

Trabajo Fin de Grado

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DETECTORES INFRARROJOS FOCAL PLANE ARRAY (FPA) NO REFRIGERADOS. POSIBLES IMPLEMENTACIONES EN LOS SISTEMAS DE GUIADO ACTUALES

Francisco Gabriel Navarro Redondo

Director académico: Silvia Vicente Oliva

Director militar: Raquel Rodríguez Taisma

Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar

2022



Agradecimientos

Quisiera agradecer, en primer lugar, a mi mujer Ester y a mis hijos Pablo y Ana María el gran esfuerzo que supone los constantes cambios de destino y la confianza que han puesto en mí, a pesar de los últimos años en la Academia General Militar.

A mis padres y mis hermanos les agradezco el enseñarme los valores militares y demostrarme que no existe ningún muro tan alto que no pueda treparse y que, aun encontrándome a muchos kilómetros, han sabido transmitirme todos los conocimientos necesarios para haber conseguido llegar tan lejos.

A mi tutora académica Dra. Silvia Vicente Oliva por su ayuda y paciencia. Ha sido una gran guía para mí y gracias a su profesionalidad y dedicación he podido superar retos como este TFG.

A mi tutora militar la Capitán Dña. Raquel Rodríguez Taisma que consiguió hacerme sentir como uno más en la Unidad y que gracias a ella surgieron los primeros cimientos de este TFG. A los suboficiales de la Batería Mistral del GACA X con los que pasé más tiempo durante mis prácticas, les agradezco su apoyo y gran disposición a la hora de la realización de este trabajo.

Por ultimo y no por ello menos importante me gustaría dar las gracias al General Gómez Pardo y al teniente coronel Sánchez García por enseñarme las instalaciones del INTA que me aportaron suficiente información para la realización de este TFG. También a los científicos José Díaz, Javier Muñoz y Mario Álvarez por proporcionarme información de manera desinteresada para poder realizar las investigaciones para el estudio de las nuevas capacidades Misilísticas.

A todos vosotros que me habéis ayudado. Muchas gracias.



RESUMEN

Los sistemas de detección térmicos basados en la tecnología de matriz de plano focal (FPA) no refrigerada aumentan las capacidades tácticas en los misiles Mistral y solventan algunas fallas, como la limitación de tiempo en la adquisición de objetivos provocada por la necesidad de refrigeración constante del sensor térmico durante el enganche, así como el vuelo del misil. El estudio de los diferentes misiles Mistral usados por el ejército español hasta la actualidad y la modernización en los sensores térmicos ha proporcionado una visión de las características que se necesitaban evolucionar.

En el trabajo de fin de grado se plantea un nuevo tipo de sistema que pueda soportar altas temperaturas sin necesidad de refrigeración y que sea capaz de mantener sus capacidades al máximo. Los microbolómetros son un tipo de bolómetro que se usa como detector en cámaras térmicas que tiene las cualidades que se buscan; y, para comprobar si son viables, se han realizado comparaciones con otros tipos de sistemas y elementos para poder discernir cual conviene como sustituto a los sistemas de detección actuales.

Mediante la visita y entrevistas realizadas en las instalaciones del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) se comprueba que los bolómetros que se busca implementar en las nuevas FPA no refrigeradas son, actualmente, la mejor opción si se quiere eliminar la necesidad de frío en el sistema. Con vistas a futuro, es necesario complementar al ejército no solo de nuevo material que esté a la vanguardia de la tecnología, sino también adquirir productos con los que aumenten sus capacidades. La tecnología basada en los microespejos proporcionaría al INTA un salto cualitativo a la hora del estudio de nuevos materiales que, a su vez, proporcionarían capacidades futuras en el entorno 2035.

Tras el estudio de las ventajas y desventajas del nuevo sistema FPA no refrigerado se constatado que es viable su implementación en los misiles Mistral.

PALABRAS CLAVE

Matriz plano focal, detector IR, microbolómetro



ABSTRACT

Thermal detection systems based on uncooled Focal Plane Array (FPA) increases technology tactical capabilities in Mistral missiles and addresses some shortcomings, such as limited target acquisition time caused by the need for constant sensor cooling during missile lock-on and flight. The study of the different Mistral missiles used by the Spanish army up to the present and the modernization of the thermal sensors has provided a vision of the features that need to evolve.

