



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Desarrollo de un sistema para refrigerar la torre del  
CC Leopardo 2E.

CAC Ferrán Martín Brull

Director académico: D. Miguel Ángel García García

Director militar: Capitán D. Ignacio Navarro García-Gutierrez

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar

2022





## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, querría agradecer al Capitán D. Ignacio Navarro García-Gutiérrez perteneciente a la plana mayor de mando y al Capitán D. Carlos González Zamora jefe de la 1ª CIA "Águila" del BICC Mérida I/16, su especial dedicación en la elaboración del proyecto, ya que me han facilitado las herramientas necesarias e idóneas para su realización. Además, han contribuido positivamente en mi formación como futuro oficial del Ejército, mostrándome y enseñándome a resolver los quehaceres del día en la vida del teniente.

En segundo lugar, agradecer la atención y la permanente disponibilidad en cuanto a lo que en la elaboración del trabajo se refiere, al Dr. D. Miguel Ángel García García. Puesto que su papel como guía del proyecto ha sido fundamental para la realización del mismo.

En tercer lugar, agradecer al Brigada D. Estebán Canitrot especialista del escalón de mantenimiento del BICC Mérida I/16, la servidumbre permanentemente en la elaboración del proyecto. Su ayuda ha sido pieza fundamental en realización del trabajo, ya que, ha compartido sus conocimientos y experiencia personal para que lograse entender las diferentes vicisitudes del carro de combate Leopardo 2E.





## RESUMEN

La evolución del papel del Ejército español en las misiones actuales en África Central y Oriente Próximo requiere de unos sistemas de armas modernos y con capacidad de operar fiablemente bajo los efectos de climas áridos y semiáridos. Además, el arduo clima español también resulta ser un inconveniente para el empleo del carro de combate Leopard 2E, dejando un gran número de estos inoperativos. Bajo este contexto surge la motivación de implementar un sistema de refrigeración eficiente en el carro de combate español.

Por lo tanto, se ha llevado a cabo un estudio de los diferentes sistemas de refrigeración actuales, civiles y militares, que sería compatibles con el Leopard 2E. Para ello, se han llevado a cabo entrevistas con el personal cualificado y revisiones documentales de los manuales de usuario del carro de combate.

Posteriormente, se llevaron a cabo encuestas a los expertos en la materia, para poder obtener un conocimiento sólido y realizar el método de toma de decisiones AHP con garantías. Este es un análisis multicriterio donde se comparan los sistemas propuestos en base a criterios y subcriterios marcados previamente.

Como resultado de este proyecto se obtiene, que la implementación del Programa Integral de refrigeración sería la opción más favorable, y por ello se propone su adquisición e instalación. Debido a que, podría refrigerar adecuadamente los sistemas electrónicos, que constantemente quedan averiados tras sufrir el sobrecalentamiento provocado por las altas temperaturas.

## PALABRAS CLAVE

Carro de combate

Sistema de refrigeración

Eficiencia



## **ABSTRACT**

The evolving role of the Spanish Army in current missions in Central Africa and the Middle East requires modern weapon systems capable of operating reliably under the effects of arid and semi-arid climates. In addition, the arduous Spanish climate also proves to be a drawback for the employment of the battle tank, leaving a large number of these inoperative. In this context, the motivation to implement an efficient cooling system in the Spanish tank arose.

Therefore, a study of the different current civilian and military cooling systems that would be compatible with the Leopard 2E has been carried out. To this end, interviews with qualified personnel and documentary reviews of the tank's user manuals were carried out.

Subsequently, surveys were carried out with experts in the field in order to obtain solid knowledge and carry out the AHP decision-making method with guarantees. This is a multi-criteria analysis where the proposed systems are compared on the basis of previously marked criteria and sub-criteria.

As a result of this project, it is obtained that the implementation of the Integrated Cooling Programme would be the most favourable option, and therefore its acquisition and installation is proposed. Because it could adequately cool the electronic systems, which are constantly damaged after suffering overheating caused by high temperatures.

## **KEYWORDS**

Main battle tank

Refrigeration system

Efficiency



## INDICE DE CONTENIDO

### Contenido

<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>III</b>
<b>PALABRAS CLAVE .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IV</b>
KEYWORDS .....	IV
<b>INDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>INDICE DE TABLAS .....</b>	<b>IX</b>
<b>ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS.....</b>	<b>X</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....</b>	<b>2</b>
2.1    Objetivos y alcance .....	2
2.2    Metodología .....	3
<b>3 ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>5</b>
<b>4. DESARROLLO .....</b>	<b>7</b>
4.1    Análisis técnico de la torre del carro de combate leopardo 2e.....	7
4.1.1    Análisis del sistema eléctrico de la torre.....	7
4.1.2    Análisis del sistema de refrigeración actual del leopardo 2e.....	8
4.2    Desarrollo de los sistemas actuales de refrigeración.....	10
4.2.1    Sistema barracuda htr.....	10
4.2.2    Sistema de refrigeración líquida. ....	11
4.2.3    Programa integral de refrigeración y ventilación del carro de combate leopardo 2E. ....	13



4.2.4	Sistema MKK12.	16
4.2.5	Sistema de Gestión térmica (TMS).....	20
<b>5</b>	<b>SELECCIÓN.....</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS DE METODOLOGÍA AHP.....</b>	<b>23</b>
<b>6.1</b>	<b>Primera etapa: Formulación del sistema.....</b>	<b>23</b>
6.1.1	Alternativas.	23
6.1.2	Criterios y Subcriterios.....	23
<b>6.2</b>	<b>Segunda etapa: Evaluación de criterios.....</b>	<b>24</b>
6.2.1	Cálculo de los pesos de los criterios de valoración.....	25
6.2.2	Cálculo de los pesos de los subcriterios de valoración.....	26
<b>6.3</b>	<b>Tercera etapa: evaluación de las alternativas.....</b>	<b>28</b>
<b>6.4</b>	<b>Cuarta etapa: jerarquización de las alternativas.....</b>	<b>32</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>33</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>35</b>
<b>9</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>36</b>



## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Instalación de transistores y ultracaps en el sistema de seguimiento del arma. Fuente: Informe Conferencia Internacional Master Gunner. ....	6
Figura 2. Sistema de accionamiento eléctrico. Fuente: Manual didáctico Leopardo 2E A-213 ...	7
Figura 3. Sistema de ventilación de la EWNA. Fuente: Elaboración propia. ....	8
Figura 4. Compartimento de la electrónica Fuente: Manual didáctico Leopardo 2E A-213 .....	9
Figura 5. CC Leopardo 2E con el sistema barracuda. Fuente: Saab .....	10
Figura 6. Tarjetas electrónicas de le EWNA. Fuente: Elaboración propia .....	11
Figura 7. Bloque de agua para tarjeta gráfica. Fuente: Hardzone, .....	12
Figura 8. Distribución del flujo de aire con el sistema MKK12 en el Leopardo 2E. Fuente: MKK12 Demonstration Leopardo 2E .....	16
Figura 9. Vista trasera del Sistema MKK12. Fuente: MKK12 Demonstration Leopardo 2E .....	17
Figura 10. Vista frontal del Sistema MKK12. Fuente: MKK12 Demonstration Leopardo 2E .....	17
Figura 11. Sistema MKK12 instalado en el Leopardo 2E. Fuente: MKK12 Demonstration Leopardo 2E .....	19
Figura 12. Vista espacial de la AHU y VCSU. Fuente: Thermal magement system .....	21
Figura 13. Pesos resultantes de los criterios principales mediante el método AHP. Fuente: Elaboración propia .....	26
Figura 14. Pesos resultantes de los subcriterios mediante el método AHP. Fuente: Elaboración propia.....	26
Figura 15. Resultado de la Evaluación de las Alternativas. Pesos extraídos para cada alternativa aplicando cada subcriterio. Fuente: Elaboración propia .....	31
Figura 16. Matriz de decisión. Fuente: Elaboración propia.....	32
Figura 17. Partes de la Célula Peltier. Fuente: Efecto Peltier y desarrollo de posibles aplicaciones. ....	37
Figura 18. Comportamiento de la Célula Peltier. Fuente: Efecto Peltier y desarrollo de posibles aplicaciones.....	37
Figura 19. Consumo eléctrico del CC Leopardo 2E. Fuente: MBT Leopard 2E Energy - Calculation	



MBT Leopard 2E with MKK12 .....	38
Figura 20. Sistema NBQ M-60 instalado en el Leopardo 2E. Fuente: Instalación del Programa Integral de refrigeración .....	39
Figura 21. Conexión eléctrica tipo toma de mechero. Fuente: Instalación del Programa Integral de refrigeración.....	39
Figura 22. Ventilador de la EWNA. Fuente: Elaboración propia.....	40
Figura 23. Esquema del puenteo de la llave de descontaminación NBQ, con la servoválvula conectada al sistema contraincendios. Fuente: Instalación del Programa Integral de refrigeración .....	40
Figura 24. Latiguillos, codos en "T", llave y servoválvula para el puente de la llave de descontaminación NBQ del CC Leopardo 2E. Fuente: Instalación del Programa Integral de refrigeración.....	41
Figura 25. Compartimento del Sistema NBQ del CC Leopardo 2E, equipado o no con el refrigerador casero. ....	41



## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Costes del Programa Integral de refrigeración. Fuente: Elaboración propia .....	15
Tabla 2. Escala de Saaty. Apuntes de Métodos cuantitativos de ayuda a la decisión .....	24
Tabla 3. Frecuencias y valores medios resultantes de las encuestas realizadas por los expertos sobre los criterios principales. Fuente: Elaboración propia .....	25
Tabla 4 Frecuencias y valores medios resultantes de las encuestas realizadas por los expertos sobre los subcriterios. Fuente: Elaboración propia .....	27
Tabla 5. Frecuencias y valores medios resultantes para el criterio Eficiencia. Fuente: Elaboración propia.....	28
Tabla 6. Frecuencias y valores medios resultantes para el criterio Costes y Aspectos Logísticos. Fuente: Elaboración propia .....	29
Tabla 7. Frecuencias y valores medios resultantes para el criterio Aspectos de la Instalación. Fuente: Elaboración propia .....	30



## **ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS**

AALOG – Agrupación logística

AGM – Academia General Militar

AHU – Unidad de tratamiento del aire

BICC – Batallón de Infantería de Carros de Combate

CC – Carro de combate

CIA – Compañía

CMT – Campo de maniobras y tiro

CNAD – Centro nacional de adiestramiento

CPU – Unidad central de procesamiento

CUD – Centro Universitario de la Defensa

E.T. – Ejército de Tierra

eFP – Enhance Forward Presence

EWNA – Sistema de seguimiento del arma

JC – Jefe de Carro

KMW – Krauss-Maffei Wegman

MBT – Main battle tank

OTAN – Organización del Atlántico Norte

PIB – Producto interior bruto

R.I. – Razón de inconsistencia

RAC – Regimiento Acorazado

TFG – Trabajo de fin de Grado

TMS – Sistema de gestión térmica

ULC – Unidad central lógica

UPA – Unidad de potencia auxiliar

VSCU – Sistema de compresión de vapor





# 1 INTRODUCCIÓN

La presente memoria recoge los resultados obtenidos durante la realización del Trabajo Fin de Grado (TFG) con título “Desarrollo de un sistema para refrigerar la electrónica de la torre del carro de combate (CC) Leopardo 2E” del grado en Ingeniería de Organización Industrial impartido por el Centro Universitario de la Defensa (CUD), en la Academia General Militar (AGM).

Actualmente, el Ejército de Tierra (E.T.) tiene como medio acorazado el carro de combate Leopardo 2E, el cuál es un sistema de armas desarrollado por la empresa alemana Krauss-Maffei Wegman (KMW). Su fabricación se ha realizado en España por la empresa Santa Bárbara General Dynamics European Land System. El carro de combate español surge del modelo alemán Leopard 2A6, con la implementación de una serie de mejoras como el sistema de mando y control BMS Lince, hasta convertirlo en el carro de combate actual, con el que operan las unidades acorazadas españolas. Cabe destacar, que el Leopardo 2E no ha sido desplegado en operaciones de combate. No obstante, está siendo empleado en la misión “Enhanced Forward Presence” (eFP) liderada por la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN) en Letonia. Además, este sistema de armas ha sido adquirido y empleado por diferentes ejércitos en distintos terrenos y climas. Por todo esto, se han llevado a cabo diversas evaluaciones del sistema en el que se proponen posibles modificaciones con la finalidad de mejora de dicho sistema.

El ámbito de aplicación de este proyecto gira en torno a la división Castillejos, ya que está formada por las brigadas que cuentan con el carro de combate Leopardo 2E. En concreto, este trabajo se podrá aplicar en los regimientos acorazados (RAC), los cuales están formados por batallones de Infantería de carros de combate (BICC) y por grupos de Caballería.

Hoy en día, la zona geoestratégica donde el E.T. despliega sus unidades es África Central y Oriente Próximo, áreas en las cuáles predominan altas temperaturas. Aunque nunca se hayan desplegado unidades acorazadas en estas zonas con anterioridad, es fundamental que se tenga la capacidad de hacerlo con garantías de que el CC Leopardo 2E, funcione a pleno rendimiento. A este hecho, se le suma que los RAC's en España se encuentran en ubicaciones tales como Zaragoza, Córdoba, Madrid y Badajoz. En estas zonas, gran cantidad de los carros de combate ven anulada su capacidad operativa debido a las altas temperaturas y a la ausencia de un sistema de aire acondicionado eficiente. Es por ello, que el CC Leopardo 2E requiere una serie de implementaciones que aumenten su eficiencia, con el objetivo de mejorar la capacidad de despliegue de unidades acorazadas en ambiente desértico.

