ruedas equipados con ametralladoras o cañones pequeños que se usaban para tareas secundarias como la escolta de convoyes, reconocimiento y transporte de personal, así como para luchar contra globos de observación de artillería.

En el Ejército español, a partir de 1910, se adquirieron y fabricaron camiones protegidos para su uso en la campaña de Marruecos. Estos vehículos, adaptados a partir de chasis comerciales, tenían una movilidad limitada, pero prestaron servicios valiosos. (Fernández Mateos, 2012)

A medida que se demostraba la efectividad de los tanques, se vio la necesidad de desarrollar otros blindados para diversas misiones, como transporte de personal, vehículos de artillería y morteros, puestos de mando móviles y unidades de recuperación. Durante la Primera Guerra Mundial, el Ejército español tenía una compañía de carros Renault FT-17 de Infantería y una batería de carros de asalto de Artillería.

A lo largo de la Segunda Guerra Mundial, se hizo evidente que los tanques requerían el apoyo de otras unidades blindadas con movilidad similar. Por lo tanto, se desarrollaron diferentes tipos de blindados para unidades de reconocimiento, zapadores, transmisiones y antiaéreas.

Hoy en día, las unidades de carros que operan de forma aislada ya no son aceptables. Se requieren fuerzas acorazadas/mecanizadas heterogéneas en las que todos los elementos tengan protección y movilidad similares a los tanques. Esto es esencial para la eficacia de un ejército, no solo basta con contar con carros de combate de última generación, sino también con blindados especiales que equilibren las capacidades de las unidades. (Fernández Mateos, 2010)

Por otro lado, y casi de manera simultánea con el comienzo de la utilización de carros de combate, se daban las primeras misiones de apoyo aéreo sobre trincheras. Fue durante la Primera Guerra Mundial, cuando el Cuerpo Aéreo Real (RFC) inició operaciones de "ataque a las trincheras" (CAS) en el frente occidental en 1917. Para llevar a cabo estas misiones, se adaptaron aviones de combate como el S.E.5a y el Sopwith Camel para transportar bombas. El RFC llevó a cabo operaciones directamente en el frente, atacando a las fuerzas enemigas ubicadas hasta 30 kilómetros o más detrás de las líneas del frente. El servicio Aéreo Alemán Imperial pronto siguió este ejemplo, desarrollando el Albatros J.I, que fue el primer avión blindado capaz de resistir disparos de defensas antiaéreas. Estas misiones se convirtieron en una parte común de las grandes ofensivas a partir de ese momento. (Sáez, 29 de julio de 2017)



3.2 MARCO TEÓRICO

3.2.1 ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Para comprender las radiocomunicaciones, es esencial comenzar con una sólida comprensión de los principios fundamentales de la radiación electromagnética.

Las ondas de radio son parte de la amplia familia de la radiación electromagnética, que también incluye formas de energía que utilizamos en nuestra vida cotidiana, como los rayos X, la luz ultravioleta y la luz visible. De manera similar a las ondas que se forman en la superficie de un lago tranquilo cuando arrojam una piedra, las señales de radio se irradian desde una antena de transmisión, propagándose hacia el exterior. Es importante destacar que estas ondas de radio se desplazan a la velocidad de la luz.

Para describir una onda de radio, se utilizan tres características principales: amplitud, frecuencia y longitud de onda. La amplitud se relaciona con la altura de la onda, es decir, la distancia entre su punto más alto (pico) y su punto más bajo. Los ingenieros suelen expresar la amplitud en voltios y, a menudo, utilizan un valor promedio llamado "valor medio cuadrático" o RMS.

La frecuencia de una onda de radio se refiere al número de ciclos que completa en un período de tiempo. La frecuencia se mide en hercios (Hz), siendo equivalente a un ciclo por cada segundo. En ocasiones, se utilizan múltiplos como kilohercios (KHz) o megahercios (MHz). En la Ilustración 1 se muestran los valores de las distintas bandas del espectro radioeléctrico.

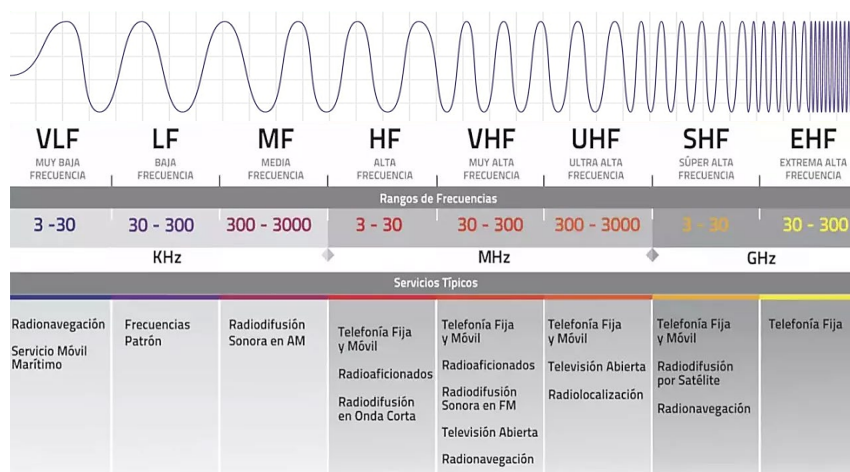


Ilustración 1 Diagrama del espectro radioeléctrico Fuente: Redeszone (Espinosa, 2023)

La longitud de onda de una señal de radio es la distancia entre las crestas de la onda. La relación entre la longitud de onda y la frecuencia es constante y se relaciona con la velocidad de propagación. A medida que la frecuencia aumenta, la longitud de onda se reduce, y viceversa. Este espectro amplio y versátil permite una variedad de aplicaciones en las comunicaciones y la tecnología inalámbrica. (Frenzel, 2003)



Las bandas de frecuencia que se muestran en la Tabla 1 corresponden a las bandas de los sistemas de radiotransmisión que se analizan en este trabajo.

Nombre	Abreviatura inglesa	Banda ITU	Frecuencias	Longitud de onda
Alta frecuencia	HF	7	3-30 MHz	100-10 m
Muy alta frecuencia	VHF	8	30-300 MHz	10-1 m
Ultra alta frecuencia	UHF	9	300-3000 MHz	1 m-100 mm
Super alta frecuencia	SHF	10	3-30 GHz	100-10 mm

Tabla 1. Descripción de bandas de frecuencia. Fuente: International Electrotechnical Commission (Commission, 2023)

3.2.2. RADIO HARRIS RF 5800-H

La RF-5800H es un componente de la familia de sistemas de radio táctica multibanda FALCON II, desarrollada por la empresa estadounidense HARRIS. Se trata de una radio avanzada que combina comunicaciones tácticas fiables con una serie de características notables.

Esta radio opera en un amplio rango de frecuencias que abarca desde 1.6 hasta 59.9999 MHz con ajustes de 100 Hz, lo que le permite funcionar tanto en la banda de alta frecuencia (HF) como en la parte inferior de la banda de frecuencia muy alta (VHF). Además, ofrece una velocidad de transmisión de datos de 9600 bps con protocolos avanzados de corrección de errores, cuenta con un receptor GPS integrado y admite voz digital MELP, encriptación Citadel o Datotek, y saltos de frecuencia en HF mediante tecnología de onda digital CCME. También incorpora una interfaz de protocolo de internet (IP) que permite una conectividad avanzada.

La RF-5800H se distingue por su diseño práctico, ya que posee una unidad de pantalla y teclado desmontable que facilita el acceso a los controles, especialmente cuando se utiliza en movimiento. Adicionalmente, es compatible con diversas antenas y realiza la sincronización y adaptación necesarias según la antena que se esté utilizando. La ilustración 2 muestra la radio RF 5800-H.

Este equipo utiliza técnicas avanzadas de administración de energía para funcionar en modo de baja potencia cuando no se requiere procesamiento de señal, lo que contribuye a su eficiencia energética. Además, dispone de memoria y capacidad de procesamiento que permiten la incorporación de nuevas capacidades y funcionalidades.



Alejandro Moreno del Castillo

La versatilidad de la RF-5800H es destacable, ya que puede configurarse y emplearse de manera portátil, vehicular o en una instalación fija. En resumen, esta radio táctica de HARRIS combina un amplio rango de frecuencias, capacidades avanzadas de procesamiento de datos, gestión eficiente de energía y múltiples opciones de configuración para satisfacer diversas necesidades en el ámbito de las comunicaciones tácticas. (Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2018)



Ilustración 2 Radio Harris 5800H en un MERCURIO 2000

Las principales características de esta radio son (Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2018):

- Trabaja con un rango de frecuencias de 1.6 MHz a 29.9999 MHz (HF) para modulaciones de Banda Lateral Superior (USB), Onda Continua (CW) y Equivalente a Modulación de Amplitud (AME).
- Puede trabajar de 20.000 MHz a 59.9999 MHz en Frecuencia Modulada (FM).
- Soporta encriptación digital: basado en el sistema de cifrado HARRIS Citadel, u opcionalmente el Estándar de Encriptación Avanzado (AES) o el sistema de cifrado Datotek.
- Soporta Contramedidas Electrónicas (ECCM): Capacidad de salto de frecuencia en HF.
- Proporciona información precisa horaria y de la localización geográfica gracias al módulo opcional integrado GPS (Global Positioning System).
- Tiene capacidad de trabajo en red mediante PPP o Ethernet.
- Soporta el protocolo de Internet Inalámbrico Wireless (IP) para la transferencia de datos.
- Soporta modo 3G+, el cual permite a la radio recibir y realizar llamadas en ALE y 3G sin cambiar de modo.
- Permite envío de SMS en 3G.