In this final degree project, a new type of system is proposed that can withstand high temperatures without need for cooling, which can maintain its capability to the maximum. Microbolometers are a type of bolometer that are used as a detector in thermal cameras and has the required qualities. In order to check if they are viable, some comparisons have been made with other systems and elements in order to discern which one is the most suitable as a replacement for the current detection method.

Through research in action undertaken at the National Institute of Aerospace Technology (INTA), the bolometers desired for implementing in the new uncooled FPA was verified as the best current option in order to eliminate the need for cold in the system. All considered issues show that it is necessary to provide the army not only with new material that is at the forefront of technological development, but also to acquire, devices that improve the capabilities of field-testing units. Micromirror-based technology will provide INTA with a sub tactical leap when it comes to studying new materials.

After the study of the advantages and disadvantages of the new non-cooled FPA system, it was found that its implementation in Mistral missile is viable to ensure its rapid deployment among air defense units.

KEYWORDS

Focal plane array, IR detector, microbolometer



INDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN.....	II
ABSTRACT	III
INDICE DE CONTENIDO	IV
INDICE DE FIGURAS.....	VI
INDICE DE TABLAS	VIII
INDICE DE GRÁFICAS	IX
ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS	X
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS Y METODOLOGIA.....	3
2.1. Objetivos y alcance	3
2.2. Metodología	3
2.2.1. Recopilación de información	4
2.2.2. Estudio de la evolución del sistema mistral.....	4
2.2.3. Diseño y análisis estadístico mediante encuestas	4
2.2.4. Visita a las Instalaciones del INTA “La marañosa”	8
2.2.5. Recopilación y estudios de patentes	9
2.2.6. Entrevistas con personal del INTA y del GACA X.....	10
2.2.7. Análisis de la disponibilidad tecnológica de los FPA.....	11
3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO.....	11
3.1. Estado de la técnica de los detectores infrarrojos.....	12
3.2. Misil mistral	13
3.2.1. Evolución de los sistemas de guiado del misil Mistral.....	14
3.2.2. Composición Misil Mistral:	20
4. DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS	24
4.1. Análisis comparativo sensores	24
4.2. Valoración inicial	25
4.3. Comparación seeker FPA refrigerada y no refrigerada	25
4.4. Análisis de patentes	26
4.5. Análisis de encuesta	27
4.6. Ventajas y desventajas FPA no refrigerado	29
4.7. Otras tecnologías afines consideradas: microespejos	31



5. CONCLUSIONES	33
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34
ANEXOS	36
Anexo I: Encuesta.	36
Anexo II: Resultados de la encuesta.....	43
Anexo III: Patentes	49
Anexo IV: Guion entrevista.....	50



INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Helicóptero KA-52 Alligator derribado. Fuente: Periódico digital americatevepr.com	1
Figura 2 ucraniano instruyéndose con un Misil Mistral. Fuente: Periódico digital gagadget.com	2
Figura 3 Gráfica escala del personal encuestado. Elaboración Propia. Encuesta questionpro.com	5
Figura 4 Instalaciones INTA La marañosa. Fuente: Flickr, Cuenta Ministerio de Defensa	8
Figura 5 Patente "Método y sistema para determinar la tasa de no uniformidad de sistemas a base de bolómetro". Fuente: WIPO	9
Figura 6 Patente "Sensores infrarrojos con microbolómetros". Fuente: WIPO	9
Figura 7 Patente "Conjunto de fotodetectores y método de fabricación del mismo". Fuente: WIPO	10
Figura 8 Misil AIM-9X Sidewinder en pruebas. Fuente: Propia	10
Figura 9 Misil AIM-9M Sidewinder en pruebas. Fuente: Propia.....	11
Figura 10 Seguimiento de una aeronave con Mistral. Fuente: Elaboración Propia.....	13
Figura 11 Misil Redeye. Fuente: wikiwand.com	14
Figura 12 Misil SA-7 Strela-2. Fuente: aquellasarmasdeguerra.wordpress.com	15
Figura 13 Retículo Chopper de escaneo IR. Fuente: Curso combate AAA-IR	15
Figura 14 Misil Stinger. Fuente: Marca.com	16
Figura 15 Misil SA-16 Igla. Fuente: falcon-lounge.com	16
Figura 16 Conjunto giroscópico. Fuente: ACART EMIES. Elaboración propia.	17
Figura 17 Detectores lineales fotovoltaicos en InSb. Fuente: ACART EMIES. Elaboración propia.	17
Figura 18 (a) Roseta, (b) Pseudoimágenes. Fuente: Artículo de SPIE	17
Figura 19 Recorrido radiación IR dentro de seeker. Fuente: Artículo de SPIE.	18
Figura 20 Misil SA-24 Grinch. Fuente: kyivindependent.com	18
Figura 21 Detector FPA. Fuente: Curso impartido por Applied Technology Institute. Elaboración propia.....	19
Figura 22 Proceso de entrada de los fotones hasta crear una imagen. Fuente: Curso impartido por Applied Technology Institute.	19