La motivación de este trabajo está basada en la evaluación de posibles modificaciones, que permitan solventar los diversos problemas detectados en los componentes electrónicos, ocasionados por las altas temperaturas alcanzadas en los carros de combate Leopardo 2E en ambientes áridos. Por tanto, es esencial la toma medidas para reducir las averías derivadas del sistema electrónico, las cuáles suponen un costo económico y operativo de gran impacto (ver anexo I). Hasta el momento, las condiciones climáticas severas del territorio español han dificultado el trabajo de las tripulaciones debido a un incremento de la temperatura en el interior del carro por encima de la exterior, la cual está por encima de una temperatura aceptable de trabajo.



## 2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

### 2.1 Objetivos y alcance

El objetivo general de este trabajo es analizar la implementación un sistema de refrigeración en la torre del CC Leopardo 2E, con una eficiencia suficiente para paliar los efectos que provocan las altas temperaturas en la electrónica de la torre. De esta manera, se obtendría un carro de combate más operativo y adaptado al combate en ambientes cálidos.

Para el desarrollo del objetivo principal de este proyecto, se han definido los siguientes objetivos complementarios:

- Analizar el sistema eléctrico y el sistema de refrigeración actual de la torre del CC Leopardo 2E, de manera que se puedan identificar las causas, los problemas y efectos derivados del sobrecalentamiento de la electrónica.
- Buscar información sobre los sistemas de refrigeración actuales implementados en carros de combate.
- Desarrollar los sistemas de refrigeración actuales compatibles con el CC Leopardo 2E, exponiendo sus necesidades energéticas, económicas y de espacio.
- Comparar los sistemas propuestos en base a criterios de expertos.
- Analizar los resultados obtenidos, y exponer la opción ganadora.
- Deducir las conclusiones en base al trabajo, incluyendo las líneas futuras del mismo.

En lo que se refiere al alcance del proyecto, a continuación, se describe la planificación temporal del mismo, así como las fases y las tareas que lo comprenden. El tiempo total disponible para desarrollar el proyecto es de cuatro meses aproximadamente, donde podemos diferenciar tres fases principales.

#### ■ Estudio y obtención de información acerca de la torre del CC Leopardo 2E.

Este periodo abarca toda la estancia en la unidad de prácticas, donde se realizarán los siguientes cometidos:

1. Familiarizarse con el CC aprendiendo y conociendo las principales capacidades y limitaciones de este, así como la función que desempeña cada miembro de la tripulación en su puesto táctico
2. Entrevista con personal del escalón de mantenimiento, con el fin de conocer más profundamente las causas, origen y efectos provocados por el sobrecalentamiento de la electrónica de la torre del CC.
3. Estudio de los manuales de usuario referentes a la torre del Leopardo 2E.

#### ■ Análisis de los sistemas de refrigeración actuales.

1. Estudio de los posibles sistemas de refrigeración compatibles con el carro Leopardo 2E.
2. Realización de encuestas al personal del batallón, para obtener la opinión de expertos en la materia.
3. Desarrollo de los sistemas de refrigeración elegidos, exponiendo sus ventajas e inconvenientes en cuanto a la implementación en el CC.
4. Realización de una selección previa a someterlos al análisis multicriterio.



- Toma de decisiones y resultados.
  1. Ejecución del análisis multicriterio, así como explicación de los resultados.
  2. Redacción de las conclusiones extraídas sobre la materia.
  3. Exposición de las líneas futuras del trabajo.

Cabe destacar, que este trabajo se limita a realizar un estudio de la implementación de los sistemas propuestos, así como su comparación. Este TFG presenta dos limitaciones fundamentales: la realización de pruebas en condiciones reales de los sistemas de refrigeración y la viabilidad económica de la adquisición e instalación del sistema.

La primera variable limitante, surge de la falta de medios en la unidad de estancia durante las prácticas externas. Este factor, imposibilita que el proyecto se haya adaptado lo máximo posible a la realidad. Debido a que no se han podido realizar las pruebas necesarias para valorar el rendimiento de los diferentes sistemas de refrigeración expuestos. Esta limitación surge por el elevado coste de adquisición de los sistemas.

La segunda variable limitante se basa en la falta de información respecto a la adquisición de los sistemas refrigeración. Si bien es cierto, que de algunos de ellos se ha podido realizar una estimación real, de otros no ha sido posible. Por tanto, no se profundiza excesivamente en el análisis de costes realizado para cada alternativa.

En última instancia, cabe destacar otras limitaciones existentes. El cartel de expertos en base a los cuáles se han definido los criterios de elección es limitado, a pesar de, su experiencia y conocimiento técnico sobre el proyecto. Para una adquisición e implementación de este calibre, se necesitaría una amplia gama de equipos designados por el Ministerio de Defensa.

## 2.2 Metodología

La metodología empleada en la elaboración de este proyecto tiene cuatro fases en las que se realizan los determinados trabajos para alcanzar los objetivos complementarios citados anteriormente.

- En primer lugar, se estudiarán las capacidades y limitaciones a nivel técnico del sistema de refrigeración y del eléctrico que tiene la torre del CC Leopardo 2E. Este cometido se realizará mediante el estudio de los manuales de usuario referentes al carro de combate y con el trabajo conjunto con el personal de la 1<sup>o</sup>CIA (compañía) “Águila” que está formado por cuadros de mando y tripulaciones que cuentan con varios años de experiencia en el uso del carro de combate, y con el personal del escalón de mantenimiento que cuentan con la formación técnica cualificada respecto al uso y mantenimiento de los sistemas del carro de combate.

- En segundo lugar, se buscará la información sobre los sistemas de refrigeración actuales tanto civiles y militares que puedan ser usados con el CC Leopardo 2E. Esta información se obtendrá a través de entrevistas con personal de la unidad principalmente con el que trabaja en el escalón de mantenimiento, y a través de documentación online.

- En tercer lugar, se analizarán y se desarrollarán los diferentes sistemas de refrigeración actuales civiles y militares interoperables con la torre del CC del Leopardo 2E.

- En cuarto lugar, se realizará una comparación de los sistemas mediante un análisis multicriterio para obtener el más óptimo teniendo en cuenta los criterios marcados por los expertos.

- En última instancia, se deducirán las conclusiones respecto al proyecto, con la finalidad de recalcar la gran necesidad de implementar este sistema de refrigeración para intentar impulsar su puesta en marcha y así otorgarle la importancia que se merece.



Los instrumentos usados para elaborar este trabajo abarcan métodos tanto cualitativos, como cuantitativos.

■ Los métodos cualitativos usados han sido entrevistas y revisión documental.

1. Se han realizado varias entrevistas con diferente finalidad, la primera de se realizó a los cuadros de mando de la 1ª CIA "Águila", con el objetivo de recalcar la necesidad de implementar un sistema de refrigeración en la torre del carro.

2. Aparte, se ha realizado una revisión documental de los diferentes manuales de usuario que describen el funcionamiento de los sistemas la torre del CC Leopardo 2E. Este estudio ha sido fundamental para poder entender los mismos, así como para encontrar el origen de la problemática causada por el sobrecalentamiento. También ha ayudado a buscar un sistema que cumpla con las necesidades técnicas que el carro requiere.

■ Los métodos cuantitativos usados han sido encuestas y el método de análisis multicriterio AHP.

1. Las encuestas, se realizaron a personal perteneciente prácticamente a todas las áreas del batallón: cuadros de mando de las CIA's, cuadros de mando de la plana mayor y personal del escalón de mantenimiento. Estas fueron fundamentales para obtener una fuente fiable de información, y así poder ejecutar una comparación entre los sistemas de refrigeración en base a criterios definidos por personal cualificado en la materia.

2. El método de toma de decisiones AHP, se trata de una herramienta analítica comúnmente usada en los procesos de ingeniería de sistemas. Esta técnica de ayuda a la decisión ha sido fundamental en la elección del sistema de refrigeración óptimo para el carro de combate, ya que proporciona un grado de confianza alto al estar basado en opiniones de expertos en la materia.



### 3 ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

Bien es cierto, que desde que se adquirió el CC Leopard 2E en 1998 existe la problemática respecto al desarrollo e implementación de un sistema de refrigeración para el carro de combate alemán. Este problema, surge a raíz de que por aquel entonces no existía una solución técnica fiable, ya que, tampoco suponía ningún beneficio para el ejército alemán. Por ello, el Leopard 2<sup>1</sup>, fue construido sin un sistema de refrigeración y, por ende, el Leopard 2E siguió la misma línea. Este hecho se debe, a que este carro de combate fue diseñado para trabajar en suelo europeo, caracterizado por no sufrir los efectos de temperaturas elevadas. Por tanto, al operar en el territorio árido español (Badajoz, Madrid, Córdoba y Zaragoza) comenzaron a surgir problemas en el sistema eléctrico. El principal, ha sido la avería de sus sistemas electrónicos, debido al sobrecalentamiento de los componentes que los forman.

Es de señalar que hoy en día, la mayoría de los carros de combate de ejércitos modernos incorporan un sistema de aire acondicionado. De forma, que tienen la capacidad de operar en ambientes desérticos sin poner en riesgo la operatividad del carro. En este aspecto el Ejército Español se está quedando retrasado, ya que cada vez las unidades acorazadas tienen menos carros en servicio. Esto, tiene un impacto negativo principalmente en dos aspectos;

- En primer lugar, la instrucción y adiestramiento de las unidades acorazadas queda reducida e incompleta.
- En segundo lugar, la rotura habitual de componentes electrónicos supone un gasto considerable en el Ministerio de Defensa.

Como antecedentes a este proyecto, cabe resaltar una serie de mejoras que no fueron concluyentes para el carro de combate Leopard 2E.

➤ **Sistema de refrigeración MKK3:** fue desarrollado por la empresa KMW, y sometido a una serie de pruebas en Arabia Saudí en noviembre de 2011. Las pruebas consistieron en realizar recorridos de 200 Km diarios y ejercicios de tiro distintos, todo ello bajo los efectos de altas temperaturas. En estas pruebas se llevaron dos carros, uno con un sistema de aire acondicionado instalado y otro de serie. Este sistema de refrigeración finalmente se descartó, ya que la reducción de la temperatura de los componentes electrónicos fue muy leve y poco eficiente, es decir, su rendimiento no cumplió el resultado esperado (KMW, 2001).

---

<sup>1</sup> Leopard 2, predecesor del carro de combate del Leopard 2E.



➤ **Ventilation Suit for tank crews:** se trata de un traje transpirable que evita la humedad alrededor del cuerpo humano, fue desarrollado por la empresa AUTOFLUG. Este traje tiene un sistema de distribución de aire en su interior, formado por un soplador, una entrada de aire en el soplador, una entrada de aire en el traje de ventilación y una salida de aire. El aire se obtiene de la cámara en la que se encuentre el tripulante dentro del carro, pasa por el soplador donde su velocidad es potenciada y el flujo de aire optimizado circula por el mono refrigerante hasta entrar en contacto con la primera capa de ropa del tripulante, donde realiza su función y posteriormente el aire es expulsado por los orificios de salida de aire. Este sistema genera un microclima cerca del cuerpo que favorece las capacidades físicas y psicológicas del tripulante. Además, presenta otras ventajas tales como, su posible uso desmontado y la interoperabilidad con un aire acondicionado (Autoflug, 2006).

➤ **Transistores MOSFET:** se tratan de transistores con un gran rendimiento de trabajo bajo condiciones de altas temperaturas. Estos dispositivos se instalaron en la torre del Leopardo 2, específicamente en el sistema de seguimiento del arma. Los resultados obtenidos fueron favorables, destacaron su bajo consumo en modo estático, su tamaño reducido y su alta velocidad de conmutación. Estos componentes contribuyeron a la disminución del consumo eléctrico de la torre, ya que, por ejemplo, se podía mover la torre del CC sin usar las baterías (ABAD, 2013)

➤ **Ultracaps:** son ultra condensadores que almacenan y proporcionan energía a la torre del leopardo. Estos componentes acumulan la energía que almacenan las baterías y la vierten al sistema eléctrico cuando este así lo demanda. Es decir, cuando se produce un movimiento brusco de la torre desde su estado de reposo el sistema eléctrico demanda un importante pico de intensidad y con el uso de estos condensadores esta energía eléctrica es proporcionada sin que se generen picos de tensión en el sistema. Además, contribuyen a la disminución del consumo eléctrico de la torre, ya que esta se podía mover sin necesidad de usar las baterías (ABAD, 2013).

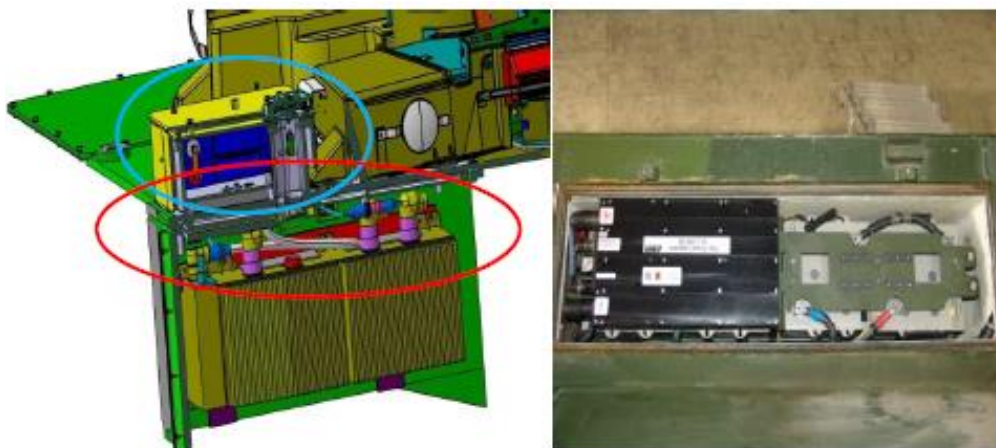


Figura 1. Instalación de transistores y ultracaps en el sistema de seguimiento del arma. Fuente: Informe Conferencia Internacional Master Gunner.