Capacidad de uso de la antena vehicular HF Chelton, mostrada en la Ilustración 3



Alejandro Moreno del Castillo

*Ilustración 3 Antena de HF Chelton de un MERCURIO 2000*

3.2.3 CARRO DE COMBATE LEOPARDO 2E

3.2.3.1. PROGRAMA LEOPARDO

El proceso de incorporación del Leopard 2E se inició en 1995, seis años después de que se cancelara el proyecto del carro de combate Lince en España. En ese momento, España emprendió acciones para adquirir el Leopard 2, lo que culminó en un acuerdo en 1998 para transferir 108 Leopard 2A4 desde el Ejército Alemán al Ejército de Tierra de España. Además, la producción local del Leopard 2E comenzó en diciembre de 2003 bajo la supervisión de Santa Bárbara Sistemas.

A pesar de enfrentar un retraso en la producción debido a la fusión entre Santa Bárbara Sistemas y General Dynamics en 2003, así como problemas continuos de fabricación entre 2006 y 2007, las entregas de los 219 Leopard 2E encargados al Ejército de Tierra finalizaron en 2008.

El Leopard 2E representó un notable salto adelante en comparación con el AMX-30E, que previamente era el tanque principal utilizado por las unidades blindadas mecanizadas de España. El desarrollo del Leopard 2E implicó una cantidad total de horas de trabajo de 2,6 millones, de las cuales 9,600 se llevaron a cabo en Alemania, y un coste total de 1900 millones de euros. Esto lo convierte en uno de los Leopard 2 más costosos jamás construidos. Varios fabricantes españoles participaron en su producción, con una contribución del 60% de la industria española.

Este carro de combate cuenta con una armadura más gruesa en las áreas más vulnerables al fuego enemigo, como la torreta y la parte frontal del casco, en comparación con el Leopard 2A6 alemán. Además, utiliza un sistema de control y mando de diseño español, similar al equipado en los Leopard 2 alemanes. La producción en España incluyó 197 carros de combate Leopard 2E (CC) y 12 carros de recuperación Leopard 2ER (CREC), mientras que en Alemania



se produjeron 22 carros de combate Leopard 2E (CC), 4 carros de recuperación Leopard 2ER (CREC) y 4 carros escuela Leopard 2E (CESC). (Artero, 2008) (Wikipedia, 2023)

3.2.3.2. DESCRIPCIÓN GENERAL

El vehículo en cuestión es el Leopard 2E (ver ilustración 4), un carro de combate equipado con un cañón de 120 milímetros. Su abreviatura común es CC Leo 2E. El Leopard 2E se utiliza principalmente para enfrentar objetivos blindados, haciendo uso de su cañón de 120 milímetros. Además, cuenta con ametralladoras de calibre 7,62 mm, una montada coaxialmente y otra montada en un soporte antiaéreo, lo que le permite atacar tanto objetivos terrestres como aéreos. La tripulación de este tanque está compuesta por cuatro miembros: el comandante del tanque, el conductor, el tirador y el cargador de radio. (Mando de Adiestramiento y Doctrina, s.f.)



Ilustración 4 Carro de combate Leopard 2E. Fuente: Ministerio de Defensa

El Leopard 2E está equipado con visores térmicos tanto para el tirador (VTT) como para el comandante del tanque (VTJ), lo que le permite operar de manera efectiva tanto de día como de noche, incluso en condiciones de visibilidad reducida, como cuando se enfrenta a objetivos camuflados. (Dpto. técnica militar de la Academia de Infantería, 2016)

Este vehículo tiene la capacidad de mantener su operatividad en áreas con presencia de gases o radiactividad sin poner en riesgo a la tripulación. Además, puede vadear cursos de agua de hasta 1,20 metros de profundidad sin necesidad de preparación previa. Utilizando su equipo de vadeo, puede cruzar corrientes de hasta 2,23 metros de profundidad en modo de vadeo profundo o sumergirse completamente en aguas de hasta 4 metros de profundidad.

El Leopard 2E destaca por su capacidad de lograr impactos precisos en el primer disparo, ya sea contra objetivos en movimiento o estáticos, incluso en situaciones desafiantes, como ángulos de inclinación críticos o maniobras a plena carga. Esto se logra gracias a su torre estabilizada y al periscopio EMES de puntería, que incluye un telémetro láser y canales diurnos y nocturnos, todos completamente estabilizados.

El vehículo también cuenta con un corto tiempo de reacción para adquirir objetivos rápidamente, gracias al uso del periscopio panorámico estabilizado PERI, que permite al jefe del carro una observación independiente y de 360 grados, tanto de día como de noche.

La capacidad del Leopard 2E para enfrentar objetivos se ve reforzada por la alta capacidad de penetración de su cañón de ánima lisa y las municiones APFSDS y HE (alto explosivo rompedor) disponibles para su uso en ejercicios. Para mejorar su protección balística,



el Leopard 2E cuenta con un módulo frontal y faldones delanteros en el tren de rodaje que incorporan blindaje adicional. Además, se ha añadido un blindaje en forma de deflector en la parte delantera del anillo de la torre y la escotilla del conductor.

El Leopard 2E integra un motor de 12 cilindros en V a 90° diésel turboalimentado de 47 600 cm³ que desarrolla una potencia de 1500 caballos de vapor. Esto garantiza un rendimiento óptimo en diversas condiciones operativas y entornos. El vehículo también cuenta con una Unidad de Potencia Auxiliar (UPA) que proporciona energía para la torre cuando el motor principal está apagado, asegurando así la disponibilidad de recursos críticos en todo momento. (Mando de Adiestramiento y Doctrina, s.f.) (Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2021)

3.3. CONCEPTOS PREVIOS: BATALLÓN DE INFANTERÍA DE CARROS DE COMBATE

3.3.1. CONCEPTO DE BICC

El Batallón de Infantería de Carros de Combate (BICC) se considera la unidad fundamental en las operaciones militares, y su principal función es la de constituir la base para formar agrupamientos tácticos en los que prevalecen las características de las fuerzas acorazadas. Normalmente, el BICC opera dentro del marco de una gran unidad, como una brigada, donde lleva a cabo la mayoría de sus acciones, contribuyendo a todos o parte de los esfuerzos de la brigada. (Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2022)

El diseño del BICC está orientado a su integración en operaciones multinacionales y a su capacidad de actuar en diversas situaciones, abarcando un amplio rango de operaciones militares. La estructura del BICC le permite aumentar su capacidad de mando y control, así como su apoyo logístico, lo que es esencial en entornos operativos diversos.

En el futuro, se espera que el BICC se despliegue en áreas de combate no convencionales y participe en enfrentamientos de alta intensidad contra enemigos tecnológicamente avanzados o en apoyo a autoridades civiles en situaciones de crisis.

La organización del BICC es fija y modular, y sus unidades de combate están equipadas con carros de combate. Estos carros de combate cuentan con una amplia gama de capacidades, como alta precisión, velocidad de tiro, capacidad de disparar en movimiento y una potente potencia de fuego. Además, ofrecen una protección adecuada para permitir a las tripulaciones sobrevivir a ataques de diversas armas, lo que influye positivamente en su moral, aunque estos ataques puedan afectar a su eficacia operativa.

La movilidad del BICC en terrenos relativamente difíciles, su capacidad de despliegue rápido y su habilidad para concentrarse rápidamente en objetivos lo hace una unidad altamente maniobrable. Esto lo convierte en una elección ideal para colaborar con unidades mecanizadas y formar agrupamientos tácticos acorazados/mechanizados.

Estos agrupamientos son especialmente efectivos para aprovechar el poder de fuego directo e indirecto, así como para penetrar profundamente en las defensas del enemigo, con el objetivo de desorganizar su sistema defensivo o sus maniobras ofensivas.



3.3.2. ORGANIZACIÓN DE UN BICC

El BICC dispone de mando, plana mayor (PLM) y una organización ternaria, con tres elementos de maniobra de entidad compañía de carros de combate (capacidad de combate), una compañía de mando y apoyo (apoyo al combate) y otra de servicios (apoyo logístico al combate). (Academia General Militar, 2019/2020). La ilustración 5 muestra el organigrama de una BICC.

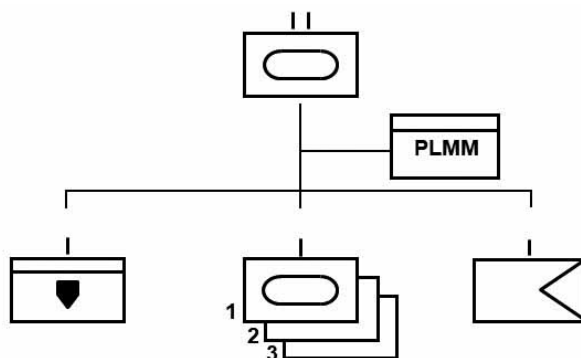
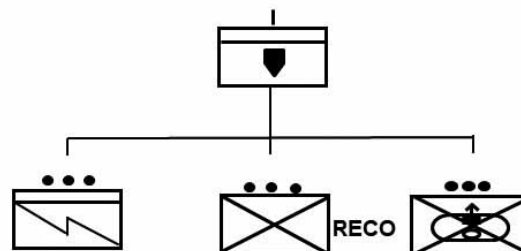


Ilustración 5. El batallón de infantería de carros de combate (BICC)

3.3.2.1. COMPAÑÍA DE MANDO Y APOYO

La compañía de mando y apoyo (Cía. MAPO) es una unidad orgánica de composición heterogénea que encuadra los principales elementos de apoyo de combate del BICC relacionados con la dirección y ejecución de las funciones tácticas de mando, maniobra, inteligencia, fuegos y protección. El organigrama de la MAPO se muestra en la ilustración 6.