Figura 23 Misil Mistral 3. Fuente: MBDA.....	20
Figura 24 Conjunto y subconjuntos Misil Mistral. Fuente: MBDA	21
Figura 25 Domo IR. Fuente: MBDA.	22
Figura 26 CPR. Fuente: presentación Mistral EMIES.....	22
Figura 27 Dispositivo Opto-mecánico. Fuente: PCMASACOM.	23
Figura 28 Interior Seeker. Fuente: MBDA. Elaboración propia.....	23
Figura 29 Imagen microscópica y esquema de un microespejo. Fuente: Single photon detector image reconstruction object Richard Baraniuk. Elaboración propia.	31
Figura 30 Proceso creacion imagen IR. Fuente: single photon detector image reconstruction object Richard Baraniuk. Elaboración propia.	32
Figura 31 Encuesta sobre grupo. Elaboración propia.....	36
Figura 32 Introducción encuesta. Elaboración propia.....	36
Figura 33 Encuesta años trabajados o de servicio. Elaboración propia	37
Figura 34 Encuesta pregunta 1. Elaboración propia.....	37
Figura 35 Encuesta pregunta 2. Elaboración propia.....	38
Figura 36 Encuesta pregunta 3. Elaboración propia.....	38
Figura 37 Encuesta pregunta 4. Elaboración propia.....	39
Figura 38 Encuesta pregunta 5. Elaboración propia.....	39
Figura 39 Encuesta pregunta 6. Elaboración propia.....	40
Figura 40 Encuesta pregunta 7. Elaboración propia.....	40
Figura 41 Encuesta pregunta 8. Elaboración propia.....	41
Figura 42 Encuesta pregunta 9. Elaboración propia.....	41
Figura 43 Encuesta pregunta 10. Elaboración propia.....	42



INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ficha técnica para la encuesta. Elaboración propia.	6
Tabla 2 Ponderación según escala o puesto de trabajo. Elaboración propia.....	7
Tabla 3 Ponderación según años de servicio. Elaboración propia.	7
Tabla 4 Coeficientes finales según los criterios. Elaboración propia.	8
Tabla 5 Comparación misiles Mistral según modelo. Elaboración propia.	14
Tabla 6 Enumeración partes misil Mistral 3. Elaboración Propia.....	20
Tabla 7 Comparativa de los sistemas de última generación. Elaboración propia.	24
Tabla 8 Media de años de servicio. Elaboración propia.	27
Tabla 9 Ventajas y desventajas FPA no refrigerado. Elaboración propia.	30
Tabla 10 Resultados encuesta oficiales. Elaboración propia.	43
Tabla 11 Resultados encuesta suboficiales. Elaboración propia.....	43
Tabla 12 Resultados encuesta personal civil INTA. Elaboración propia.	43
Tabla 13 Resultados encuesta personal tropa y marinería. Elaboración propia.	44



INDICE DE GRÁFICAS

Gráfico 1 Resultados encuesta. Elaboración propia.	28
Gráfico 2 Valoración general de la encuesta con ponderaciones. Elaboración propia.	29
Gráfico 3 Grafica araña capacidades técnicas DAA. Elaboración propia.	45
Gráfico 4 Gráfica araña necesidad de refrigeración. Elaboración propia.	45
Gráfico 5 Gráfica araña beneficios FPA no refrigerado. Elaboración propia.	46
Gráfico 6 Gráfica araña abaratamiento por seeker no refrigerado. Elaboración propia.	46
Gráfico 7 Gráfica araña posibilidad de empleo de ahorros en mejoras. Elaboración propia.	47
Gráfico 8 Gráfica araña preguntas 6 y 7. Elaboración propia.	47
Gráfico 9 Gráfica araña preguntas 8,9 y 10. Elaboración propia.	48



ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AAA	Artillería antiaérea
AGC	Automatic gain control
CCMIR	Anti-contramedidas
CPR	Conjunto pila refrigerador
CUMA	Cuadro de mandos
DA	Defensa aérea
DAA	Defensa antiaérea
DPL	Sistema de procesamiento de luz digital
EE. UU.	Estados Unidos
EMC	Compatibilidad electromagnética
EMIES	Enseñanza militar para el ingreso a la escala de suboficiales
ET	Ejército de tierra
FAS	Fuerzas armadas
FPA	Matriz de plano focal
FPS	Fotogramas por minuto
GaAs	Arseniuro de galio
HgCdTe	Mercurio cadmio telurio
I+D	Investigación y desarrollo
I+D+	Investigación, desarrollo e innovación
INTA	Instituto nacional de tecnología aeroespacial
IR	Infrarrojo
MANPADS	Sistema de defensa aérea portátil
MAPS	Sistema proyector de matriz de microespejos
MEMS	Sistema microelectromecánico
MPTM	Militar profesional de tropa y marinería
MWIR	Onda media
OSC	Optical Science Corporation
OPI	Organismo Autónomo de Investigación
PbS	Sulfuro de plomo
PCMASACOM	Parque y centro de mantenimiento de sistemas antiaéreos, costas y misiles
PWM	Modulación por ancho de pulsos
QDIP	Detector de punto cuántico de doble capa



QWIP	Fotodetectores infrarrojos de pozos cuánticos
RMTS	Relación marginal técnica de sustitución
SRAM	Celda de memoria subyacente
SWIR	Onda corta
TCR	Coeficiente resistencia a la temperatura
TFG	Trabajo Fin de Grado
TRL	Nivel de preparación tecnológica
VSWR	Voltage Standing Wave Radio
UAS	Vehículo aéreo no tripulado
UV	Ultravioleta
WIPO	World intellectual Property organization



1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha podido percibir una gran inestabilidad global debido a la situación cambiante en los diversos escenarios bélicos.

Las Fuerzas Armadas (FAS) están desempeñadas en diferentes escenarios y requieren estar equipadas de la mejor forma posible, pero debido a la situación económica actual algunos materiales necesitan una renovación y una actualización para poder afrontar los diferentes retos con todas las garantías; por tanto, es necesario innovar dentro de las posibilidades técnicas y presupuestarias las capacidades armamentísticas.

Actualmente la guerra que se está produciendo en el territorio ucraniano tiene como pilar fundamental la Defensa Aérea (DA) (Juanjo Fernández, 2022). La DA de un país contribuye, en gran parte, a la defensa de este y su objetivo es tener vigilado el espacio aéreo. Esto se debe al gran número de aeronaves y vehículos aéreos no tripulados (UAS) utilizados en el teatro de operaciones. (Ver Figura 1)

Dentro de la DA, destacamos el uso de cañones antiaéreos y misiles por parte de la Artillería Antiaérea (AAA) (PD3-311, pp. 1–2) . Actualmente las FAS disponen de diferentes medios para poder combatir las amenazas, si se busca una gran altitud o alcance se dispone de los sistemas de misiles Patriot y Hawk. Otros sistemas en uso por el Ejército de Tierra español que proporcionan protección a baja cota, con alcances menores y capaces de hacer frente a aeronaves de ala fija o rotatoria y UAS son los sistemas de armas Mistral y Cañón 35/90 (PD3-311, pp. 3–5).



Figura 1 Helicóptero KA-52 Alligator derribado. Fuente: Periódico digital americatevepr.com

El Sistema de misiles Mistral destaca por su alta capacidad de despliegue y flexibilidad a la hora de emplearlo (Ver Figura 2). Una de las zonas más importantes de este sistema está conformado por el detector térmico que con el paso de los años ha ido evolucionando hasta el actual Mistral III de 4ª generación, el cual posee un sistema basado en una matriz de plano focal,



conocido por sus siglas en inglés (FPA) (Focal Plane Array) refrigerado¹.