## 4. DESARROLLO

### 4.1 Análisis técnico de la torre del carro de combate leopardo 2e.

#### 4.1.1 Análisis del sistema eléctrico de la torre.

Con la finalidad de encontrar una solución al problema expuesto, se ha llevado a cabo un análisis del sistema eléctrico de la torre del CC Leopard 2E. Este análisis ha supuesto la realización de entrevistas a los jefes de carro (JC) y al personal del escalón, junto con la obtención de información a través de manuales e informes de pruebas realizadas al CC.

Tras varias conversaciones mantenidas con los JC's y el personal del escalón, queda en evidencia que los principales problemas del sistema eléctrico provienen de la electrónica de potencia, este componente pertenece al sistema de seguimiento del arma (EWNA), (ver figura 2) y a los elementos que conforman el compartimento electrónico (ver figura 4).

Tomando como referencia el manual del CC Leopard 2E A-213, (ACINF, 2016) el sistema electrónico de seguimiento del arma tiene un rango de temperaturas de funcionamiento por encima del cual se producen averías en los componentes electrónicos. El sistema de seguimiento del arma tiene la capacidad de alertar al JC de este sobrecalentamiento, cuando la temperatura de los servos alcanza los 80°C. A raíz de dispararse esta alarma, se produce una disminución de la potencia eléctrica en algunos sistemas tales como la electrónica de estabilización y el accionamiento azimutal o accionamiento de elevación. Este proceso tiene como finalidad disminuir la temperatura de los sistemas que componen la EWNA.

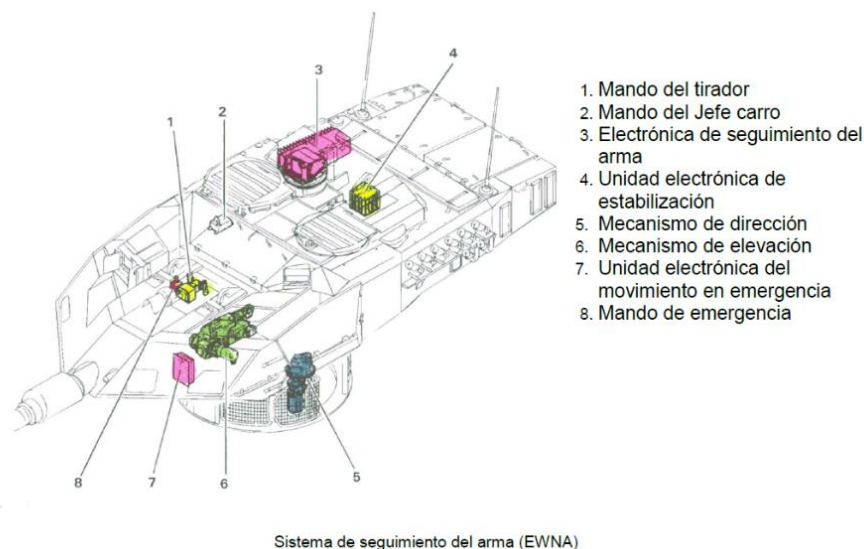


Figura 2. Sistema de accionamiento eléctrico. Fuente: Manual didáctico Leopard 2E A-213

Si, a pesar de estas medidas la temperatura sigue creciendo hasta los 100°C, la electrónica de la EWNA se desconecta automáticamente y, por ende, la torre queda inutilizada junto con sus sistemas de tiro. Todo este proceso previene la rotura de componentes electrónicos.



Además de lo explicado en el párrafo anterior, se produce una reducción paulatina de la corriente. Esta disminución sirve para proteger el motor del sobrecalentamiento, y se produce tras realizar el disparo y activarse la alarma. La corriente disminuye en el motor del eje de Elevación al transcurrir 14 s de 450 A a 180 A, y en el caso del motor del eje Azimutal, la duración es de 24s para pasar de 600 A a 300 A.

Cabe destacar que todas estas medidas de protección citadas anteriormente, quedaron en evidencia en la misión LEAR en Arabia Saudí (Mando de Apoyo Logístico, 2011). En esta misión, se desplegó un carro de combate Leopard 2E del BICC IV/X en "Málaga" para mostrar al ejército saudí sus capacidades en zona desértica. Durante pruebas de diversa índole la electrónica del carro quedaba inutilizada, y por ende la torre. Por tanto, en esta demostración se puso de manifiesto la importancia de adquirir un sistema de refrigeración más eficiente.

#### 4.1.2 Análisis del sistema de refrigeración actual del leopardo 2e.

El carro de combate leopardo 2E consta de dos sistemas de refrigeración en la torre: el sistema de ventilación de la EWNA y el sistema de refrigeración del compartimento electrónico.

##### ■ Sistema de ventilación de la EWNA.

Este sistema consta de un ventilador (ver figura 3) con válvula de ventilación y de un termo-contacto (se trata de un sensor de temperatura) y está instalado en la tapa del compartimento de electrónica de seguimiento del arma (ACINF, 2016). La función que desempeña es la succión del aire caliente de la cámara de combate y su expulsión al exterior del carro a través válvula de ventilación.

El ventilador tiene un sensor de proximidad y una válvula que se cierra neumáticamente para aislar el compartimento mediante el sistema de estanqueidad. El ventilador se acciona a través del termo-contacto, cuando este mide una temperatura de entre 33°-35° y se apaga entre los 23°-25°.



Figura 3. Sistema de ventilación de la EWNA. Fuente: Elaboración propia.



#### ■ Sistema de refrigeración del compartimento electrónico.

Este sistema se encuentra en la parte trasera izquierda de la torre. Está compuesto por un ventilador localizado en la parte inferior derecha del compartimento y éste se acciona de una manera similar al anterior, a través de la activación del termo-contacto. La temperatura de encendido es de 50°C y la de apagado oscila entre 35 y 45°C. Por tanto, el ventilador succiona el aire más frío de la cámara de combate y a través de un conducto flexible, lo distribuye en el compartimento electrónico. La sobrepresión expulsa el aire caliente a la cámara de combate a través de orificios de ventilación.

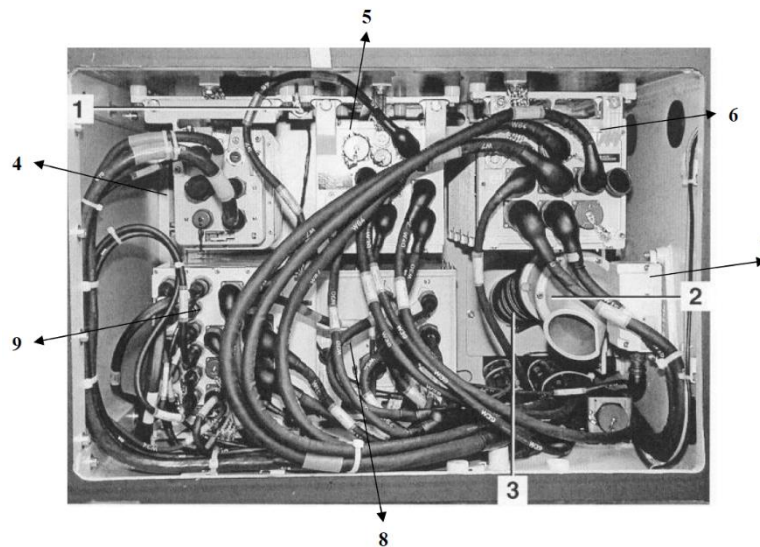


Figura 4. Compartimento de la electrónica Fuente: Manual didáctico Leopardo 2E A-213

- |                                               |                                                   |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1.-Termocontacto (sensor de temperatura)      | 6.- Calculador de la Dirección de tiro            |
| 2.- Ventilador (con válvula de ventilación)   | 7.- Giróscopo de la torre                         |
| 3.- Conducto flexible del ventilador          | 8.- Unidad electrónica de la estabilización       |
| 4.- Unidad electrónica del VTT(ETT)           | 9.- Ordenador de control y pruebas de LINCE (OCP) |
| 5.- Electrónica del periscopio del JC. (PERI) |                                                   |

Tras esta descripción de los sistemas de refrigeración que contiene la torre del CC Leopardo 2E se ha llegado a las siguientes conclusiones al respecto:

- Los sistemas mencionados anteriormente no son lo suficientemente potentes para enfriar la electrónica de la torre, ya que no refrigeran, únicamente hacen circular aire para bajar la temperatura.
- El sistema de refrigeración de la EWNA introduce en el carro aire del exterior por lo que, si nos encontramos ante un ambiente donde la temperatura exterior es alta, este sistema sería contraproducente produciendo un calentamiento de la electrónica en vez de su enfriamiento.



El sistema de refrigeración del compartimento electrónico obtiene el aire de la cámara de combate para posteriormente inyectarlo en el compartimento electrónico, por tanto, se deduce que el compartimento electrónico alcanzará la misma temperatura que la cámara de combate, y esto, a elevadas temperaturas no sería efectivo para enfriar los sistemas electrónicos.

## 4.2 Desarrollo de los sistemas actuales de refrigeración.

### 4.2.1 Sistema barracuda htr.

Es uno de los sistemas actuales que está siendo (Saab, 2021) implementado en vehículos de otras Fuerzas Armadas del mundo. Utiliza la tecnología Cool Cam System perteneciente a la empresa SAAB.

Durante los últimos años, este sistema ha sido usado en diversas zonas de operaciones, como es el caso de nuestro Ejército en la exposición del CC Leopard 2E a Arabia Saudí, o el caso del Ejército canadiense durante la misión de ISAF.

Se trata de un camuflaje pasivo que envuelve al vehículo y reduce la temperatura de forma progresiva como consecuencia del aislamiento y reflexión de la radiación solar. Esta tecnología minimiza la acumulación de calor en la superficie del CC durante el ciclo solar diurno, así como ocurre en su interior.

El citado sistema está basado en mallas mimetizadas policromadas compuestas de materiales que reflejan las radiaciones solares. La estructura 3D del sistema ayuda considerablemente a integrarse con el medio y dificulta la detección visual. Se puede adaptar al entorno en el que se trabaje, ya que existen diversas configuraciones del camuflaje tales como boscosa, árida, nevada, urbana, entre otras.

Cabe destacar que este sistema no produce el efecto de enfriamiento por sí mismo, sino que consigue que la superficie del carro se caliente menos. Por ello, este sistema es ideal para usarlo de forma conjunta con un aire acondicionado.

Otra virtud del sistema son las mejoras que pueden ser implementadas como los paraguas de sombra y los sistemas de transporte de carga.

- Los paraguas de sombra multispectrales (ver figura 5)1 obstruyen aún más el reconocimiento térmico del carro por parte de los enemigos.
- También ofrece una gran sombra y reduce considerablemente el calentamiento de la superficie.
- El sistema de transporte de carga ofrece una opción de guardar materiales vulnerables a altas temperaturas como agua, munición y equipo frágil.



Figura 5. CC Leopard 2E con el sistema barracuda. Fuente: Saab



Las ventajas de este sistema son:

1. Reduce la temperatura del CC en su totalidad, mejorando las condiciones de trabajo de los tripulantes. Además, mejorará la vida útil de los sistemas de armas, el equipo de transmisiones.
2. Mejora la eficiencia del sistema de aire acondicionado reduciendo el consumo de combustible debido a una menor necesidad de usarlo.
3. Reduce la temperatura de forma pasiva, es decir, que no necesita consumir energía del CC, por lo que no afectaría al consumo energético del mismo.
4. Disminuye la huella térmica del CC. Teniendo en cuenta que el mejor elemento de visión del Leopardo 2E es su cámara térmica, este efecto secundario sería muy beneficioso, ya que se obtendría una ventaja táctica abrumadora a través del ocultamiento. “Nadie va a Europa sin camuflaje”, teniente general Ben Hodges, comandante de USAEUR, 2017.

#### 4.2.2 Sistema de refrigeración líquida.

Tras realizar el análisis del sistema eléctrico, se detectó que el principal problema de la electrónica del CC Leopardo 2E sucede tras el sobrecalentamiento de la electrónica de potencia fundiéndose las tarjetas (ver figura 6) que la contienen y provocando la inutilización de la torre, así como sus sistemas de tiro. Por lo tanto, se va a analizar este sistema como una posible solución, ya que es usado hoy en día en muchas unidades centrales de procesamiento (CPU's) obteniendo grandes resultados.

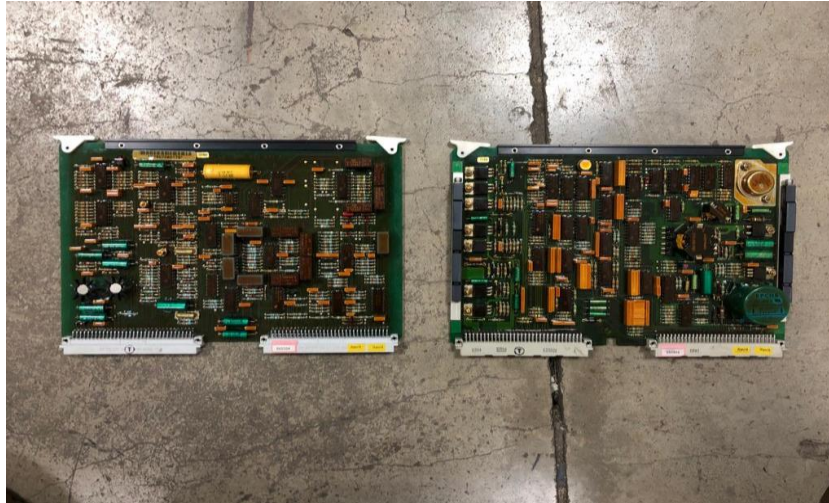


Figura 6. Tarjetas electrónicas de la EWNA. Fuente: Elaboración propia

El principio básico de este sistema se basa en un circuito refrigerante abierto, donde existen dos puntos en sus extremos, uno frío y otro caliente (Cabrera Coronel y Tigre Guncay, 2016). El punto frío del sistema tiene que estar en contacto con la superficie caliente del componente electrónico a enfriar. Por otra parte, se encuentra el punto caliente, al cual se transfiere toda la energía térmica desde el punto frío.