La compañía de mando y apoyo se organiza en:

1. Mando y PLM.
2. Sección de mando y transmisiones.
3. Sección de reconocimiento.
4. Sección de morteros.

Ilustración 6 La compañía de mando y apoyo

3.3.2.2. COMPAÑÍA DE SERVICIOS

La compañía de servicios (Cía. Sv.) es una unidad orgánica de composición heterogénea que encuadra los principales elementos de apoyo logístico al combate del BICC relacionados con la dirección y ejecución de las funciones tácticas de apoyo logístico en abastecimiento (parte de subsistencias y carburantes), mantenimiento y sanidad. El organigrama de la compañía de servicios se muestra en la ilustración 7.



Alejandro Moreno del Castillo

La compañía de servicios se organiza en:

1. Mando y PLM.
2. Sección de abastecimiento.
3. Sección técnica de mantenimiento.
4. Pelotón de sanidad.

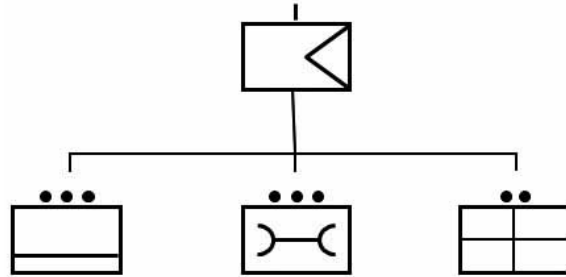


Ilustración 7 La compañía de servicios

3.3.2.3. COMPAÑÍA DE INFANTERÍA DE CARROS DE COMBATE

La compañía de infantería de carros de combate (CICC) es la unidad táctica básica del BICC que encuadra los elementos de maniobra necesarios para combatir al enemigo combinando el movimiento y el fuego, y como tal, es la unidad principal que materializa la maniobra del BICC y, en su articulación como GTAC, sirve de base para la constitución de SGT. Está compuesta por tres elementos de combate y es la menor de las unidades del BICC con posibilidad de reiterar esfuerzos. No cuenta con sección de apoyo. Esta organización y los medios con que está dotada le permiten desarrollar esfuerzos de tipo medio. (Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2022). El organigrama de la CICC se muestra en la ilustración 8.

La compañía de infantería de carros de combate se organiza en:

1. Mando y PLM.
2. Tres secciones de carros de combate.

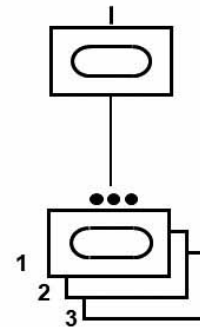


Ilustración 8 La compañía de infantería de carros de combate



4. DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 ANALISIS DE LAS NECESIDADES DE LAS RADIOTRANSMISIONES Y LA COMUNICACIÓN

La implementación de medios de radiotransmisión eficaces en un carro de combate Leopard 2E, con el propósito de establecer un enlace de comunicación efectivo con la aviación del ejército, es una iniciativa de gran relevancia estratégica y táctica. Esta implementación a la infraestructura de comunicaciones de un vehículo blindado como el Leopard 2E se justifica por varias razones fundamentales:

Coordinación de Apoyo Aéreo: En el campo de batalla moderno, la coordinación de apoyo aéreo es esencial para el éxito de las operaciones militares. Un carro de combate como el Leopard 2E puede beneficiarse enormemente de la capacidad de comunicarse de manera efectiva con las aeronaves de apoyo, lo que permite una planificación más precisa y una ejecución más eficiente de las misiones.

Mejora de la Efectividad Operativa: La comunicación efectiva con la aviación del ejército permite al Leopard 2E acceder a una gama de capacidades aéreas, como reconocimiento, evacuación médica y ataques aéreos. La implementación de un medio de transmisión capaz de enlazar con la Aviación de Ejército asegura que el carro de combate pueda aprovechar estas capacidades de manera óptima, mejorando su efectividad en el campo de batalla.

Redundancia de Comunicación: En situaciones de combate, la comunicación puede verse comprometida debido a interferencias, bloqueos o daños en la infraestructura de comunicación digital. Se necesita un medio de transmisión que proporcione una forma adicional de comunicación que actúa como redundancia, lo que garantiza que el enlace con la aviación del ejército permanezca operativo en condiciones adversas, lo que es indispensable para la continuidad de las operaciones.

Comunicación en Zonas Aisladas: En áreas remotas o zonas de conflicto donde la infraestructura de comunicación terrestre o satelital es limitada o inexistente, se necesita una tecnología que pueda establecer comunicaciones a larga distancia. Esto es crucial para mantener la conectividad y el mando y control en operaciones en áreas aisladas.

Flexibilidad Táctica: Un medio de transmisión que permita la comunicación tanto de voz como de datos, brinda una flexibilidad táctica significativa. Esto facilita la transmisión de información crítica, como coordenadas, instrucciones de ataque y evaluaciones de la situación, lo que es esencial para la ejecución efectiva de misiones y la toma de decisiones en tiempo real.

Reducción de la Brecha de Tiempo: Una tecnología que pueda proporcionar una respuesta más rápida y ágil en situaciones de emergencia o cambio de condiciones en el campo de batalla. La inmediatez de la comunicación puede permitir que el Leopard 2E y la aviación del ejército trabajen en estrecha colaboración y se adapten con rapidez a situaciones dinámicas.

Apoyo a Operaciones de Mayor Alcance: La radiocomunicación es esencial en operaciones a larga distancia, como despliegues en teatros de operaciones distantes o en misiones internacionales. Esto asegura que los vehículos blindados estén conectados y respaldados, incluso cuando se despliegan lejos de las bases de operaciones principales.



La actualización de la tecnología de radiocomunicación en el Leopard 2E para enlace con la aviación del ejército, por lo tanto, no solo fortalece sus capacidades operativas, sino que también contribuye de manera significativa a la interoperabilidad y coordinación eficiente en un entorno de combate. Esta mejora en la comunicación entre vehículos blindados y unidades aéreas es esencial para enfrentar los desafíos de las operaciones militares modernas y maximizar la efectividad de las misiones conjuntas. En resumen, este proyecto se justifica como una inversión estratégica en la mejora de las capacidades militares y la seguridad de las fuerzas armadas.

4.2 ANALISIS DE LAS CAPACIDADES DEL VEHICULO LEOPARDO 2E

En esta sección, se abordarán los sistemas utilizados para la transmisión de datos y comunicaciones por el vehículo objeto de análisis. Las redes militares deben cumplir tres requisitos esenciales. El primero de ellos es su capacidad de adaptarse a una amplia gama de escenarios operativos. En segundo lugar, las redes deben poder ser desplegadas de manera rápida y sencilla. Por último, es crucial que estas redes sean capaces de soportar fallos debido a averías menores o daños parciales. (Mando de Adiestramiento y Doctrina, s.f.)

La restricción principal se relaciona con la limitación del alcance de enlace. Esto se debe a las limitaciones que tiene el medio de transmisión usado actualmente en este vehículo.

Los medios de los que dispone el Leopard 2E son los siguientes:

- 2 radios PR4G v3 (VHF)
- 1 radio PR4G v2
- 1 Puesto de trabajo con Tablet para BMS-Lince
- Posibilidad de establecer una red de telefonía IP

A continuación, se proporciona una descripción detallada de los recursos disponibles en el vehículo, junto con sus características clave.

4.2.1. RED RADIO VHF

Las señales VHF abarcan un espectro de frecuencias que va desde 30 hasta 300 MHz. Estas presentan desafíos debido a su limitado rango de longitud de onda, que restringe su capacidad de propagación. Se desplazan principalmente en forma de ondas de superficie, sin la capacidad de rebotar en las capas atmosféricas, como ocurre en las comunicaciones de banda HF. Esta característica limita su alcance, ya que, en condiciones ideales, no supera los 60 km sobre el terreno. Esto se debe a que las ondas VHF atraviesan la atmósfera sin reflejarse en sus diversas capas y se disipan en el espacio. (Harris Corporation, 2000)

En el espectro VHF, existen dos bandas principales:

1. VHF Bajo, que actúa como un puente entre las bandas HF y VHF y se utiliza comúnmente en entornos rurales. Esta banda es susceptible a interferencias a larga distancia y requiere antenas más grandes y mayor potencia en comparación con el VHF Alto.



2. VHF Alto, que se emplea cuando existe una línea de visión directa entre los puntos de transmisión y recepción. La propagación de las ondas en esta banda se ve principalmente afectada por la topografía del terreno y la atenuación del espacio libre.

RADIO PR4G V2

Entre las características de esta segunda versión (ver ilustración 9), se destacan las siguientes:

1. Se logra una capacidad de transmisión a potencias más elevadas, con valores de 0.5W y 5W.
2. Se implementa la comunicación de voz digital mediante la utilización de un codificador de voz (VOCODER), lo que proporciona una mayor resistencia contra interferencias deliberadas.
3. Se introduce un nuevo software en el sistema denominado TDMA (Acceso Múltiple por División en el Tiempo), que se basa en una técnica de multiplexación. Este protocolo permite una utilización más eficiente del medio de transmisión al distribuir el acceso de manera temporal. Esta tecnología se emplea para dar cobertura al sistema BMS-Lince.