Actualmente se está investigando la futura 5ª generación de este sistema, de carácter multiespectral, mientras que, al mismo tiempo, existe otra vertiente que tiende a investigar en la creación de un sistema FPA no refrigerado.

El presente trabajo tratará de esclarecer las ventajas, desventajas y la posible implementación de un FPA no refrigerado en los sistemas Mistral que se encuentran actualmente en las FAS. Se ha centrado el estudio de viabilidad en el Mistral, ya que con la implementación del nuevo *Seeker*² podría obtenerse un aumento de las prestaciones. Para ello, es necesario conocer la infraestructura del sistema de armas además de sus capacidades para poder así comprobar a posteriori los beneficios de la implementación de un FPA no refrigerado.



Figura 2 ucraniano instruyéndose con un Misil Mistral. Fuente: Periódico digital gagadget.com

Los sistemas de defensa aérea portátil (MANPADS) (*man-portable air-defense system*) es un arma muy eficaz y extendida por el mundo. Por ejemplo, una gran cantidad de derribos de aeronaves de los Estados Unidos de América (EE. UU) durante la Tormenta del Desierto fueron producidos por este tipo de sistema de armas (José Iserte Bou, 2022).

Una de las capacidades más importantes es su elevada velocidad que, junto a la espoleta de proximidad y a la poca capacidad de reacción por parte de la aeronave, hace posible que sea una de las armas tácticas de mayor uso militar dentro de un conflicto bélico en el ámbito de la DA.

El gobierno de los Estados Unidos en 2004 estimó que había más de 500.000 MANPADS todavía en circulación y que la mayoría de ellos se encontraban en posesión de grupos armados radicales. Esto se debe a su bajo precio, llegando a poder obtenerse los sistemas más sofisticados por miles dólares en el mercado negro (Alexandra Schmitt, 2013). Desde entonces la oficina asuntos Políticos-Militares del departamento de Estados Unidos (EE. UU.) informó de la destrucción de más de 40.000 MANPADS que procedían de antiguos países adheridos al

¹ Consiste en una matriz de píxeles que al detectar la radiación incidente crea una imagen del objetivo.

² Seeker o buscador es el componente que se implementa a los sistemas de guiado para detectar la fuente de radiación IR. Está compuesto por dos lentes opto-mecánicas, 2 prismas y un detector térmico.



Pacto de Varsovia (José Iserte Bou, 2022), la labor fue acaecida por equipos multinacionales. Como ejemplo, más de 5000 MANPADS localizados provenían del régimen de Gadafi, aunque varios informes de inteligencia americana informaban de la posible posesión de más de 20.000, aunque la mayoría de ellos estarían en paradero desconocido.

2. OBJETIVOS Y METODOLOGIA

2.1. Objetivos y alcance

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado (TFG) es poder determinar la viabilidad de una posible implementación del sistema FPA no refrigerado en el sistema Mistral. El TFG busca que, con la información obtenida y los análisis realizados, se pueda mejorar los sistemas de guiados actuales. Para ello se ha necesitado acceder a diferentes recursos de los que dispone el Grupo de Artillería X y a las Instalaciones de “La Marañososa” - en el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)-, para centrarse en la investigación exclusivamente sobre los misiles Mistral, debido a que están en dotación. El alcance del proyecto se centra en la implementación de este detector en este sistema de misiles por ser el único que necesita esta tecnología para alcanzar al objetivo.

Asimismo, de manera complementaria al objetivo principal, se han marcado dos objetivos más de carácter específico, aunque se mantienen en la misma línea de investigación o con visión de mejora futura de la tecnología para facilitar los estudios de los nuevos sistemas. Fundamentalmente estos son:

- Como objetivo secundario de este proyecto se ha propuesto conocer los diferentes detectores térmicos que se han estado usando en el sistema de misiles Mistral desde sus inicios hasta la actualidad, de tal forma que se puedan comparar las ventajas e inconvenientes de aplicar o no el nuevo sistema. Por tanto, se analiza el último detector que está basado en una matriz de plano focal (FPA) refrigerada para poder compararlo con una nueva generación FPA no refrigerada.
- Otro objetivo secundario y con vistas al futuro, consiste en analizar la posible adquisición de la tecnología de micro-espejos para poder facilitar la implementación en las FAS, pudiendo así comparar los diversos comportamientos de los detectores ante determinadas contramedidas. Para su uso es necesario un laboratorio donde sería capaz de crear imágenes infrarrojas (IR) reales dentro de una sala que permite el estudio.