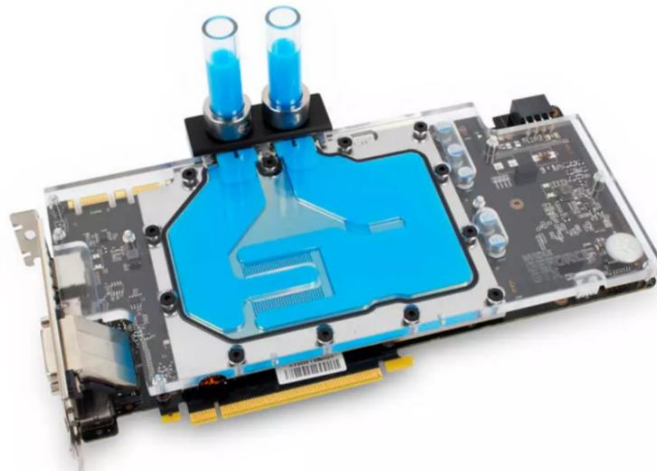
De forma general, los sistemas de refrigeración se componen de los siguientes componentes:

- Bloque de agua: es el elemento colocado sobre el componente eléctrico que se quiere enfriar, por su interior circula el líquido refrigerante.



- Bomba: es la pieza que se encarga de suministrar al líquido refrigerante la presión suficiente para desplazarlo a través de la placa refrigerante.
- Ventilador: está unido junto con el radiador. Su función es desplazar el máximo caudal de aire posible para provocar el mayor intercambio de energía térmica, debido a que estos dos factores son directamente proporcionales.
- Líquido refrigerante: se trata del fluido en estado líquido que transporta la energía térmica. Dependiendo de la marca del sistema el líquido varía, aunque de forma predominante este tipo de sistemas utilizan etilenglicol (compuesto químico orgánico anticongelante).
- Radiador: se trata del componente, generalmente de aluminio, donde se realiza el intercambio de calor entre el líquido refrigerante y el aire que le rodea.
- Conductos: son los tubos por los cuales circula el líquido refrigerante entre los componentes del circuito de refrigeración.

Respecto a las últimas actualizaciones en este sistema, destaca el bloque de agua para la tarjeta gráfica (Diego de Usera, 2018) (ver figura 7). Esta actualización sería extrapolable al CC, ya que se podrían enfriar las tarjetas de la electrónica de potencia, aunque deberían realizarse una serie de pruebas para probar su capacidad de refrigeración.



*Figura 7. Bloque de agua para tarjeta gráfica. Fuente: Hardzone,*

En resumen, este sistema está siendo implementado actualmente en ordenadores funcionando de manera adecuada. No obstante, debería ser testeado para comprobar su compatibilidad con el carro de combate. Esto es debido a que la circulación de fluidos por elementos eléctricos en un sistema de armas no parece lo adecuado.



#### 4.2.3 Programa integral de refrigeración y ventilación del carro de combate leopardo 2E.

Este programa tiene por objeto incorporar a las unidades dotadas con el CC Leopardo 2E, una serie de modificaciones en sus instalaciones para reducir la temperatura de los componentes electrónicos, así como de la cámara de combate, obteniendo de este modo un carro más eficiente para su uso en combate en regiones áridas.

Estos sistemas se han implementado en una unidad de entidad CIA perteneciente al BICC Mérida I/16, que a su vez depende del RAC Castilla 16. La duración de las pruebas ha sido de un año, y se realizaron entre el 2018 y 2019, principalmente de verano. Las pruebas han tenido lugar en el centro nacional de adiestramiento (CNAD) de San Gregorio y en el campo de maniobras y tiro (CMT) de Bótoa (Navarro García-Gutiérrez, 2018).

El mando y control de este proyecto ha pertenecido al Capitán D<sup>o</sup> Ignacia Navarro García-Gutiérrez, que por aquel entonces era el jefe de la 2<sup>o</sup>Cía. Como asesores y grandes partícipes del proyecto, encargándose de la labor técnica de la barcaza y la torre del CC, respectivamente, se encontraban el Brigada Blásquez, y el Sargento 1<sup>o</sup> Chaparro.

El sistema integral de refrigeración propuesto se compone de cuatro sistemas (RAC Castilla 16, 2019b)

1. Sistema NBQ del M-60
2. Inversión de la polaridad del ventilador de la EWNA.
3. Refrigeración por medio de la corriente de admisión del motor.
4. Refrigerador "casero" para añadir al conjunto al conjunto NBQ del carro.

Cabe destacar, que estos sistemas pueden trabajar de forma independiente o conjuntamente, obteniendo una mejorada refrigeración de los componentes electrónicos y de la cámara de combate del Leopardo 2E.

##### 1. Sistema NBQ del M-60.

Este sistema se aplicaba a las máscaras NBQ de los carros americanos, siendo capaz de congelar la cara de los tripulantes, por ello no cabe duda de su capacidad refrigeradora (RAC Castilla 16, 2019b).

El sistema NBQ se puede obtener fácilmente de los numerosos vehículos de origen americano que se encuentran inoperativos. Actualmente, se pueden obtener de dos fuentes:

1. De las brigadas, ya que todas ellas tienen zapadores, y estos usaban el vehículo Alacran<sup>2</sup> que también tiene el sistema NBQ.
2. De la Agrupación de apoyo logístico nº 61 (AALOG 61), ubicada en Colmenar viejo. En este lugar, se encuentran almacenados la mayoría de los M-60 que posee el E.T.

---

<sup>2</sup> Se trata de un M-60 modificado para desempeñar funciones de zapador.



Respecto a su instalación en el CC, es necesario cambiar la conexión eléctrica original de este sistema para adaptarla a la de los carros, que es una toma de mechero con 24 V (ver anexo IV). El sistema se incorpora junto a la unidad central lógica<sup>3</sup> (ULC), y se pasan dos mangueras de 25mm de diámetro por debajo de la radio "E" del CC, llegando así al compartimento de la electrónica (RAC Castilla 16, 2019c).

Se puede incrementar el rendimiento del sistema incorporando una célula Peltier (ver anexo II) en el alojamiento del filtro NBQ, esto provocará una disminución aún mayor de la temperatura. Se trata de una modificación muy factible por su sencilla instalación y la obtención de la energía no supondría un problema, ya que se obtiene de la misma toma eléctrica que el sistema NBQ.

## 2. Inversión de la polaridad del ventilador de la EWNA.

Se trata de una modificación simple y que puede ser llevada a cabo fácilmente por parte del personal especialista del 2º escalón. Únicamente se debe invertir la polaridad de la alimentación del ventilador de la EWNA, para que, en vez de introducir el aire caliente del exterior en la torre lo expulse (RAC Castilla 16, 2019b) (ver anexo IV).

## 3. Refrigeración por medio de la corriente de admisión del motor.

Consiste en la apertura de la tapa circular del mamparo<sup>4</sup> para obtener una corriente de aire permanente en la cámara de combate del Leopardo 2E (RAC Castilla 16, 2019b). Para ello, se precisan dos llaves (ver anexo IV):

- Llave de accionamiento manual, que permitirá el aislamiento de las tomas de admisión del motor poniéndola en la conexión rápida de la tapa del motor.
- Servoválvula, se utiliza para puentear la llave NBQ que se activa junto con la función de estanqueidad del CC. Esta llave tiene dos latiguillos que permiten aislar la tapa de mamparo bloqueándola y a su vez permaneciendo esta abierta. De esta manera, el sistema contra incendios no se activará en ningún caso (RAC Castilla 16, 2019c).

## 4. Incorporación de un refrigerador "casero" al conjunto NBQ del carro.

Esta última modificación, se basa en construir un sistema de aire acondicionado en el soporte de los filtros NBQ del carro de combate.

El sistema consta de una bandeja metálica a la que se le perforará un lateral por donde se extraerá el aire del sistema NBQ. A continuación, se colocará en su interior cuatro rodillos de celulosa perforada que siempre permanecerán mojados, ya que estarán conectados mediante tubos de PVC a un sistema hidrante mediante bomba de agua. Este último, a su vez se conectará al filtro ciclónico del carro, de forma que el aire que viene del filtro ciclónico se enfriará, consiguiendo así un enfriamiento de la cámara de combate (RAC Castilla 16, 2019c) (ver anexo IV).

Cabe destacar, que esta modificación puede ser mejorada añadiendo células Peltier bajo bandeja metálica, permitiendo el enfriamiento del agua y obteniendo un descenso aún mayor de la temperatura en la cámara de combate.

---

<sup>3</sup> La ULC controla el funcionamiento automático del sistema de la dirección de tiro.

<sup>4</sup> Se trata de la tapa redonda que une la cámara de combate con la cámara del motor, esta tapa se abre y se cierra dependiendo de la actividad o situación en la que se encuentre el carro, vadeo, ambiente NBQ.



#### 4.2.3.1 PRUEBAS REALIZADAS EN EL BICC MÉRIDA I/16.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al utilizar los CC's junto con los sistemas citados anteriormente en este apartado (RAC Castilla 16, 2019a).

Los carros equipados con los sistemas 1 y 2, se mostraron mucho menos afectados por el calor. Esto es debido a que los ventiladores de la EWNA trabajaron durante menos tiempo. Por el contrario, los carros no equipados con estos sistemas llegaron a estar más de 30 horas funcionando de forma ininterrumpida.

La comodidad de las tripulaciones en los carros equipados con cualquiera de los sistemas, especialmente con el sistema 3 y 4, se vio claramente mejorada, según declaraciones de los mismos tripulantes.

Mediante termómetros digitales se pudo apreciar una reducción de la temperatura ambiente dentro del compartimento de la electrónica y la EWNA en los carros equipados con los sistemas 1 y 2, aunque estos resultados mejoraban cuando en los carros se equipaban además los sistemas 3 y 4. Bien es cierto, que la mejora de la habitabilidad en el vehículo viene dada más por el movimiento del aire que por la reducción real de temperatura.

El consumo eléctrico del carro, no se ha visto afectado por la implementación de ningún sistema. Asimismo, la implementación de las células Peltier en los sistemas 1 y 4, tampoco han alterado el consumo energético del carro.

Los costes del programa integral de refrigeración y ventilación del carro son muy reducidos en comparación con otros mencionados anteriormente en la memoria. Partimos de que el sistema 2 no supone ningún coste, ya que sólo se invierte la polaridad de la alimentación del ventilador. A continuación, se muestra el coste necesario para instalar cada sistema (RAC Castilla 16, 2019a):

*Tabla 1. Costes del Programa Integral de refrigeración. Fuente: Elaboración propia*

<b>Sistema 1</b>	Célula Peltier	Conexiones de mechero
<b>Coste</b>	30 €	5 €
<b>Sistema 3</b>	Servo válvula	Latiguillos, cruces y llave manual.
<b>Coste</b>	30 €	50€
<b>Sistema 4</b>	Célula Peltier	Bandeja, cilindros de celulosa, sistema hidrante de agua.
<b>Coste</b>	50 €	100 €

En total sería necesaria una inversión de unos 265 € en cada CC. Dado que el E.T tiene 219 carros, la inversión total sería 58.035,00 €.

Seguidamente, se exponen las conclusiones extraídas acerca de este programa integral de refrigeración:

- Tiene un coste económico muy asequible para el Ejército de Tierra, teniendo en cuenta el pequeño porcentaje del Producto Interior Bruto (PIB) que el Estado invierte en materia de Defensa.
- Destaca la eficiencia de este programa, ya que, mediante un bajo consumo eléctrico, se ha conseguido reducir la temperatura en la electrónica de la EWNA y en el



compartimento de la electrónica, permitiendo el empleo del vehículo de forma óptima en condiciones de elevada temperatura.

- El uso de los sistemas que lo componen no afecta al consumo de potencia eléctrica del carro, por lo que no se comprometería el funcionamiento de otros.
- Como aspecto secundario, cabe destacar la mejora de las condiciones de trabajo en la cámara de combate, aunque no se trate de un sistema que refrigere el flujo del aire.

#### 4.2.4 Sistema MKK12.

Este sistema de refrigeración ha sido diseñado para el CC Leopard 2E por la empresa alemana KMW. Se trata de un sistema de refrigeración por aire o tipo Split<sup>5</sup> al uso, es decir, se compone y funciona de forma similar a cualquier aire acondicionado comercial. Su funcionamiento consiste en transmitir un flujo de aire frío (ver figura 8) a través de los lugares donde se encuentra la electrónica de la torre, produciéndose así, una bajada de temperatura de la misma (KMW, 2003).