Ilustración 9 Radio PR4G v2 Fuente: Ministerio de Defensa

RADIO PR4G V3

Esta versión (ver ilustración 10) presenta notables mejoras en comparación con el modelo V2, destacando las siguientes características de manera relevante:

1. En cuanto a la transmisión de datos síncronos, se logra alcanzar nuevas velocidades, dependiendo de si se emplea corrección de errores o no. En caso de corrección de errores (mediante el mecanismo de corrección de errores hacia adelante, FEC), las velocidades varían de 9600 a 19200 bps. Si no se requiere corrección de errores, las velocidades son de 16000 a 42000 bps. La transmisión de datos asíncronos también se beneficia de nuevas velocidades, que incluyen 9600, 19200 y 38400 bps, utilizando un protocolo estándar abierto.
2. Se incorpora una mayor potencia en la versión manpack (espaldera), con 10W, además de mantener las posiciones de 0.5W y 5W presentes en la V2.



Alejandro Moreno del Castillo

3. Una novedad significativa es la inclusión de un receptor de señal GPS (Sistema de Posicionamiento Global) que no es compatible con las versiones anteriores y que permite la obtención de la posición, la velocidad y la altitud.
4. Se agrega un controlador IP para llevar a cabo la transmisión de datos a través de los nuevos modos IP. Esto se realiza mediante dos nuevos interfaces estándar: una interfaz Ethernet y una interfaz serie IP, ambos utilizados para la transmisión de datos mediante paquetes IP.



Ilustración 10 PR4G v3 Con acople Vehicular. Fuente: ABC

4.2.2. SISTEMA BMS-LINCE

Se trata de un software que provee las herramientas necesarias para el mando y control de Unidades de Personal (PU) pertenecientes a Grupos Tácticos o Batallones (ver ilustración 11). Este software engloba una serie de capacidades que incluyen la planificación, el seguimiento de unidades propias, la comunicación táctica con la capacidad de adjuntar archivos, el chat táctico, la navegación y la generación de alarmas. Su disponibilidad está limitada a unidades acorazadas y se encuentra implementado en las plataformas LEOPARDO, con planes de futura implementación en la plataforma VCR 8x84. En este contexto, el software también incorpora un módulo de gestión de plataforma (PMS) que integra los sistemas a bordo, diversos sensores y sistemas de identificación amigo-enemigo.



Ilustración 11 Operario utilizando el sistema BMS-Lince. Fuente: ABC

En cuanto a su interoperabilidad, el BMS-Lince es capaz de operar con sistemas similares o compatibles con normativas de la OTAN y puede conectar con SIMACET mediante la pasarela



de Interfaz de Datos Tácticos (IDT). Este software, que combina las funcionalidades de FFT y GESCOM, facilita las tareas de mando y control, ofreciendo flexibilidad, medios y una arquitectura de red adecuada para su uso en unidades acorazadas de menor tamaño. (Sobrido, 2017)

4.3 METODOLOGIA MULTICRITERIO AHP

La técnica AHP es una herramienta que se utiliza para abordar problemas que requieren la evaluación de factores cualitativos y cuantitativos. Su función principal radica en simplificar comparaciones complejas y estructurar los elementos críticos de un problema, además de clasificar los diversos criterios bajo evaluación. Su aplicación principal consiste en contrastar múltiples opciones y determinar cuál de ellas es la más adecuada. Es una herramienta versátil que se adapta tanto a decisiones simples como a situaciones más complicadas. Este proceso se desglosa en cuatro fases fundamentales:

En la primera etapa, se ilustra gráficamente el problema mediante un diagrama jerárquico que vincula diferentes niveles: se define el objetivo central de la clasificación, se especifican los criterios a evaluar y, por último, se proponen alternativas para considerar.

En la segunda etapa, a partir de los resultados de las encuestas y las entrevistas con expertos, se derivan las ponderaciones de los criterios que se están evaluando. Esto se logra al comparar la importancia de un criterio con respecto a otro utilizando la escala de Saaty. Esta escala constituye un instrumento esencial en la determinación de la importancia o prioridad de los criterios y/u opciones en una matriz de evaluación mediante comparaciones directas. Esta metodología asegura una coherencia y un alto grado de confianza en las comparaciones realizadas. Es importante destacar que en este proceso solo se utilizan números impares, donde el valor mínimo es 1 y el máximo es 9.

En relación con el paso anterior, se procede a calcular la razón de inconsistencia (IR), cuyo valor debe ser inferior a 0,1 para garantizar la rigurosidad de las evaluaciones, lo que permite evaluar el grado de coherencia en las valoraciones realizadas por los expertos. Posteriormente, se realiza una nueva aplicación del método considerando las alternativas propuestas. Para finalizar el análisis, se procede a la transferencia de todos los hallazgos hacia una matriz de decisión, en la cual se someten nuevamente a una evaluación ponderada de los valores obtenidos y se disponen en orden de acuerdo con un índice absoluto. Como resultado final, se pueden analizar las evaluaciones de los diferentes criterios y determinar cuál de las alternativas se presenta como la más adecuada. (Tcol Caballería Carlos Ruiz López, 2017) (Benito, M. L., 2021)

4.4. APLICACIÓN DEL METODO AHP AL ESTUDIO

A continuación, se describe la aplicación práctica del método AHP en la elección de la mejor opción mediante el uso del software "Herramienta de Ayuda a la Decisión" del ET, adquirido a través del Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza. En el inicio del proceso, se llevó a cabo una encuesta a los suboficiales especialistas en transmisiones del Regimiento Castilla 16, así como al equipo JTAC de la Brigada Extremadura XI. Esto tenía como objetivo determinar las ponderaciones de los criterios de estudio. La ilustración 12 muestra el esquema de la jerarquización analítica en el centro del estudio.

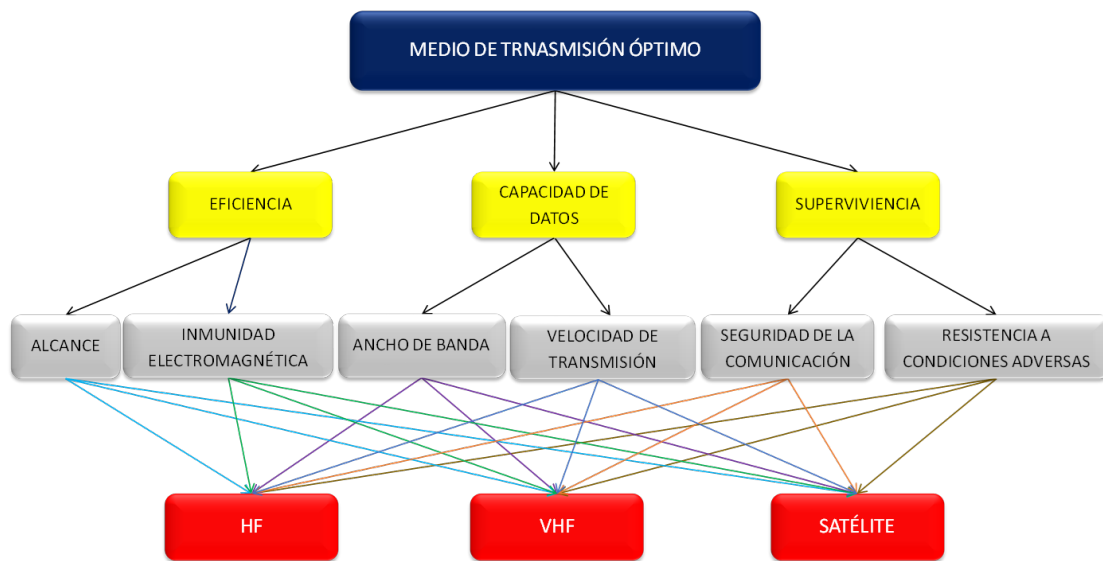


Ilustración 12. Esquema de los Criterios, subcriterios y alternativas para la elección del medio óptimo de transmisión. Fuente: Elaboración propia

4.4.1 PRIMERA ETAPA: FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La selección del problema mencionado implica en primer lugar la elección de las opciones disponibles. Después de consultar con los especialistas en transmisiones y el equipo JTAC, se han identificado las alternativas que se describen a continuación.

En el presente caso se presentan como posibles 3 alternativas:

1. Usar la estación Harris 5800H (HF)
2. Usar la radio PR4G V3 (VHF)
3. Usar comunicación satelital

Cada una de las opciones tiene sus pros y contras, lo que complica la toma de decisión. Por este motivo, se ha optado por llevar a cabo un análisis multicriterio AHP. En una evaluación preliminar, los expertos han identificado las ventajas y desventajas más significativas de estas alternativas de la siguiente manera:

- La radiotransmisión HF ofrece ventajas notables, como su impresionante alcance a largas distancias, resistencia a la interferencia electromagnética, eficiencia energética y utilidad táctica en cualquier terreno. Sin embargo, presenta desventajas, incluyendo un ancho de banda limitado que reduce la capacidad de transmisión de datos, calidad de voz limitada, la necesidad de antenas relativamente grandes.
- La radiotransmisión VHF presenta en ventajas, una calidad de voz superior, capacidad para transmitir datos a velocidades más altas, menor atenuación en línea de visión directa y la capacidad de operar en bandas VHF bajas y altas para adaptarse a diversos escenarios. Sin embargo, tiene desventajas, como un alcance limitado en comparación



con la radiotransmisión HF, una mayor susceptibilidad a la interferencia electromagnética y obstáculos naturales, y la necesidad de una línea de visión clara entre las estaciones de transmisión y recepción.