2.2. Metodología

Con el propósito de poder lograr una visión sobre los sistemas de armas actuales y futuros, y desglosando sus capacidades de trabajo de detección IR y con la información proporcionada se discutirá la idoneidad del futuro *seeker* y si sus características tanto tácticas como técnicas benefician al Ejército de Tierra (ET). Para ello se ha seguido un criterio lógico a la hora de que pasos tomar para obtener la diferente información sobre el proyecto. Toda la información se desarrollada en el punto 3 de esta memoria y su posterior análisis en el punto 4.

A continuación, se detalla de manera cronológica los diferentes procesos que se han llevado.



2.2.1. Recopilación de información

La información usada durante todo el proyecto ha sido recabada de diferentes fuentes, de las cuales podemos destacar:

- Manuales sistema del sistema Mistral.
- Publicaciones en revistas del ET.
- Publicaciones libro de sistemas de la empresa MDBA, fabricante del material.
- Páginas web sobre tecnología de microbolómetros y radiación IR en los idiomas inglés y español.
- Fichas de los cursos de Misilística y Optrónica impartidos en la Academia de Artillería (ACART)
- Artículos de investigación publicados en revistas internacionales a través de la Web of Science.

2.2.2. Estudio de la evolución del sistema mistral.

Con el fin de poder vislumbrar la evolución del sistema de guiado, de tal forma que se pueda decidir si es viable su implementación. Se hará hincapié en la comparación entre el seeker implementado en el Mistral 3 de 4ª generación y el seeker FPA no refrigerado. Para ello se observarán los siguientes elementos:

- Calidad de las imágenes térmicas.
- Sensibilidad del sistema y temperaturas en las que trabaja.
- Tasa de refresco según los fotogramas por segundo (FPS).
- Enfoque económico y si es viable para el ET.
- Bandas de trabajo.

2.2.3. Diseño y análisis estadístico mediante encuestas

Dentro de la técnica cuantitativa se ha decidido elaborar una encuesta para poder obtener, de personal de diferentes áreas o escalas dentro del ET, información objetiva sobre las capacidades del nuevo sistema seeker FPA no refrigerado. La información extraída será estudiada mediante métodos estadísticos. Los resultados arrojados de esta encuesta junto a las deducciones alcanzadas permitirán analizar desde un punto de vista analítico el proyecto.

En la investigación mediante el uso de la técnica de encuesta se ha establecido las siguientes etapas(J. Casas Anguita et al., 2002):

- Identificación del tema: Parte de la definición clara del objeto de la investigación, estableciendo así objetivos generales.
- Determinación del diseño de la investigación: Dependiendo del objetivo a alcanzar se decidirá el tipo de estudio.
- Selección de la muestra: se establece sobre que sujetos se va a realizar el estudio. En este caso, se ha decidido usar un muestreo estratificado, en función de los criterios establecidos posteriormente. El número total de la muestra es de 40 individuos clasificados en 4 grupos: personal civil que trabaja en el INTA, Oficiales, Suboficiales y personal de Tropa.

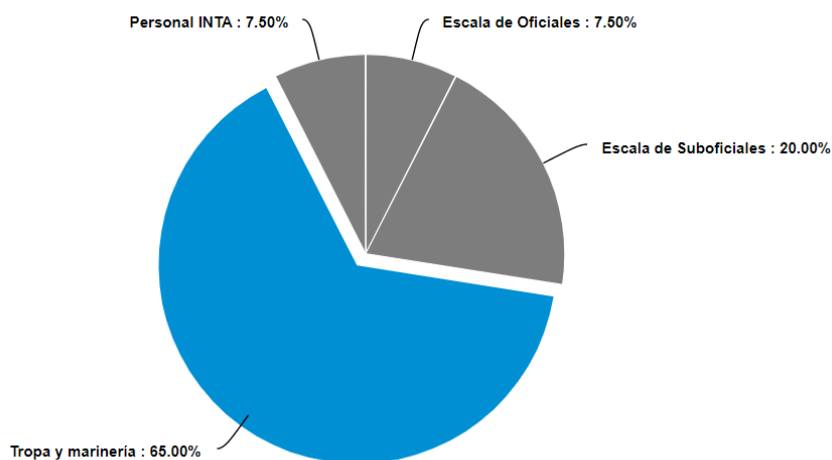


Figura 3 Gráfica escala del personal encuestado. Elaboración Propia. Encuesta questionpro.com