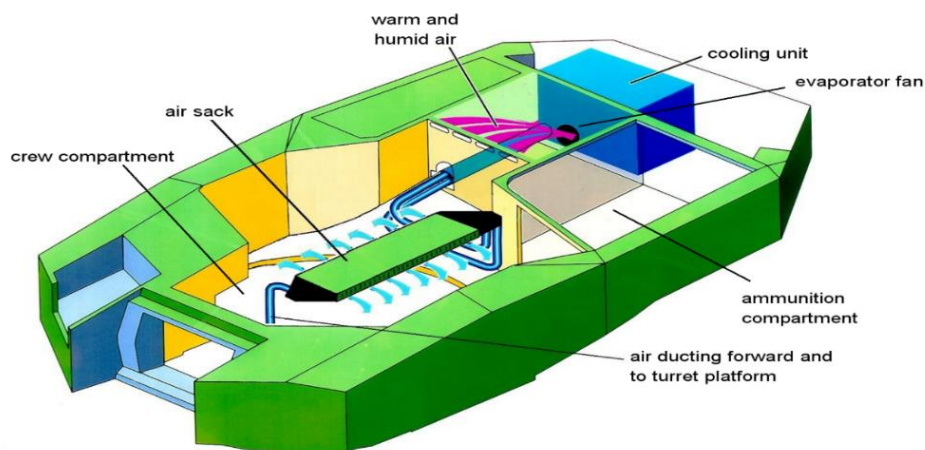


Figura 8. Distribución del flujo de aire con el sistema MKK12 en el Leopard 2E. Fuente: MKK12 Demonstration Leopard 2E

Dentro del sistema MKK12 podemos diferenciar tres partes (KMW, 2006a):

1. Sistema generador de aire refrigerado, se encuentra en el cofre trasero derecho de la torre del carro de combate. Su función consiste en generar el flujo de aire refrigerado que circulará por los sistemas electrónicos. Este sistema lo forman los siguientes componentes: ventilador, condensador, controlador de la electrónica de potencia, motor, compresor, bomba de condensación y evaporador (ver figuras 9 y 10)

<sup>5</sup> Aire acondicionado Split: es un equipo de climatización, formado por dos unidades separadas. Una exterior encargada de expulsar el aire caliente, y una interior encargada de generar y distribuir el aire refrigerado.



2. Terminal del sistema, se localiza en el puesto de radio-cargador. Se trata de una unidad de control lógica que regula el uso del sistema de refrigeración. El formato de este terminal es tipo display, y tiene la capacidad de activar o desactivar el sistema de refrigeración cambiando parámetros, tales como la temperatura y el caudal del aire, para ajustarse a las necesidades del carro de combate. Además, el sistema cuenta con tres termostatos que activan o desactivan el sistema de refrigeración en función de la temperatura.

3. Sistema de ventilación del aire refrigerado, está formado por conductos de ventilación y dispensadores, a través de los cuales circula el aire frío de manera hermética. Estos conductos estarían acoplados al techo de la torre, de manera que conectan el sistema generador de aire con los compartimentos electrónicos y la cámara de combate, asegurando la correcta distribución del aire frío en la torre del Leopard 2E.

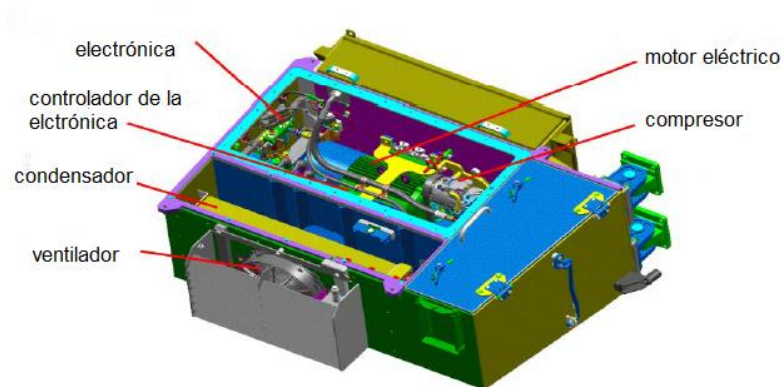


Figura 9. Vista trasera del Sistema MKK12. Fuente: MKK12 Demonstration Leopard 2E



Figura 10. Vista frontal del Sistema MKK12. Fuente: MKK12 Demonstration Leopard 2E



Respecto a la alimentación del sistema de refrigeración MKK12, resulta ser sencillo y eficiente, debido a que tiene la capacidad de ser interoperable con otros elementos del carro para la obtención de la energía eléctrica. Además, el uso de este sistema de refrigeración no supone un gran consumo de energía eléctrica (120 A) en comparación con otros sistemas (KMW, 2008). En primer lugar, se puede usar como fuente de energía el sistema de propulsión principal del carro, la energía producida por el grupo motor se puede transferir mediante conexiones eléctricas al sistema de refrigeración. En segundo lugar, el uso de las baterías del carro. Como tercera opción se podría utilizar la Unidad de Potencia Auxiliar (UPA). Esto supone una ventaja, ya que no existe la necesidad de adquirir una fuente de alimentación externa al CC.

En cuanto a los costes, se ha consultado el informe realizado por KMW (KMW, 2006b). El resultado fue un coste unitario de 179.169,00 €, en el que viene incluido el coste de instalación en los vehículos acorazados. Por tanto, teniendo en cuenta que el Ejército de Tierra tiene 219 CC's repartidos en 4 regimientos acorazados, el precio final de la adquisición e implementación del sistema MKK12 será 39.238.011,00 €.

#### 4.2.4.1 PRUEBAS REALIZADAS AL MKK12.

Resulta importante destacar que este sistema ya ha sido testeado en el pasado y se han obtenido grandes resultados. La empresa KMW ha realizado pruebas a este sistema en las ciudades de Kassel en el año 2003 y de Munich 2005.

En Kassel, el sistema MKK12 se implementó a un carro de combate compuesto por una torre de Leopardo 2E de procedencia española y una barcaza del Leopardo 2 A5, aunque este hecho no influyó en los resultados (Mando de Apoyo Logístico, 2006). El lugar de las pruebas fue una cámara de calor con una temperatura de +49°C para garantizar el calentamiento de todo el main battle tank (MBT). De entre todas las pruebas que se realizaron destacan las del 10 y 11 de diciembre, ya que quedó demostrada la efectividad del MKK12.

Las pruebas se realizaron con una fuente de alimentación de 24V DC suministrada al MKK12, pero la fuente de alimentación se redujo hasta suministrar 1/3 de la potencia máxima, debido a que el sistema a pleno rendimiento podía generar hielo en los componentes electrónicos. Además, con esta disminución se conseguía una prueba más fiable de su funcionamiento, ya que la reducción de la potencia correspondería con la que tendría el sistema en una situación real, en la cual los sistemas del carro de combate se encontrarían en movimiento. Para llevar a cabo la medición de la temperatura en los componentes electrónicos, se instalaron sensores de temperatura en ellos. El resultado de las pruebas fue satisfactorio, el sistema desarrollado por la empresa alemana consiguió reducir la temperatura de los sistemas electrónicos de 75°C hasta valores próximos a los 50°C. Este resultado se consideró un éxito, porque aumentaba la vida útil de los componentes del sistema eléctrico.

En Munich, también se instaló el sistema de refrigeración en un Leopard 2 A4. Se realizaron dos pruebas, para evaluar la potencia de refrigeración requerida por el MKK12 para un funcionamiento óptimo en condiciones extremas de calor y sequedad (KMW, 2008). Durante las pruebas, el CC fue cambiando su modo<sup>6</sup> de uso, a la vez que se medía la temperatura, la

---

<sup>6</sup> El carro tiene varios modos de uso, y de ello depende la cantidad de energía necesaria, como por ejemplo en el modo de observación el motor puede estar apagado.



velocidad del aire y el consumo eléctrico.

De entre los resultados obtenidos, destacan los siguientes:

1. En el interior del compartimento electrónico, también hubo una disminución de la temperatura sustancial de 75°C a 60°C.
2. En la cámara de combate se redujo la temperatura, logrando conseguir unas condiciones ambientales adecuadas para la tripulación.
3. Respecto a la potencia eléctrica necesaria, y teniendo en cuenta que el MKK12 consume 120 A y que las baterías proporcionan 915 A, queda en evidencia el requerimiento de la UPA que proporciona 215 A. Dependiendo de la misión que desempeñe el CC se usan distintos modos de funcionamiento. En cada uno de ellos, los sistemas consumen una cantidad diferente de energía eléctrica (ver anexo III). Por ejemplo, en una misión de vigilancia el CC no debe estar con el motor arrancado, ya que la corriente de las baterías no se repone y puede llegar a gastarse, no obstante, si debe usar sistemas de visión como la cámara térmica. Por lo tanto, si sumamos la energía consumida por los sistemas de visión y el MKK12 es bastante probable que las baterías queden vacías, dejando al CC inoperativo.

Por todo lo citado anteriormente, se deducen las siguientes ventajas del sistema de refrigeración MKK12.

- Tiene la potencia suficiente para enfriar tanto los compartimentos electrónicos como la cámara de combate, convirtiendo al CC Leopard 2E en un MBT apto para el combate en zonas cálidas y desérticas.
- Es interoperable con otros sistemas del carro para obtener la energía eléctrica necesaria, tales como, el sistema de propulsión principal, las baterías del CC y la UPA.
- Disminuye gastos en combustible, debido al uso predominante de la UPA como fuente de alimentación, porque no necesita tener el grupo-motor encendido para suministrar energía.



Figura 11. Sistema MKK12 instalado en el Leopard 2E. Fuente: MKK12 Demonstration Leopard 2E

- El lugar para su instalación es adecuado y suficiente (ver figura 11), porque no inhabilita ninguna capacidad del carro como, por ejemplo, vadear o activar las funciones de estanqueidad o NBQ.



- Reduce la temperatura mediante un flujo de aire refrigerado, no como el sistema de refrigeración actual que, en realidad, se trata de un sistema de ventilación ya que, únicamente mueve el aire.

#### 4.2.5 Sistema de Gestión térmica (TMS).

Se considera también como opción para el análisis, la implementación del TMS en el carro de combate Leopard 2E, debido a las similitudes entre el carro de combate americano y el español. Esto se debe, a que ambos CC's fueron producidos a partir del mismo programa, el MBT-70<sup>7</sup>.

Este sistema ha sido desarrollado por la empresa Meggit Defense para su implementación en el MBT americano M1A2. Se trata de una empresa internacional líder especializada en componentes de alto rendimiento para distintos ámbitos en materia de defensa (Prots, 2021).

El TMS elimina el exceso de calor producido por los equipos electrónicos, así como en el compartimento de la tripulación, de manera que garantiza que el rendimiento en combate no se degrade debido al estrés térmico. Utiliza una mezcla refrigerante de agua-propilenglicol (Defense, 2020).

El diseño es modular, con el propósito de maximizar la flexibilidad del sistema. También, destaca la interoperabilidad con otros sistemas de combate terrestres. Se compone de un sistema de compresión de vapor (VSCU) y una unidad de tratamiento de aire (AHU) (ver figura 13).

- Sistema de compresión de vapor, está situado en el contenedor blindado trasero izquierdo de la torre. Contiene también el equipo de refrigeración de accionamiento hidráulico. El VSCU se encuentra en contacto con la AHU mediante conductos protegidos por un blindaje, y por ellos circula el líquido refrigerante que posteriormente pasará a la AHU.

- Unidad de tratamiento de aire, se encuentra en el bullicio de la torreta. Este componente proporciona el aire refrigerado al compartimento de la tripulación y a los componentes electrónicos.

---

<sup>7</sup> MBT-70, fue un programa realizado conjuntamente por Alemania y Estados Unidos en el contexto de la Guerra Fría, para desarrollar un nuevo carro de combate occidental y poder combatir el carro de combate ruso.

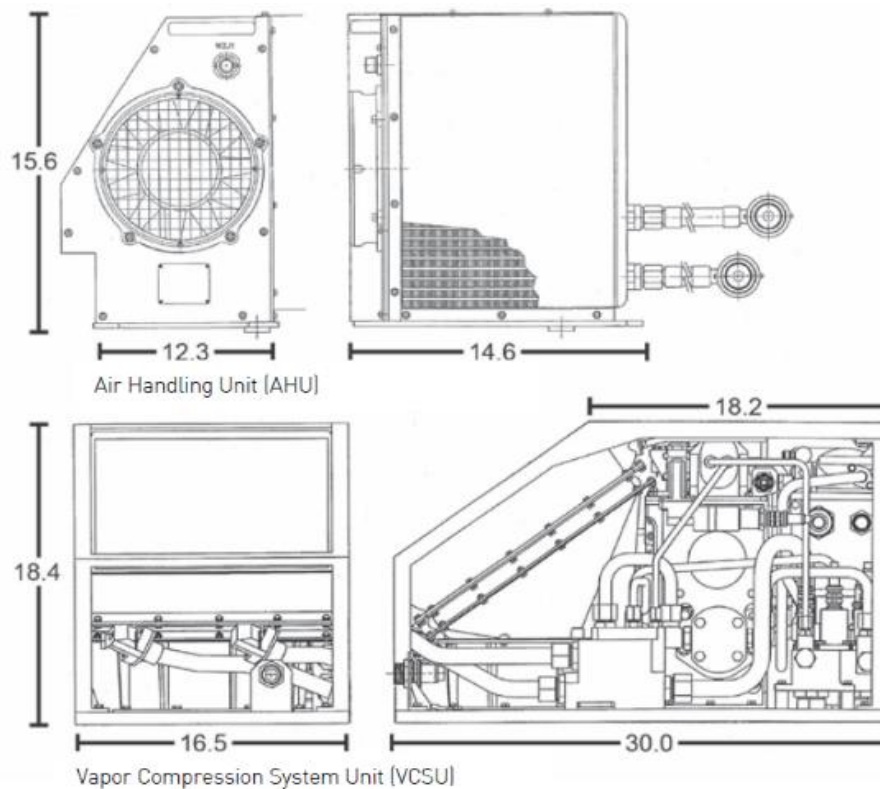


Figura 12. Vista espacial de la AHU y VCSU. Fuente: Thermal magement system

Utiliza como fuente de alimentación, las doce baterías del carro de combate y, en su defecto, su unidad de potencia auxiliar que suministra 214 A.

A diferencia del carro de combate español, el carro americano ha sido desplegado en zonas de operaciones que contaban con condiciones meteorológicas extremas, como bien puede ser Afganistán. Los resultados obtenidos tras la utilización del TMS, son bastante satisfactorios. La cámara de combate se ha mantenido por debajo de una temperatura de 30°C y la temperatura de los componentes electrónicos por debajo de 52°C, bajo condiciones extremas.