- La comunicación satelital ofrece ventajas como la capacidad de proporcionar cobertura global, superar obstáculos terrestres y ofrecer una comunicación constante y confiable en áreas remotas. Además, puede admitir una gran cantidad de tráfico de datos y es resistente a las interferencias electromagnéticas. Sin embargo, tiene desventajas, como costes iniciales elevados de lanzamiento y mantenimiento de satélites, retraso de señal debido a la distancia, lo que puede afectar las comunicaciones en tiempo real, y vulnerabilidad a condiciones atmosféricas extremas.

En todas las situaciones, las tres alternativas se concretarían mediante una solución desarrollada por la industria local con el propósito de cumplir con los objetivos de la política de defensa industrial y preservar capacidades industriales estratégicas. (Casado, A. G., 2019)

4.4.1.1 CRITERIOS Y SUBCRITERIOS

Los criterios y subcriterios fueron determinados con la contribución del grupo de expertos que se menciona anteriormente. A partir de las entrevistas llevadas a cabo, se identificaron los aspectos más relevantes que debían ser tomados en consideración. Los criterios elegidos para este análisis multicriterio son los siguientes:

CRITERIO 1: EFICIENCIA EN LA COMUNICACIÓN

El criterio de eficiencia es la capacidad de un sistema de comunicación para transmitir y recibir información de manera efectiva, aprovechando al máximo los recursos disponibles.

Los subcriterios fueron seleccionados por el conjunto de especialistas, permitiendo así identificar cuáles de ellos tenían un mayor nivel de relevancia. Luego, estos subcriterios fueron sometidos a una evaluación por parte del mismo grupo de expertos con el propósito de asignarles pesos específicos, lo cual corresponde a la segunda etapa del proceso del método de evaluación.

Se han seleccionado los siguientes subcriterios:

- **Alcance:** Se refiere a la distancia máxima a la que una señal de radio puede ser transmitida y recibida con calidad aceptable. Cuanto mayor sea el alcance, más lejos puede llegar la señal antes de deteriorarse o perderse. El alcance es una medida importante en aplicaciones de radiocomunicación, ya que determina la cobertura y la capacidad de comunicación a larga distancia.
- **Inmunidad electromagnética:** se refiere a la capacidad de un sistema de radiotransmisión para resistir interferencias electromagnéticas o perturbaciones en el entorno. Esto implica que el sistema puede seguir funcionando de manera confiable a pesar de la presencia de interferencias electromagnéticas, como señales no deseadas, ruido eléctrico o perturbaciones electromagnéticas causadas por fuentes externas.



CRITERIO 2: CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN DE DATOS

La capacidad de transmisión de datos se refiere a la cantidad de información digital que una conexión de radio puede transportar o transmitir en un período de tiempo específico.

Es un factor crítico en las comunicaciones militares y en otros campos, ya que determina la eficiencia con la que se pueden enviar y recibir datos. Afecta directamente a la velocidad a la que se pueden transferir archivos, transmitir video, voz u otros tipos de información digital.

Se van a someter a evaluación los siguientes subcriterios:

- **Ancho de banda:** Se refiere a la gama de frecuencias del espectro electromagnético que se utiliza para transmitir una señal de radio. El ancho de banda determina cuánta información se puede transportar a través de una señal. En radiotransmisiones, se mide en hertz (Hz) y puede ser estrecho o ancho. Un ancho de banda estrecho permite transmitir información a velocidades más bajas, mientras que un ancho de banda ancho permite transmitir datos a velocidades más altas. El ancho de banda es esencial para la transmisión de voz, datos y otros tipos de información a través de ondas de radio.
- **Velocidad de transmisión:** Es la cantidad de datos que se pueden transmitir por unidad de tiempo a través de una conexión de radio. Se mide en bits por segundo (bps) u otras unidades similares. La velocidad de transmisión determina cuán rápido se pueden enviar y recibir datos a través de una conexión de radio. En radiocomunicaciones militares, la velocidad de transmisión es un factor crítico, ya que puede afectar la eficiencia de la transmisión de datos y la calidad de la comunicación.

CRITERIO 3: SUPERVIVENCIA DE LA COMUNICACIÓN

Cuando hablamos de la supervivencia de la comunicación nos referimos a la capacidad de mantener una comunicación efectiva y segura en condiciones adversas o en situaciones donde la interferencia, el bloqueo o la degradación de la señal puedan ser un problema. Para obtener una comprensión más detallada, se desglosa en múltiples subcriterios que fueron establecidos tras alcanzar un acuerdo con el grupo de expertos.

- **Seguridad de la comunicación:** en radiocomunicaciones, se refiere a las medidas y protocolos implementados para proteger la información transmitida de accesos no autorizados o interceptación. Esto implica utilizar sistemas de cifrado y autenticación para garantizar que solo los destinatarios previstos tengan acceso a la información y que no pueda ser comprometida por terceros.
- **Resistencia a las condiciones adversas:** la capacidad de un sistema de comunicación para funcionar de manera confiable y eficaz en situaciones difíciles o entornos hostiles, como condiciones climáticas extremas, interferencia electromagnética, terreno complicado o incluso en presencia de amenazas o ataques. La resistencia a condiciones adversas implica diseñar sistemas que puedan mantener la conectividad y la transmisión de datos incluso en circunstancias desafiantes o en presencia de obstáculos y perturbaciones.



4.4.2 SEGUNDA ETAPA: EVALUACIÓN DE LOS CRITERIOS

CRITERIOS

Una vez establecidos los criterios y los subcriterios, se procede a la valoración de estos. Este proceso implica la creación de una matriz mediante la comparación de los diversos criterios en pares, con el fin de evaluar su relevancia relativa. Cada comparación recibe una calificación siguiendo la escala de Saaty (Tcol Caballería Carlos Ruiz López, 2017).

En esta escala se valoran los criterios A y B. Para ello, se comparan según el valor que se considere teniendo en cuenta su definición y el comentario que aparece en la Tabla 2:

Comentario	Definición	Valor A/B	Valor B/A
Ambos criterios tienen la MISMA importancia/preferencia	Igual importancia/preferencia	1	1
A es LIGERAMENTE MÁS importante/preferible que B	Importancia/preferencia moderada	3	1/3
A es MÁS importante/preferible que B	Importancia/preferencia grande	5	1/5
A es MUCHO MÁS importante/preferible que B	Importancia/preferencia muy grande	7	1/7
A es EXTREMADAMENTE MÁS importante/preferible que B	Importancia/preferencia extrema	9	1/9

Tabla 2 Escala de Saaty. Fuente: Manual de Usuario del Programa Ayuda a la Decisión AHP

Para evaluar la importancia de los criterios y subcriterios, se llevó a cabo una encuesta que involucró a un grupo de cuatro especialistas en transmisiones con más de ocho años de experiencia en el campo de las radiotransmisiones en el ámbito militar y cuatro componentes de un equipo de JTAC con más de cuatro años de experiencia y que han participado en numerosas misiones en el exterior. Estos individuos fueron seleccionados debido a su conocimiento general de los equipos de radios sometidos a estudio y conocimiento acerca del empleo táctico de estos. El formato de los cuestionarios se detalla en el ANEXO A y se presentó en una hoja de Excel para facilitar la extracción precisa de los valores que se utilizarían en la matriz, con el propósito de minimizar posibles errores en el método. Como ejemplo, se puede observar la Tabla 3:



Alejandro Moreno del Castillo

	A extremadamente más importante	A mucho más importante	A más importante	A ligeramente más importante	Ambos misma importancia	B ligeramente más importante	B más importante	B mucho más importante	B extremadamente más importante
CRITERIOS PRINCIPALES									
A	Colocar una X por fila, más cerca del criterio más importante								B
Supervivencia			X						Eficiencia

Tabla 3 Valores a incluir en la matriz en función de lo marcado en la encuesta

En la ilustración previa, se muestra una marca "X" que indica que se considera que A tiene una mayor importancia que B. Esto se logró de manera implícita y sin que el encuestado lo percibiera, asignando un valor de 5 en la matriz correspondiente a la comparación entre estos dos criterios.

Los resultados de la encuesta de valoración de los criterios principales realizada entre los especialistas en las diferentes áreas presentan en la Tabla 4:

	A extremadamente más importante	A mucho más importante	A más importante	A ligeramente más importante	Ambos misma importancia	B ligeramente más importante	B más importante	B mucho más importante	B extremadamente más importante
	9	7	5	3	1	1/3	1/5	1/7	1/9
A	CRITERIOS PRINCIPALES								B
Eficiencia		3	3	2					Capacidad de datos
Capacidad de datos						2	4	2	Supervivencia
Supervivencia			1	4	2	1			Eficiencia

Tabla 4. Frecuencias obtenidas a partir de las encuestas al personal especialista acerca de los criterios principales

El número refleja cuántas veces los encuestados seleccionaron cada opción. En la imagen, las opciones con un fondo naranja indican la opción promedio, calculada mediante métodos matemáticos a partir de las opiniones de los encuestados. Esta opción promedio se utilizó para determinar los pesos de los criterios.

Para calcular los pesos de los criterios, se usó el software AyudaDecision_AHP_net_4.0, proporcionado por el profesor de Logística del Centro Universitario de la Defensa.