Respecto al coste de adquisición de este sistema, no se han podido encontrar datos, no obstante, en base al conocimiento del personal del escalón de mantenimiento del BICC Mérida I/16 podemos estimar que su precio rondaría los 300.000 €



## 5 SELECCIÓN

Tras haber desarrollado los sistemas de refrigeración anteriores, en este apartado se va a realizar una criba, ya que algunos de ellos presentan características no viables para su implementación. Esta selección se ha realizado en base a la opinión de personal cualificado en la torre del CC Leopardo 2E, perteneciente al escalón de mantenimiento del BIIC Mérida I/16. Se desechan el sistema de refrigeración líquida y el sistema de gestión térmica, por las siguientes cuestiones.

1. Sistema de refrigeración líquida, el principal motivo por el cual se rechaza es la presencia de líquido refrigerante en las proximidades de la electrónica de potencia. Esta presencia de fluido en el sistema electrónico podría dejar el carro inoperativo, además, de poner en peligro la vida de la tripulación. Otro aspecto a tener en cuenta es la eficiencia, porque ha sido utilizado para refrigerar ordenadores, no para un sistema de armas que se expone a altas temperaturas.

2. Sistema de gestión térmica, el coste que supone la adquisición de este sistema se escapa al presupuesto con el que opera el E.T en materia de defensa.



## 6 RESULTADOS DE METODOLOGÍA AHP

### 6.1 Primera etapa: Formulación del sistema.

Cabe destacar que todas las opciones tienen ventajas e inconvenientes. Por ello, es necesario aplicar un método de ayuda a la toma de decisiones que esté basado en la opinión de un grupo de expertos sobre la materia. Por estas razones se ha escogido el análisis multicriterio AHP (Ruiz López, 2019).

#### 6.1.1 Alternativas.

Después de haber realizado una primera selección, las alternativas restantes para implementar un sistema de refrigeración en la torre del carro de combate Leopardo 2E son:

1. Barracuda HTR.
2. Programa integral de refrigeración y ventilación del Leopardo 2E.
3. Sistema MKK12.

#### 6.1.2 Criterios y Subcriterios.

Los criterios seleccionados para este análisis multicriterio se presentan a continuación:

##### 6.1.2.1 CRITERIO 1: Eficiencia.

El criterio evalúa la capacidad de un sistema de obtener resultados esperados de él, utilizando la menor cantidad de recursos posibles. Los subcriterios seleccionados han sido los siguientes:

- Temperatura objetivo: se trata de la temperatura adecuada en la que los componentes electrónicos funcionan sin poner en peligro la operatividad del carro de combate.
- Consumo de energía: es la cantidad de energía consumida por el sistema refrigeración para alcanzar la temperatura objetivo.
- Condiciones ambientales de la cámara de combate: se define como la temperatura deseable que existe en la cámara de combate.

##### 6.1.2.2 CRITERIO 2: Costes y aspectos logísticos.

El criterio consiste en la evaluación de los sistemas de refrigeración en base a aspectos económicos y logísticos. Para obtener una mayor profundización, se definen los siguientes subcriterios:

- Coste de adquisición: es el subcriterio más determinante y condicionante de la mayoría de las adquisiciones. Se trata de la inversión inicial realizada para obtener una determinada cantidad de productos para su posterior implementación.
- Coste de operación: es el gasto económico destinado a labores de mantenimiento durante todo el ciclo de vida del producto. También se incluye el gasto en mejoras para la actualización del producto con el paso del tiempo.



➤ **Fiabilidad y durabilidad:** se tratan de las cualidades del sistema relacionadas con la ausencia de fallos y la relación directa con la tasa de tiempo en el que el sistema está operativo. También tiene en cuenta la facilidad de reparación del sistema, así como la velocidad de obtención de los repuestos necesarios para la reparación de los sistemas.

### 6.1.2.3 CRITERIO 3: Aspectos de la instalación.

El criterio evalúa en todos los aspectos que influyen en la facilidad de añadir el sistema en el carro de combate. Los subcriterios seleccionados han sido los siguientes:

- **Ubicación:** se refiere al espacio o lugar destinado a contener el sistema de refrigeración.
- **Tareas de mecanizado y adaptación:** son el conjunto de modificaciones realizadas para completar la instalación del sistema de refrigeración.
- **Habitabilidad:** se define como la ausencia de equipos e instalaciones que dificulten el trabajo de los tripulantes.

## 6.2 Segunda etapa: Evaluación de criterios.

En este apartado, se va a determinar los pesos de cada uno de los criterios. El rango de valores válidos vendrá dado por la escala de Saaty (ver figura 13), cruzando los criterios dos a dos. De esta forma, se podrá estimar la importancia relativa entre en cada uno de ellos.

*Tabla 2. Escala de Saaty. Apuntes de Métodos cuantitativos de ayuda a la decisión*

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

Para establecer el rango de importancia de los criterios y subcriterios se ha realizado un cuestionario a cuadros de mando, de entre los que podemos destacar dos grupos:

1. El primer grupo, se compone de los jefes de la plana mayor de mando del BICC Mérida I/16 (4 PAX), es decir, los jefes de las distintas secciones (pie de pagina). Se destaca el papel desempeñado por el Capitán Don Ignacio Navarro García-Gutiérrez, jefe de la tercera sección.

2. El segundo grupo está formado por personal especialista (3 PAX) en electrónica, perteneciente al escalón de mantenimiento de la torre del CC Leopardo 2E, en el cual cabe destacar al Brigada Don Esteban Canitrot, jefe de departamento de la electrónica de los sistemas de dirección de tiro del carro.



Se consideró que con el criterio de este personal se podría establecer la matriz de decisión adecuada para obtener un resultado viable, ya que gracias a su formación profesional y su experiencia conocerían las necesidades técnicas del sistema de refrigeración junto con las limitaciones económicas en lo referente a su adquisición.

### 6.2.1 Cálculo de los pesos de los criterios de valoración.

El formato utilizado para la encuesta, así como los resultados de ponderación de los criterios principales aparecen en la siguiente figura.

Tabla 3. Frecuencias y valores medios resultantes de las encuestas realizadas por los expertos sobre los criterios principales. Fuente: Elaboración propia

	Extremadamente más importante A	Mucho más importante A	Más importante A	Ligeramente más importante A	Igual de importantes	Ligeramente más importante B	Más importante B	Mucho más importante B	Extremadamente más importante B	
<b>CRITERIOS PRINCIPALES</b>										
A	<b>Número de votos</b>									B
Eficiencia			1	2						Costes y aspectos logísticos
Costes y aspectos logísticos		1	1	1						Aspectos de la instalación
Aspectos de la instalación						2	1	1		Eficiencia

El número indica la frecuencia del criterio elegido por cada experto, y el círculo rojo representa la opción media. Esta opción media ha sido calculada matemáticamente, y posteriormente ha sido usada para el cálculo de los pesos de los criterios.

El cálculo de los porcentajes de los criterios se ha realizado aplicando el software AyudaDecision\_AHP\_net\_4.0 (REF). A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

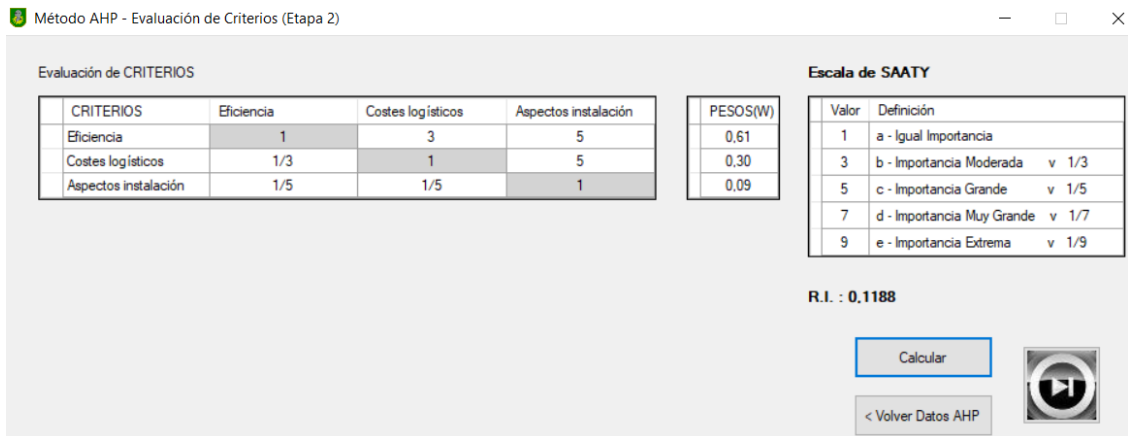


Figura 13. Pesos resultantes de los criterios principales mediante el método AHP. Fuente: Elaboración propia

Según los expertos del primer grupo, el orden de importancia de los criterios es eficiencia, costes, aspectos logísticos y aspectos de la instalación, con un porcentaje de ponderación para la decisión final de 61%, 30% y 9% respectivamente.

El parámetro R.I. (razón de inconsistencia) surge de las incoherencias de los expertos en la decisión de la importancia de los criterios. Cuánto mayor resulta este parámetro, se obtiene una mayor desviación de los resultados en el rango de importancia establecido, así como en la ponderación de los criterios. No obstante, si esta resulta ser entorno al 10%, el nivel de incoherencia que existe es aceptable. En este caso, el resultado del R.I oscila en torno a ese valor, por lo que no se tendrá en cuenta.

A lo largo de este apartado, aparecerán más R.I., no se menciona nada más de las mismos porque todas tienen un valor entorno al 10%.

### 6.2.2 Cálculo de los pesos de los subcriterios de valoración.

Para la realización de este cálculo se ha empleado el mismo método que para los criterios, en la siguiente figura se muestran los resultados:

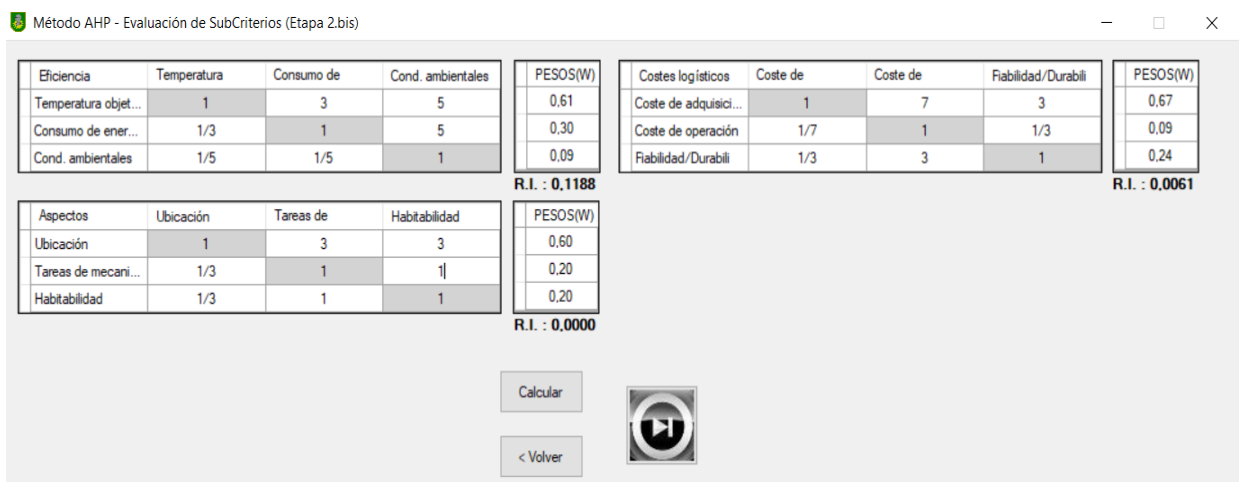


Figura 14. Pesos resultantes de los subcriterios mediante el método AHP. Fuente: Elaboración propia



Tabla 4 Frecuencias y valores medios resultantes de las encuestas realizadas por los expertos sobre los subcriterios. Fuente: Elaboración propia

SUBCRITERIO EFICIENCIA										
A	Número de votos									B
Temperatura objetivo.			1	2						Consumo de energía.
Consumo de energía			1	1	1					Condiciones ambientales de la cámara de combate
Condiciones ambientales de la cámara de combate							2	1		Temperatura objetivo
SUBCRITERIO COSTES Y ASPECTOS LOGÍSTICOS										
A	Número de votos									B
Coste de adquisición		2	1							Coste de operación
Coste de operación					1	1	1			Fiabilidad y durabilidad
Fiabilidad y durabilidad						2	1			Coste de adquisición
SUBCRITERIO ASPECTOS DE LA INSTALACIÓN										
A	Número de votos									B
Ubicación			1	2						Tareas de mecanizado y adaptación
Tareas de mecanizado y adaptación.			1		1		1			Habitabilidad
Habitabilidad					1	2				Ubicación

Analizando los resultados obtenidos en la tabla anterior, se puede observar como el segundo grupo de expertos ha destacado una series de subcriterios por encima de otros.

- Subcriterios eficiencia, en esta categoría la relación de importancia viene dada por el siguiente orden, temperatura objetivo, consumo de energía y condiciones ambientales de la cámara de combate. Las ponderaciones resultantes son 61%, 30% y 9% en el mismo orden.
- Subcriterios costes y aspectos logísticos, en este apartado el subcriterio más importante es el coste de adquisición con un valor del 67%, a continuación se encuentran la fiabilidad y durabilidad con 24%, y en último lugar con 9% el coste de operación
- Subcriterios aspectos de instalación, destaca con una mayor importancia sobre el resto la ubicación con 60%, y con un mismo valor del 20% se encuentran las tareas de mecanizado y la habitabilidad.



### 6.3 Tercera etapa: evaluación de las alternativas.

Para establecer el rango de importancia de las alternativas se ha realizado un cuestionario a un tercer grupo. Este grupo está compuesto por jefes de carro con más de 5 años de antigüedad (10 PAX), en el que podemos destacar al Capitán Don Carlos González Zamora jefe de la 1ª CIA del BICC I/16. Se ha seleccionado a este grupo de personas, ya que van a tener un uso directo del carro en las actividades de instrucción y adiestramiento, y que a la vez tienen una experiencia considerable en lo que respecta a las necesidades del carro.

El análisis de las alternativas se ha realizado mediante el mismo formato y proceso, que en el caso de los criterios y subcriterios. En este caso, el encuestado tenía que decidir para cada subcriterio que alternativa era la más favorable. Cabe destacar, que al haber realizado el cuestionario a una población mayor existe una mayor variabilidad en las respuestas. En las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos:

#### CRITERIO EFICIENCIA.

Tabla 5. Frecuencias y valores medios resultantes para el criterio Eficiencia. Fuente: Elaboración propia

¿Qué sistema de refrigeración sería mejor en lo relativo a la TEMPERATURA OBJETIVO?										
A	Colocar una sola X por fila, en función de la mejor alternativa									B
Sistema MKK12		3	3	1				2	1	Programa integral de refrigeración.
Programa integral de refrigeración.	3	2	3		1	1				Barracuda HTR
Barracuda HTR							5	4	1	Sistema MKK12
¿Qué sistema de refrigeración sería mejor en lo relativo a CONSUMO DE ENERGÍA?										
A	Colocar una sola X por fila, en función de la mejor alternativa									B
Sistema MKK12						2	2	6		Programa integral de refrigeración.
Programa integral de refrigeración.				2	6	2				Barracuda HTR
Barracuda HTR	9	1								Sistema MKK12
¿Qué sistema de refrigeración sería mejor en lo relativo a CONDICIONES AMBIENTALES?										
A	Colocar una sola X por fila, en función de la mejor alternativa									B
Sistema MKK12		3	5	2						Programa integral de refrigeración.
Programa integral de refrigeración.			3	6	1					Barracuda HTR
Barracuda HTR						4	4	2		Sistema MKK12



**CRITERIO COSTES Y ASPECTOS LOGÍSTICOS.**

*Tabla 6. Frecuencias y valores medios resultantes para el criterio Costes y Aspectos Logísticos.  
Fuente: Elaboración propia*

¿Qué sistema de refrigeración sería mejor en lo relativo a COSTE DE ADQUISICIÓN?										
A	Colocar una sola X por fila, en función de la mejor alternativa								B	
Sistema MKK12								1	9	Programa integral de refrigeración.
Programa integral de refrigeración.	1	3	5	1						Barracuda HTR
Barracuda HTR		6	4							Sistema MKK12
¿Qué sistema de refrigeración sería mejor en lo relativo a COSTE DE OPERACIÓN?										
A	Colocar una sola X por fila, en función de la mejor alternativa								B	
Sistema MKK12						3	5	2		Programa integral de refrigeración.
Programa integral de refrigeración.		2	4	0	4					Barracuda HTR
Barracuda HTR		1	2	5	2					Sistema MKK12
¿Qué sistema de refrigeración sería mejor en lo relativo a LA FIABILIDAD/DURABILIDAD?										
A	Colocar una sola X por fila, en función de la mejor alternativa								B	
Sistema MKK12			1	2	5	1	1			Programa integral de refrigeración.
Programa integral de refrigeración.		1	2	5	2					Barracuda HTR
Barracuda HTR					1	2	1	5	1	Sistema MKK12



**CRITERIO ASPECTOS DE LA INSTALACIÓN.**

*Tabla 7. Frecuencias y valores medios resultantes para el criterio Aspectos de la Instalación. Fuente: Elaboración propia*

¿Qué sistema de refrigeración sería mejor en lo relativo a la UBICACIÓN?										
A	Colocar una sola X por fila, en función de la mejor alternativa								B	
Sistema MKK12		1	2	1	3			3		Programa integral de refrigeración.
Programa integral de refrigeración.				1	5	2		2		Barracuda HTR
Barracuda HTR		1	3	4	2					Sistema MKK12
¿Qué sistema de refrigeración sería mejor en lo relativo a TAREAS DE MECANIZADO?										
A	Colocar una sola X por fila, en función de la mejor alternativa								B	
Sistema MKK12						4	4	2		Programa integral de refrigeración.
Programa integral de refrigeración.			1	2	7					Barracuda HTR
Barracuda HTR	9	1								Sistema MKK12
¿Qué sistema de refrigeración sería mejor en lo relativo a la HABITABILIDAD?										
A	Colocar una sola X por fila, en función de la mejor alternativa								B	
Sistema MKK12			1	2	5	1	1			Programa integral de refrigeración.
Programa integral de refrigeración.		1	2	4	2	1				Barracuda HTR
Barracuda HTR			2	1	1	0	4	1	1	Sistema MKK12

Tras obtener las respuestas de los expertos, se han calculado los valores medios, que posteriormente han sido introducidos en el programa anteriormente mencionado. Mediante el programa se calcularon los pesos de cada alternativa en base a cada subcriterio, así como las razones de inconsistencia.

En la siguiente imagen (ver figura 15), podemos comprobar el peso de cada alternativa.

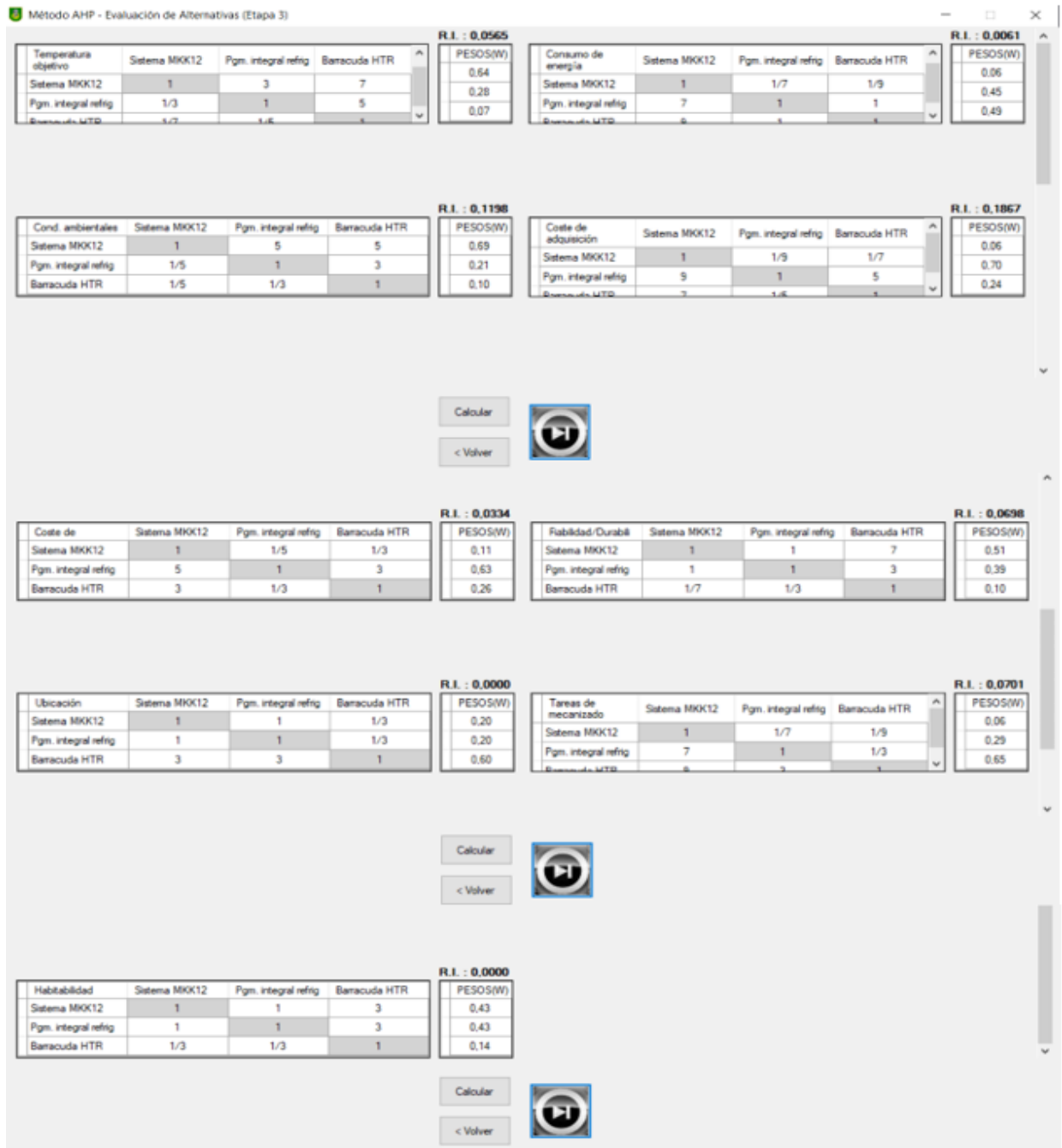


Figura 15. Resultado de la Evaluación de las Alternativas. Pesos extraídos para cada alternativa aplicando cada subcriterio. Fuente: Elaboración propia



## 6.4 Cuarta etapa: jerarquización de las alternativas.

En la siguiente imagen (ver figura 16) se puede observar que el sistema de refrigeración elegido mediante esta metodología es el Programa integral de refrigeración y ventilación del Leopardo 2E. En según lugar, se encontraría el Sistema MKK12 y finalmente el Barracuda HTR.

Analizando los resultados finales obtenidos, podemos identificar que el criterio Eficiencia tiene el mayor peso en la decisión. Para este criterio la opción más favorable es el Sistema MKK12, aunque no por mucha más puntuación que el Programa integral de refrigeración. Por otra parte, en base al criterio Aspectos de la instalación se obtiene que la mejor alternativa resulta ser el Barracuda HTR, aunque este hecho no resulta decisivo en gran medida por el poco peso en la ponderación que tiene el criterio. Por ello, al enfrentar el Programa Integral de refrigeración y el sistema MKK12, en función del criterio de Costes y aspectos logísticos, el Programa integral de refrigeración es bastante más barato, y por tanto este resulta ser la mejor alternativa.

La decisión final resulta ser coherente, ya que como se explicó anteriormente en el desarrollo, el Programa Integral de refrigeración se puede adquirir e instalar a un bajo coste, además de cumplir uno estándares suficientes, en cuanto a la refrigeración de los componentes electrónicos.

A pesar de obtener como mejor alternativa el Programa Integral de refrigeración, el MKK12 también podría ser una solución para acabar con los problemas electrónicos del CC. Debido a que, basándonos en el criterio de Eficiencia, la puntuación obtenida para el MKK12 es mayor que la del Programa Integral de refrigeración. El factor limitante de esta opción, reside en la cuantía económica que debería de afrontar el Ministerio de Defensa para su adquisición.

En cambio, el Barracuda HTR muestra ser un sistema incapaz de cumplir los objetivos propuestos, y obtiene una puntuación considerablemente baja en los criterios de Eficiencia y Costes y aspectos logísticos. Por lo tanto, a diferencia del MKK12, esta alternativa no podría considerarse como una solución viable para el CC Leopardo 2E.

Método AHP - Jerarquización de Alternativas (Etapa 4)

MATRIZ DE DECISIÓN				
CRITERIOS / SUBCRITERIOS	PESOS	Sistema MKK12	Pgm. integral refrig	Barracuda HTR
<b>Eficiencia</b>	<b>0.61</b>	<b>0.47</b>	<b>0.33</b>	<b>0.20</b>
+ Temperatura objetivo	0.61	0.64	0.28	0.07
+ Consumo de energía	0.30	0.06	0.45	0.49
+ Cond. ambientales	0.09	0.69	0.21	0.10
<b>Costes logísticos</b>	<b>0.30</b>	<b>0.17</b>	<b>0.62</b>	<b>0.21</b>
+ Coste de adquisición	0.67	0.06	0.70	0.24
+ Coste de operación	0.09	0.11	0.63	0.26
+ Fiabilidad/Durabili	0.24	0.51	0.39	0.10
<b>Aspectos instalación</b>	<b>0.09</b>	<b>0.22</b>	<b>0.26</b>	<b>0.52</b>
+ Ubicación	0.60	0.20	0.20	0.60
+ Tareas de mecanizado	0.20	0.06	0.29	0.65
+ Habitabilidad	0.20	0.43	0.43	0.14
		<b>0.36</b>	<b>0.41</b>	<b>0.23</b>

Figura 16. Matriz de decisión. Fuente: Elaboración propia



## 7 CONCLUSIONES

Con este proyecto queda justificada la necesidad de adquirir e instalar un sistema de refrigeración que principalmente sea capaz de enfriar la electrónica de la torre del carro de combate Leopard 2E, y que, de manera adicional, mejore las condiciones climáticas en los diferentes puestos tácticos del carro.

En este trabajo se ha realizado un estudio preliminar tanto del sistema eléctrico de la torre como del sistema de refrigeración, para detectar las vulnerabilidades de los sistemas en cuestión y los efectos que desencadena su incorrecto funcionamiento. Seguidamente, se procedió a la búsqueda de información de sistemas de refrigeración compatibles con el Leopard 2E. Para ello, se realizaron entrevistas a personal de la unidad con una considerable experiencia y paralelamente en la misma línea temporal, se procedió al desarrollo de los sistemas propuestos, exponiendo sus principales ventajas e inconvenientes.

Con dicho estudio preliminar, se constata el problema del CC en climas áridos y semiáridos españoles, ya que este no tiene la capacidad de funcionar adecuadamente bajo los efectos de las altas temperaturas.