El resultado de la aplicación utilizada para evaluar los criterios se muestra en la Ilustración 13:



Alejandro Moreno del Castillo

Método AHP - Evaluación de Criterios (Etapa 2)

CRITERIOS	Eficiencia	Capacidad de datos	Supervivencia
Eficiencia	1	3	1/3
Capacidad de datos	1/3	1	1/5
Supervivencia	3	5	1

0,26
0,11
0,63

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. : 0,0334

Ilustración 13. Matriz de pesos resultantes de la ponderación de criterios principales

SUBCRITERIOS

Para la valoración de los subcriterios, se aplicó el mismo procedimiento que se utilizó para evaluar los criterios. Los resultados obtenidos a través de las encuestas realizadas a los jefes de programa se presentan en la Tabla 5:

	A extremadamente más importante	A mucho más importante	A más importante	A ligeramente más importante	Ambos misma importancia	B ligeramente más importante	B más importante	B mucho más importante	B extremadamente más importante	
	9	7	5	3	1	1/3	1/5	1/7	1/9	
SUBCRITERIOS: EFICIENCIA										
A	Número de votos									B
Alcance	1	1	3	2	1					Inmunidad electromagnética
SUBCRITERIOS: CAPACIDAD DE DATOS										
A	Número de votos									B
Ancho de banda			1	3	2	2				Velocidad de transmisión
SUBCRITERIOS: SUPERVIVENCIA										
A	Número de votos									B
Seguridad de la comunicación		2	3	1	2					Resistencia a condiciones adversas

Tabla 5. Resultado de encuestas sobre la importancia de los subcriterios

En la Tabla 5, se muestran las frecuencias de las respuestas obtenidas al comparar la importancia de los subcriterios de dos en dos. El rango de respuestas abarca desde la posición izquierda, donde "A es extremadamente más importante que B", hasta la posición derecha, donde "B es extremadamente más importante que A". Esto incluye todas las situaciones intermedias, incluso la igualdad entre A y B en el punto medio. La representación del valor medio calculado se destaca con un fondo naranja.

Los pesos de los subcriterios se calcularon usando el software de ayuda a la decisión y se muestran en la Ilustración 14.



Alejandro Moreno del Castillo

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

Eficiencia	Alcance	Inmunidad electro.	PESOS(W)	Capacidad de datos	Ancho de banda	Velo. transmisión	PESOS(W)
Alcance	1	5	0.83	Ancho de banda	1	3	0.75
Inmunidad electro.	1/5	1	0.17	Velo. transmisión	1/3	1	0.25

R.I. : 0.0000

Supervivencia	Segur. Comunicación	Resist. Cond. Advers	PESOS(W)
Segur. Comunicación	1	5	0.83
Resist. Cond. Advers	1/5	1	0.17

R.I. : 0.0000

Ilustración 14. Resultados del programa para la asignación de pesos a los subcriterios.

4.4.3 TERCERA ETAPA: EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

Para llevar a cabo la evaluación de las opciones, se ha consultado al mismo grupo de expertos, un total de 8 personas fueron elegidas para evaluar las opciones en función de cada criterio y sus subcriterios.

Se consultó a los dos jefes del grupo de expertos, tanto el del grupo de expertos especialistas en transmisiones, como al jefe del equipo JTAC, ambos con amplia experiencia en su área operativa.

Para el análisis de las opciones, se siguió un proceso similar al utilizado para los criterios. Se enviaron hojas de cálculo Excel preparadas para recopilar los resultados y se aplicó el método de Saaty mencionado anteriormente. Las encuestas enviadas a los participantes se mantuvieron simples; solo tenían que seleccionar, para cada subcriterio, cuál de las opciones consideraban la mejor, marcando con una "X" en la casilla correspondiente. Esto se hizo para evitar complicaciones en la construcción de matrices, lo que podría representar una dificultad o una pérdida de tiempo para personas no familiarizadas u ocupadas, lo que podría desalentar su participación.

El formato reducido que se siguió se representa en la Tabla 6:

Compare las mejores alternativas para realizar un enlace con la Aviación del Ejército									
A	Extremadamente más importante	A mucho más importante	A más importante	A ligeramente más importante	Ambos misma importancia	B ligeramente más importante	B más importante	B mucho más importante	B Extremadamente más importante
¿Qué alternativa tendría más importancia en lo relativo a Eficiencia?									
A	Colocar una X por fila, más cerca del criterio más importante								B
HF			X						VHF

Tabla 6. Modelo simplificado de una de las encuestas realizadas

El encuestado debía seleccionar entre cuatro posiciones que favorecían la opción A, una opción de igualdad y otras cuatro posiciones que favorecían la opción B. La proximidad a los extremos indicaba una preferencia más fuerte por una opción sobre la otra. Cada posición representaba un valor implícito que se trasladaba a una matriz.



Sin embargo, dado que se obtuvieron resultados variados al preguntar a 8 expertos por criterio, se calculó un valor conjunto tomando la media aritmética de las muestras y aproximándolo a la casilla más cercana. Cada casilla se valoró del 1 al 9, y se obtuvo el valor promedio considerando las frecuencias repetidas. Los valores resultantes para cada subcriterio se destacaron con un círculo y un fondo naranja.

Según la posición en la tabla, donde un voto a la izquierda significa que A es significativamente mejor que B, en el centro ambos son iguales y a la derecha B es significativamente mejor que A, el resultado ha sido el que se muestra en las Tablas 7, 8 y 9:

Criterio: EFICIENCIA

¿Qué alternativa es mejor en lo relativo a ALCANCE?										
A									B	
HF	7	1							VHF	
VHF							2	5	SATELITE	
SATÉLITE						1	2	4	1	HF
¿Qué alternativa es mejor en lo relativo a INMUNIDAD ELECTROMAGNÉTICA?										
A									B	
HF	3	3	2						VHF	
VHF	1	1	3	1	1	1			SATELITE	
SATÉLITE					1	2	3	1	1	HF

Tabla 7. Resultados de encuestas: frecuencias y valores medios obtenidos para el criterio Eficiencia

Criterio: CAPACIDAD DE DATOS

¿Qué alternativa es mejor en lo relativo al ANCHO DE BANDA?									
A									B
HF				1	3	2	1	1	VHF
VHF						4	3	1	SATELITE
SATÉLITE	1	2	5						HF
¿Qué alternativa es mejor en lo relativo a VELOCIDAD DE TRANSMISIONES?									
A									B
HF					2	2	3	1	VHF
VHF				1	1	3	2		SATELITE
SATÉLITE	1	1	2	1	3				HF

Tabla 8 Resultados de encuestas: frecuencias y valores medios obtenidos para el criterio Capacidad de datos

**Criterio: SUPERVIVENCIA**

¿Qué alternativa es mejor en lo relativo a la SEGURIDAD DE LA COMUNICACIÓN?										
A										B
HF	1	3	3	1						VHF
VHF		2	3	3						SATELITE
SATÉLITE						3	4	1		HF
¿Qué alternativa es mejor en lo relativo a la RESISTENCIA A LAS CONDICIONES ADVERSAS?										
A										B
HF		3	5							VHF
VHF		1	1	3	1	2				SATELITE
SATÉLITE						1	2	3	1	HF

Tabla 9. Resultados de encuestas: frecuencias y valores medios obtenidos para el criterio Supervivencia

Después de obtener los promedios de los resultados de las encuestas, se ingresaron en el software mencionado anteriormente en formato de matriz. A partir de esto, se realizaron cálculos para determinar la importancia de cada opción en relación con los subcriterios. Además, se llevaron a cabo evaluaciones de la coherencia de los datos para identificar posibles inconsistencias en el proceso de toma de decisiones. El resultado obtenido por el software de ayuda a la decisión por el método AHP se resume en la Ilustración 15. La razón de inconsistencia (RI) es un parámetro utilizado para evaluar la consistencia de las comparaciones realizadas por el analista al construir matrices de comparación. Un valor alto de RI sugiere que la matriz de comparación es consistente, lo que significa que las prioridades asignadas a los elementos se han evaluado de manera congruente. Por otro lado, un valor bajo de RI podría indicar la necesidad de revisar las comparaciones dentro de la matriz para mejorar la coherencia de las decisiones.

Método AHP - Evaluación de Alternativas (Etapa 3)

Alcance	HF	VHF	Satélite
HF	1	9	7
VHF	Celda NO editable	1	1/7
Satélite	1/7	7	1

R.I. : 0.3022

PESOS(W)
0.73
0.05
0.22

Inmunidad electro.	HF	VHF	Satélite
HF	1	7	5
VHF	1/7	1	5
Satélite	1/5	1/5	1

R.I. : 0.4043

PESOS(W)
0.68
0.23
0.09

Ancho de banda	HF	VHF	Satélite
HF	1	1	1/5
VHF	1	1	1/3
Satélite	5	3	1

R.I. : 0.0252

PESOS(W)
0.16
0.19
0.66

Velo. transmisión	HF	VHF	Satélite
HF	1	1/5	1/3
VHF	5	1	1/3
Satélite	3	3	1

R.I. : 0.2601

PESOS(W)
0.12
0.33
0.55

Segur.	HF	VHF	Satélite
HF	1	7	5
VHF	1/7	1	5
Satélite	1/5	1/5	1

R.I. : 0.4043

PESOS(W)
0.68
0.23
0.09

Resist. Cond. Advers	HF	VHF	Satélite
HF	1	5	7
VHF	1/5	1	3
Satélite	1/3	1/3	1

R.I. : 0.0567

PESOS(W)
0.72
0.19
0.08



4.4.4 CUARTA ETAPA: JERARQUIZACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

Para finalizar, se obtiene la matriz de decisión, que se presenta en la Ilustración 16.