Tras llevar a cabo el desarrollo del proyecto y contactar con el personal de la unidad, el Programa Integral de refrigeración se convierte en una alternativa con gran probabilidad de ser la elegida. Esto se debe, a que se trata de un sistema eficiente, debido a que con un pequeño consumo energético es capaz de refrigerar lo suficiente los componentes electrónicos del CC. Además, tiene un coste de adquisición e implementación que podría afrontar el Ministerio de Defensa sin ningún problema a priori.

Posteriormente, se realizó una criba en base a la opinión del personal del escalón de mantenimiento, en la cual se descartaron dos de los sistemas desarrollados, el sistema de refrigeración líquida y el TMS. A continuación, mediante un método de análisis multicriterio basado en el conocimiento y la experiencia del personal del BICC, se ejecutó la comparación entre el Programa Integral de refrigeración, el sistema MKK12 y el Barracuda HTR. Se obtuvo como resultado, que el sistema más idóneo para el CC sería el Programa Integral de refrigeración.

Cabe destacar, que el sistema MKK12 a pesar de no ser el elegido, presenta unas capacidades que podrían cumplir con el objetivo de refrigerar la electrónica del CC. Es decir, podría ser una solución alternativa al problema expuesto en el trabajo.

En cuanto a líneas futuras, se recomienda realizar una evaluación del sistema en condiciones reales, especialmente en regiones de clima árido y semiárido. Poner a prueba el funcionamiento del sistema, su eficiencia y la detección de errores potenciales derivados de su empleo a elevadas temperaturas, es fundamental para la implementación de mejoras adecuadas en el sistema de refrigeración del Leopard 2E. Además, para poder llevar a cabo la implementación de este sistema a nivel E.T en todas las unidades acorazadas, es esencial ejecutar un análisis de viabilidad conjunto entre la Dirección de asuntos económicos del E.T y del Departamento de investigación de adquisiciones.

Como conclusión, este estudio parece indicar que el programa integral de refrigeración podría ser una implementación interesante para adoptar por el E.T., con el objetivo de proporcionar una capacidad operativa óptima y eficiente del sistema de refrigeración y del sistema electrónico del carro de combate Leopard 2E.





## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACINF (2016) 'D P T O . T É C N I C A M I L I T A R CÓDIGO : A-213 TÍTULO : MANUAL DIDÁCTICO LEOPARDO 2E'.

Autoflug (2006) 'Microclimatization for Individual Body Cooling'.

Cabrera Coronel, F. A. and Tigre Guncay, E. M. (2016) 'Diseño y construcción de los sistemas de refrigeración de un vehículo formula SAE eléctrico', *Universidad Politécnica Salesiana - Sede Cuenca*, pp. 1–87.

Defense, M. (2020) 'Thermal Management System ( TMS )', 1(949).

Diego de Usera, J. (2018) *Componentes necesarios para una refrigeración líquida de circuito abierto*. Available at: <https://hardzone.es/2018/03/18/componentes-refrigeracion-liquida-circuito-abierto/> (Accessed: 10 October 2021).

KMW (2001) 'MBT Leopard 2 A4 Cooling System MKK3 Temperature Measurements in the Turret Trials in Cordoba , Spain', (July), pp. 1–48.

KMW (2003) 'MKK 12 Demonstration Leopard 2 E', pp. 1–16.

KMW (2006a) 'Climatic investigations MKK12 Leopardo 2E', pp. 1–7.

KMW (2006b) 'MBT Leopard 2E with Crew Compartment Cooling System Heat Balance Calculation Content'.

KMW (2008) 'MBT Leopard 2 E Energy - Calculation MBT Leopard 2 E with MKK12'.

Llamas, L. (2016) *Generar frío con Arduino y una placa Peltier*. Available at: <https://www.luisllamas.es/arduino-peltier/> (Accessed: 12 November 2021).

Mando de Apoyo Logístico, J. (2011) 'Apoyo del Ejército a las demostraciones de materiales en Arabia Saudí', (1808), pp. 1–13.

Mando de Apoyo Logístico, P. L. (2006) 'Pruebas MKK12 Kassel', 87(274).

Navarro García-Gutiérrez, I. (2018) 'Propuesta del Programa integral de refrigeración', (July), pp. 1–23.

Penalva, A. A. (2018) 'Efecto Peltier y Desarrollo de Posibles Aplicaciones', *Universidad Politécnica de Valencia*, (Ingeniería Eléctrica), p. 36. Available at: <http://hdl.handle.net/10251/109025>.

Prots, S. (2021) *El tanque americano 'Abrams M1A2': armas TTX*. Available at: <http://es.nextews.com/65df1484/> (Accessed: 18 October 2021).

RAC Castilla 16, B. M. I. (2019<sup>a</sup>) 'Balance de resultados del Programa integral de refrigeración.', pp. 2–4.

RAC Castilla 16, B. M. I. (2019b) 'Desarrollo del programa integral de refrigeración del Leopardo 2E', pp. 1–4.

RAC Castilla 16, B. M. I. (2019c) 'Instalación del Programa integral de refrigeración', pp. 2–7.

Saab (2021) *CoolCam | Saab*. Available at: <https://www.saab.com/products/coolcam> (Accessed: 15 Octubre 2021).

Ruiz López, Carlos (2019) 'Apuntes de Métodos cuantitativos de ayuda a la decisión', *Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza*.

ABAD, J. (2013) 'Informe Conferencia Internacional Master Gunner', *Rena*.



## 9 ANEXOS

### Anexo I Ficha técnica entrevista.

Se presenta el formulario de la entrevista realizada desde el día 13 de septiembre, en el RAC Castilla 16, Badajoz.

Específicamente este formulario fue completado por 10 cuadros de mando pertenecientes a la 1ª CIA ÁGUILA del BICC Mérida I/16, todos ellos con más de 4 años de experiencia en unidades de carros de combate.

- ¿Considera necesaria la mejora sistema de refrigeración o la implementación de uno nuevo para la electrónica de la torre?
- ¿El actual sistema de refrigeración influye positivamente en las condiciones climáticas de la cámara de combate?
- ¿Cree que el carro Leopardo no está preparado para operar en altas temperaturas?
- ¿Considera que los siguientes problemas citados, están relacionados con el sobrecalentamiento de la torre y la ausencia de un sistema de refrigeración potente?
  1. Tener un número considerable carros inoperativos.
  2. Exposición a la tripulación a una alta temperatura durante el ejercicio de sus funciones en el carro.
  3. Saturación del escalón de mantenimiento.
  4. Gasto considerable en componentes electrónicos.
- ¿Con qué frecuencia ocurren los problemas citados anteriormente?
- ¿Se toma alguna medida para hacer frente a los problemas expuestos?
- ¿Considera que la implementación de un nuevo sistema de refrigeración solucionaría los problemas citados?
- ¿Considera que estos problemas dificultan o imposibilitan en algunos casos la instrucción y adiestramiento de su unidad, así como la participación en ejercicios continuados o maniobras en su defecto?
- ¿Cree que la electrónica de potencia y los componentes del compartimento electrónico son los elementos que más se averían, según su experiencia?
- ¿Considera adecuado y suficiente el sistema de refrigeración de los componentes electrónicos?
- Tomando la escala numérica como si se tratase de porcentajes, indique ¿qué porcentaje de los carros estima usted, que quedan inoperativos debido al sobrecalentamiento de los componentes electrónicos citados anteriormente?



## Anexo II Célula Peltier.

Se trata de un dispositivo electro-térmico que está formado por dos materiales semiconductores dopados, uno de tipo P y otro de tipo N. Esta célula, tiene la capacidad de generar frío a partir del paso de la corriente por su circuito. Funciona como una bomba de calor de estado sólido, en otras palabras, transfiere calor de un foco frío a uno caliente consumiendo energía eléctrica (Penalva, 2018).



Figura 17. Partes de la Célula Peltier. Fuente: Efecto Peltier y desarrollo de posibles aplicaciones.

La refrigeración por medio termoeléctrico utiliza el efecto Peltier, para ello, es necesario tener un circuito cerrado compuesto por dos metales distintos, por los cuáles circula una corriente eléctrica.

Al circular la corriente por el circuito, se produce una concentración distinta de electrones libres entre los metales, que generan dos barreras de potencial distintas en sus extremos. Es decir, la corriente genera una transferencia de calor entre las uniones, debido a que en un extremo hay un exceso de portadores de carga (foco caliente), y en el otro extremo hay una ausencia de portadores de carga (foco frío). Un extremo absorbe calor y el otro cede. La dirección de transferencia de calor entre las uniones depende de la polaridad de la corriente. Por lo tanto, si se invierte el sentido de la corriente, el flujo de energía térmica también lo hará (Llamas, 2016)

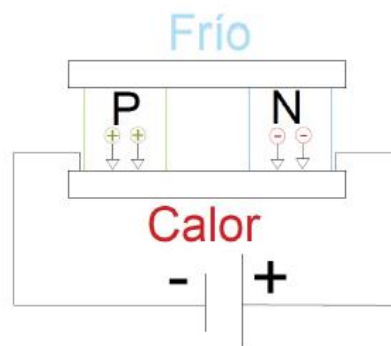


Figura 18. Comportamiento de la Célula Peltier. Fuente: Efecto Peltier y desarrollo de posibles aplicaciones.



## Anexo III Consumo eléctrico Carro de Combate Leopardo 2E.

Energy Calculation MBT Leopard 2 E Electrical Data		Version: 1.0 28.02.2008		
<b>Vehicle:</b>		<b>Electrical Data:</b>		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">MBT Leo2 E / optional CCCS</td> </tr> </table>		MBT Leo2 E / optional CCCS		
MBT Leo2 E / optional CCCS				
Trial	8h silent watch	1 Generator idle		
Name	A. Schmitt / EW211	2 Generator full load		
Date	28.02.2008	3 APU		
		4 Main switch HS = "1"		
		5 Main switch HS = "2"		
		6 Main Engine power loss		
		7 APU/own consumption		
		8 NBC-Ventilation (Mode 1/2)		
		9 NBC-Ventilation (Mode 1)		
		10 Fire suppression system		
		11 Fire extinguishing system		
		12 Heating System		
		13 Heating Fan Turret (Mode 1)		
		14 Heating Fan Driver (Mode 1)		
		15 Interior lights turret		
		16 Interior light driver		
		17 Exterior lights		
		18 Heating plate		
		19 LINCE		
		20 CMDR PERI/WBG		
		21 Night Vision Driver / Rear view		
		22 "BEOBACHTEN"		
		23 EWNA 240°/min (ED25%)		
		24 "STAB EIN"		
		25 WNA-E off road drive		
		26 Smoke Fan		
		27 Radio and intercom		
		28 Fuel pump main		
		29 Cooling fan PE		
		30 Cooling Electronic(ED 50%)		
		31 Chassis assemblies		
		32 CCCS		
		33		
		34		
		35		
		36		
		37		
		38		
		39		
		40		

Figura 19. Consumo eléctrico del CC Leopardo 2E. Fuente: MBT Leopard 2E Energy - Calculation MBT Leopard 2E with MKK12



## Anexo IV Instalación del Programa integral de refrigeración.

A continuación, se muestran imágenes de los cuatro subsistemas instalados en el CC Leopardo 2E, que configuran el Programa Integral de Refrigeración. Estos sistemas son:

1. Sistema NBQ M-60.



*Figura 20. Sistema NBQ M-60 instalado en el Leopardo 2E. Fuente: Instalación del Programa Integral de refrigeración*



*Figura 21. Conexión eléctrica tipo toma de mechero. Fuente: Instalación del Programa Integral de refrigeración*



2. Ventilador de la EWNA con polaridad invertida.

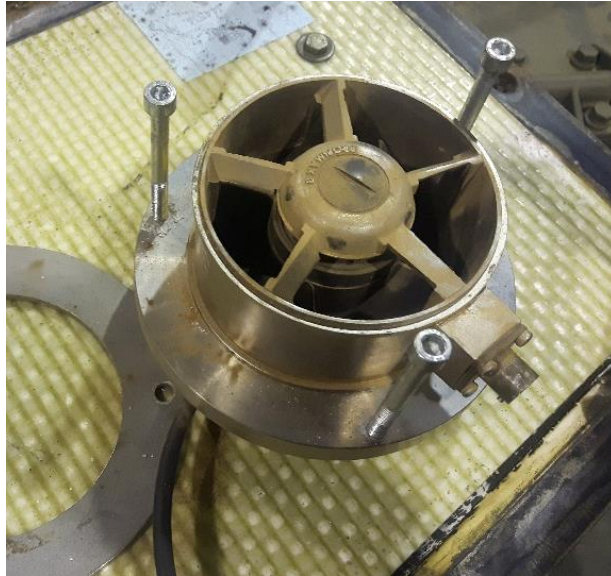


Figura 22. Ventilador de la EWNA. Fuente: Elaboración propia.

3. Refrigeración por medio de la corriente de admisión del motor.

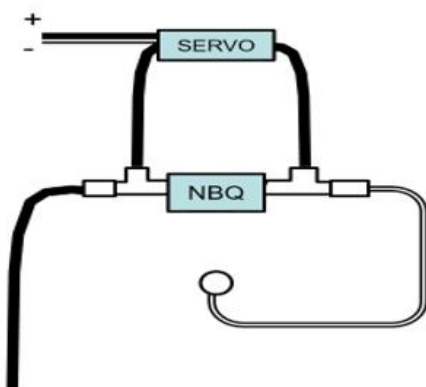


Figura 23. Esquema del puenteo de la llave de descontaminación NBQ, con la servoválvula conectada al sistema contraincendios. Fuente: Instalación del Programa Integral de refrigeración



Figura 24. Latiguillos, codos en "T", llave y servoválvula para el puente de la llave de descontaminación NBQ del CC Leopardo 2E. Fuente: Instalación del Programa Integral de refrigeración

#### 4. Refrigerador casero al conjunto NBQ del carro.



Figura 25. Compartimento del Sistema NBQ del CC Leopardo 2E, equipado o no con el refrigerador casero.