Método AHP - Jerarquización de Alternativas (Etapa 4)

MATRIZ DE DECISIÓN

CRITERIOS / SUBCRITERIOS	PESOS	HF	VHF	Satélite
Eficiencia	0,26	0,72	0,08	0,19
+ Alcance	0,83	0,73	0,05	0,22
+ Inmunidad electro.	0,17	0,68	0,23	0,09
Capacidad de datos	0,11	0,15	0,22	0,63
+ Ancho de banda	0,75	0,16	0,19	0,66
+ Velo. transmisión	0,25	0,12	0,33	0,55
Supervivencia	0,63	0,69	0,22	0,09
+ Segur. Comunicación	0,83	0,68	0,23	0,09
+ Resist. Cond. Advers	0,17	0,72	0,19	0,08
		0,64	0,19	0,17

Ilustración 16. Matriz final en forma de tabla con los resultados del método AHP Fuente (Elaboración propia)

Con base en los resultados obtenidos a través del método AHP, se ha realizado una cuidadosa evaluación de las alternativas en relación con los criterios predefinidos. Tras asignar ponderaciones y realizar comparaciones, se ha determinado que la radiotransmisión por el método HF sobresale como la elección más favorable (puntuación 0.64 frente a 0.19 para VHF y 0.17 para la opción Satélite). Esto se debe a su alta prioridad en múltiples criterios clave, como alcance y supervivencia, lo que la convierte en la opción más sólida según el análisis AHP.

La radiotransmisión en VHF y la Satelital que, aunque no superaron a la radiotransmisión HF, poseen méritos y superan a la alternativa ganadora en ciertos aspectos, como el ancho de banda o la velocidad de transmisión. Sin embargo, es importante destacar que la opción HF se posiciona como la elección preferida en función de las prioridades establecidas durante el proceso AHP. Estas conclusiones respaldan la toma de decisiones informadas y estratégicas para abordar el problema o la decisión en cuestión.

4.5 ANALISIS DAFO DE LAS ALTERNATIVAS PROPUESTAS

Tras excluir la opción del satélite mediante el método previo, en este apartado se lleva a cabo un análisis de las Fortalezas, Debilidades, Oportunidades y Amenazas (DAFO) de las alternativas previamente seleccionadas. Estas alternativas en cuestión comprenden la banda VHF, que se utiliza en conjunción con la radio PR4G V3, en servicio en el Ejército y la banda HF, que emplea la radio HARRIS RF 5800H. La información relativa a los análisis DAFO se ha estructurado a partir de entrevistas llevadas a cabo en el Regimiento Acorazado "Castilla" n°16, en colaboración con los grupos de especialistas encargados de estos dos tipos de sistemas.

Los análisis DAFO correspondientes se presentan en las tablas 10 y 11, respectivamente.



4.5.1 Análisis DAFO Radiotransmisión HF

RADIOTRANSMISIÓN HF			
Debilidades		Amenazas	
<ul style="list-style-type: none"> • ANCHO DE BANDA LIMITADO • SUSCEPTIBILIDAD A CONDICIONES ATMOSFÉRICAS • ALTO COSTE DE EQUIPOS 		<ul style="list-style-type: none"> • POCA DISPONIBILIDAD DE RADIOS HF • NO SE GARANTIZA LA CONEXIÓN EN TODO MOMENTO 	
Fortalezas		Oportunidades	
<ul style="list-style-type: none"> • ALCANCE ILIMITADO • FACIL CONEXIÓN EN TERRENO ACCIDENTADO Y URBANO • GRAN VERSATILIDAD DE LOS EQUIPOS 		<ul style="list-style-type: none"> • EN DOTACIÓN EN EL ET • COLABORACIÓN INTERNACIONAL 	

Tabla 10. Análisis DAFO HF

DEBILIDADES

Es crucial resaltar en primer lugar la restricción significativa en términos de ancho de banda que esta frecuencia presenta, lo que conlleva una ralentización en la velocidad de transmisión de datos.

Además, es importante notar que la propagación de las ondas HF está fuertemente influenciada por las condiciones climáticas, lo que significa que la fiabilidad y el alcance de la comunicación variarán según la región en la que se opere.

También, es esencial considerar el alto coste asociado a esta tecnología, lo que explica la presencia limitada de estas unidades de radio en el Ejército.

AMENAZAS

Como una amenaza significativa, se destaca la escasa disponibilidad de radios Harris en las unidades, lo que dificulta la posibilidad de que todos los Puestos de Mando cuenten con este tipo de radio para establecer enlaces.

Además, en relación con lo anteriormente mencionado acerca de las condiciones climáticas, y dependiendo de estas, pueden surgir puntos ciegos en los cuales no se reciba ni voz ni datos. También es importante considerar que la hora en que se establece la señal puede influir en la fiabilidad del enlace, lo que significa que no se puede garantizar una conexión total y fiable en todo momento.



FORTALEZAS

En primer lugar, con esta frecuencia, es posible lograr una cobertura teóricamente ilimitada, ya que las ondas se reflejan en la ionosfera, lo que da lugar a este fenómeno.

Además, en relación con la forma de propagación mencionada anteriormente, esta frecuencia facilita la conexión en áreas con terreno accidentado, lo que la convierte en la elección principal para los JTAC.

Para concluir, es importante resaltar la notable flexibilidad de esta frecuencia, que se utiliza en la radio portátil Harris 5800H, la cual es de fácil transporte y permite mantener la conexión tanto en situaciones en las que no se requiere movimiento como en aquellas en las que la persona se desplaza, teniendo, además, la capacidad de integrarla en un vehículo de manera sencilla.

OPORTUNIDADES

Un aspecto destacado en la utilización de esta banda de frecuencias y la radio Harris es la familiaridad que tienen los operadores con ellas. Además, dado que estas radios están disponibles en las unidades del ET, particularmente en los equipos JTAC y en los Puestos de Mando de Batallón (PCBON), su uso no implica gastos adicionales para adquirir el equipo ni para capacitar a los operadores.

CONCLUSIONES

Una de las notables ventajas de utilizar esta banda radica en que las radios HARRIS son compatibles, y el Ejército de Tierra dispone de estas unidades sin costes adicionales. Además, cabe resaltar la amplia movilidad y alcance teóricamente ilimitado de esta banda. También cabe destacar que la gran mayoría de helicópteros y aviones militares cuentan con este medio de radiotransmisión para establecer contacto con tierra. Sin embargo, su principal desafío se encuentra en su limitada capacidad de transmitir datos y la escasa disponibilidad de unidades de radio HARRIS para las unidades en el Ejército de Tierra.



4.5.2 Análisis DAFO Radiotransmisión VHF

RADIOTRANSMISIÓN VHF			
Debilidades		Amenazas	
<ul style="list-style-type: none"> • ALCANCE LIMITADO • LIMITACION EN ENTORNOS URBANOS • ESCASA CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN DE DATOS 		<ul style="list-style-type: none"> • POSIBILIDAD DE OBSOLESCENCIA EN UN FUTURO CERCANO 	
Fortalezas		Oportunidades	
<ul style="list-style-type: none"> • AUTONOMIA DE ENLACE • GRAN VARIEDAD DE EQUIPOS ESTANDAR • MODOS DE SALTO DE FRECUENCIA 		<ul style="list-style-type: none"> • EN DOTACION EN EL ET • AMPLIO CONOCIMIENTO DE LOS OPERADORES 	

Tabla 11. Análisis DAFO VHF

DEBILIDADES

Las radios que operan en la banda de frecuencia VHF tienen una limitación en su alcance, que en teoría y después de múltiples pruebas de conexión en terreno, solo logran enlazar distancias de hasta 10 kilómetros como máximo, siempre y cuando el terreno no presente una orografía extremadamente accidentada.

Además de la limitación en el alcance, otro desafío significativo está relacionado con el ancho de banda disponible en esta frecuencia, el cual resulta insuficiente para la transmisión de datos a través de este sistema. Esta situación plantea un dilema para los operadores, ya que el software cuenta con la capacidad necesaria, pero el hardware no puede soportarlo por completo.

AMENAZAS

El avance tecnológico se produce a un ritmo sorprendentemente rápido. A pesar de que los programas informáticos se actualizan con frecuencia en períodos relativamente cortos, los métodos de transmisión de datos siguen siendo los mismos. Esto plantea la posibilidad de que estos métodos queden obsoletos en un futuro cercano.



FORTALEZAS

La señal VHF se transmite en el Ejército de Tierra a través de la radio PR4G V3, que ofrece una amplia autonomía al enlace, garantizando la comunicación en situaciones estáticas y en movimiento. Esta señal posee una alta resistencia.

Una de las principales ventajas de esta señal es su modo de operación llamado "Salto de Frecuencia", en el que las frecuencias cambian de manera aleatoria muchas veces en un breve lapso cuando la radio principal de la red lo indica.

Es de importancia señalar que la radio que emplea esta frecuencia ha sido empleada en el Ejército de Tierra desde su concepción inicial, lo que conlleva a un conocimiento profundo de su funcionamiento por parte de los operadores. Este conocimiento resulta fundamental para abordar desafíos, como establecer una sincronización entre la radio principal y las radios subordinadas.

OPORTUNIDADES

Como se mencionó anteriormente, la radio PR4G ha sido parte del equipamiento del Ejército durante varias décadas. Esto conlleva la ventaja de que, al estar ya en servicio en el Ejército, no se requiere realizar gastos significativos para implementarla en las unidades.

CONCLUSIONES

El empleo de esta banda resulta altamente beneficioso debido a su excepcional movilidad y capacidad de supervivencia. Es relevante destacar que esta banda se encuentra ya en uso en el Ejército, lo que significa que su utilización no implica costes adicionales.

Sin embargo, es fundamental mencionar la principal restricción de esta banda, que es su estrecho ancho de banda y su alcance máximo limitado. En condiciones ideales, la distancia máxima que se puede alcanzar apenas supera los 10 kilómetros, característica muy limitante para establecer comunicación entre tierra y aire para solicitar cualquier apoyo.



5. CONCLUSIONES

Tras analizar la situación actual de las comunicaciones del Carro de Combate Leopard 2E se han identificado las limitaciones en las comunicaciones y la dificultad para conectar con los diversos puestos tácticos necesarios para enlazar con la Aviación de Ejército.

A pesar de las destacadas capacidades tácticas y de movilidad del carro de combate Leopard 2E, se ha evaluado la viabilidad de incorporar una radio Harris 5800H para lograr la transmisión de datos y fonía para un posible enlace con los medios aéreos del Ejército de tierra. Además de las características detalladas en el estudio AHP, es importante tener en cuenta numerosos factores externos que influyen en esta decisión.

No obstante, después de llevar a cabo entrevistas con especialistas en sistemas de comunicaciones y apoyo aéreo cercano, se ha confirmado que es factible incorporar la radio Harris 5800H en el carro de combate Leopard 2E, sin embargo, aún existen áreas que requieren mejoras para permitir una integración óptima y aprovechar al máximo su capacidad. Entre los desafíos a abordar se incluye la gestión de las redes de comunicación, ya que el jefe del carro de combate se enfrenta a la complejidad de operar múltiples redes con los recursos disponibles. También es esencial resolver los problemas de la limitación de ancho de banda en las bandas utilizadas en la actualidad. Por esta razón, la investigación se enfocó en analizar los sistemas de comunicación disponibles para el carro de combate Leopard 2E.

Uno de los aspectos fundamentales que no se abordaron en el análisis mediante el método AHP, pero que merece atención, es el coste de adquirir los recursos. Este tema, no obstante, fue examinado en el estudio DAFO. En el caso de los satélites, se excluyeron de todas las consideraciones debido a su alto coste y falta de movilidad, por este motivo, aun solucionando el problema de las limitaciones del ancho de banda, fue descartado.

Por lo tanto, al combinar los resultados del método de toma de decisiones multicriterio AHP, se llega a la conclusión de que la elección de los medios de comunicación a utilizar con el carro de combate Leopard 2E depende del puesto táctico que se busca conectar. En particular, se recomienda mantener el uso de una radio PR4G V3 y PR4G V2 con señal VHF para establecer y mantener comunicaciones con el escalón superior e inferior, y para dar soporte al sistema BMS-Lince.

En resumen, es fundamental resaltar que, en la evaluación general realizada mediante el método AHP, se determinó que el sistema de radiotransmisión por la banda HF es la opción más sobresaliente como medio de transmisión. Este resultado se basa en los criterios, subcriterios y ponderaciones derivados de encuestas a personal especializado en transmisiones y apoyo aéreo cercano. En consecuencia, se recomienda encarecidamente el empleo de la radio Harris 5800H en los carros de combate Leopard 2E en los que se busque preparar para tener la capacidad de solicitar apoyo aéreo cercano o radio enlace a largas distancias.

Por último, teniendo en cuenta el análisis realizado sobre los medios de radiotransmisión y su implementación en el carro de combate Leopard 2E, se vislumbra una posible vía de desarrollo y aplicación: Estudio para la instalación de la radio Harris 5800H en el carro de combate Leopard 2E



6. BIBLIOGRAFÍA

- Academia General Militar, 2019/2020. *Táctica y logística I*. Zaragoza: s.n.
- Artero, C. E. F. C., 2008. *Futuro de los carros de combate Leopard. Programa Leopard*. s.l.: Escuela Superior de las Fuerzas Armadas.
- Benito, M. L., 2021. *Análisis de alternativas para la sustitución del TOA/M113*, Zaragoza: s.n.
- Casado, A. G., 2019. *Estudio e implantación del vehículo PCBON MC-3 como PC UAF/FSE de Grupo de Combate en la Brigada Experimental 2035*, Zaragoza: s.n.
- Commission, I. E., 2023. *International Electrotechnical Commission*. [En línea] Available at: <https://www.iec.ch/homepage> [Último acceso: 18 Septiembre 2023].
- Dpto. técnica militar de la Academia de Infantería, 2016. *Manual didáctico leopard 2E*. Toledo: s.n.
- Espinosa, O., 2023. *Redeszone*. [En línea] Available at: <https://www.redeszone.net/reportajes/tecnologias/que-es-espectro-radioelectrico/> [Último acceso: 19 Septiembre 2023].
- Fernández Mateos, F. P., 2010. *Medios acorazados españoles, presente y futuro*. s.l.:Equipo IDS.
- Fernández Mateos, F. P., 2012. *Blindados especiales: Opciones y capacidades en España*. s.l.:Equipo IDS.
- Frenzel, L. L., 2003. *Sistemas electrónicos de comunicaciones*. Tercera reimpresión edición ed. México, D. F: Alfaomega.
- Harris Corporation, 2000. *Comunicaciones de radio en la era digital volumen dos: tecnología VHF / UHF*. s.l.:s.n.
- Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2018. *MI-506 Radio HF HARRIS RF-5800-H*. s.l.:s.n.
- Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2021. *Manual de campo Leopard 2E*. s.l.:s.n.
- Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2022. *PD4-100 (vol. 4) Táctica. empleo de las PU de Infantería: Batallón de Infantería de carros de combate. Grupo táctico acorazado*. s.l.:s.n.
- Mando de Adiestramiento y Doctrina, 2022. *PD4-100 (vol. 4). Anexo A. Táctica. empleo de las PU de Infantería: Compañía de Infantería de carros de combate. Subgrupo táctico acorazado*. s.l.:s.n.
- Mando de Adiestramiento y Doctrina, s.f. *MT6-050 Carro de combate leopard 2E. Manual de mantenimiento de segundo escalón (casco)*. s.l.:s.n.
- Sáez, S. V., 29 de julio de 2017. *Las armas de la Primera Guerra Mundial*. s.l.: La Vanguardia.
- Sobrido, J. M. G., 2017. *Capacidades y limitaciones del sistema BMS*, Zaragoza: s.n.
- Tcol Caballería Carlos Ruiz López, 2017. *Manual de Usuario del Programa Ayuda a la Decisión AHP*. CUD ed. Zaragoza: s.n.
- Wikipedia, 2023. *Leopardo 2E*, s.l.: s.n.



7. ANEXO A: Modelo de cuestionario AHP



Usted ha sido seleccionado para realizar este cuestionario por sus conocimientos acerca del tema a tratar. Con este cuestionario se pretende someter a análisis a varios sistemas de radiotransmisión para una posterior elección.

1. Marque con una **X** más cerca del criterio que tiene más relevancia en un sistema de radiotransmisión militar, siendo las casillas de los extremos las que tienen más peso y la casilla central igual peso.

A	CRITERIOS PRINCIPALES									B
Eficiencia										Capacidad de datos
Capacidad de datos										Supervivencia
Supervivencia										Eficiencia

2. Dados los siguientes subcriterios, marque con una **X** más cerca del subcriterio que considere más importante, siendo las casillas de los extremos las que tienen más peso y la casilla central igual peso.

SUBCRITERIOS: EFICIENCIA										
A	Número de votos									B
Alcance										Inmunidad electromagnética
SUBCRITERIOS: CAPACIDAD DE DATOS										
A	Número de votos									B
Ancho de banda										Velocidad de transmisión
SUBCRITERIOS: SUPERVIVENCIA										
A	Número de votos									B
Seguridad de la comunicación										Resistencia a condiciones adversas



Alejandro Moreno del Castillo

3. Marque con una **X** procediendo de igual manera que en las preguntas anteriores. En este caso tiene que elegir una alternativa según los subcriterios evaluados anteriormente.

¿Qué alternativa es mejor en lo relativo a ALCANCE?									
A									B
HF									VHF
VHF									SATELITE
SATÉLITE									HF
¿Qué alternativa es mejor en lo relativo a INMUNIDAD ELECTROMAGNÉTICA?									
A									B
HF									VHF
VHF									SATELITE
SATÉLITE									HF

¿Qué alternativa es mejor en lo relativo al ANCHO DE BANDA?									
A									B
HF									VHF
VHF									SATELITE
SATÉLITE									HF
¿Qué alternativa es mejor en lo relativo a VELOCIDAD DE TRANSMISIONES?									
A									B
HF									VHF
VHF									SATELITE
SATÉLITE									HF

¿Qué alternativa es mejor en lo relativo a la SEGURIDAD DE LA COMUNICACIÓN?									
A									B
HF									VHF
VHF									SATELITE
SATÉLITE									HF
¿Qué alternativa es mejor en lo relativo a la RESISTENCIA A LAS CONDICIONES ADVERSAS?									
A									B
HF									VHF
VHF									SATELITE
SATÉLITE									HF

Gracias por su colaboración.

Alférez de Infantería D. Alejandro Moreno del Castillo