- Diseño del cuestionario: Encuesta con dos preguntas para definir los criterios de ponderación y diez preguntas diseñada en su totalidad mediante escalas de Likert de 1 a 7. Las escalas Likert permiten trasladar información cualitativa en cuantitativa, teniendo en cuenta la subjetividad de las respuestas (Guil Bozal, 2006).
- Obtención y tratamiento de datos: de manera individualizada y presencialmente, asesorando en todo momento para evitar las posibles dudas.

Análisis de los datos y su interpretación mediante Hoja de Cálculo Excel.

La encuesta se trabajó bajo tutorización y asesoramiento de la directora militar y de la directora académica. La encuesta tiene como finalidad plantear preguntas a diferente personal para conocer de una manera más concreta su valoración, de forma que al darle valores a los resultados se logrará un posterior tratamiento de los datos para poder obtener así conclusiones.

En la tabla que encontramos a continuación se incluye la ficha técnica de la encuesta. (Ver Tabla 1).

Objetivo	Obtener valoración sobre los distintos aspectos relativos de la posible implementación de un seeker FPA no refrigerado en el sistema Mistral
Ámbito	GACA X e INTA "La Marañosá"
Tamaño de la muestra	40



Universo representado	Personal civil encargado del Área de Misilística y Optrónica, Oficiales del ET del Arma de Artillería, Suboficiales de Artillería Antiaérea y Tropa de la especialidad fundamental de Artillería Antiaérea
Método de recogida de datos	Encuesta con preguntas cerradas usando escala Likert, supervisada, presencial e individualizada
Tratamiento de datos	Cuantitativo
Fechas de encuestas	03/10/22 - 06/10/22

Tabla 1 Ficha técnica para la encuesta. Elaboración propia.

La encuesta creada consta de 10 preguntas de valoración y 2 de clasificación según su escala o puesto de trabajo y sus años de servicio. Las respuestas valorativas están tabuladas de 1 a 7 según la escala Likert. Se busca la opinión sobre el cambio del *seeker* actual de 4ª generación a uno más moderno que no necesite refrigeración. Los aspectos expuestos valoran también los beneficios o las posibles mejoras que implicaría a raíz de su implementación, ya sea un aumento de alcance, velocidad o alguna otra mejora. La encuesta en su totalidad se encuentra en el Anexo I: Encuesta. Los resultados obtenidos de esta encuesta se encuentran en el Anexo II: Resultados de la encuesta., pero se analizarán en el punto 0 de esta memoria. Gracias a las valoraciones de los encuestados se podrá discernir varios factores de opinión acerca del nuevo *seeker*.

El estudio de la encuesta se centra en el Misil Mistral 3 debido a que es el material que posee las FAS en la actualidad y su evolución implicaría muchísimos beneficios en cuanto a la detección de aeronaves a baja cota.

Para el estudio se han tenido en cuenta algunas valoraciones obtenidas por el personal civil del INTA, destacando los siguientes:

- Capacidad de adaptación táctica de sistema actual.
- La posible integración del nuevo *seeker* en el misil actual.
- Abaratamiento del sistema al ser materiales más económicos.
- Posibles ventajas a la hora de eliminar peso o de sustituir este por otros materiales que mejoren las prestaciones del sistema.

Por otra parte, se ha realizado un proceso de ponderación por convenio³ (Guadalupe Ortiz,

³ Consiste en dar diferentes valores según la persona que ofrece la valoración, por ejemplo, se valora más



2014) Las medias obtenidas vendrán calculadas por el proceso anteriormente comentado. Se busca otorgar distinto valor según los factores que se desarrollan a continuación:

- **Escala o puesto de trabajo:** Este criterio establece que el personal tiene distintos conocimientos de la materia según su puesto de trabajo o según la escala a la que pertenecen (Ver Tabla 2). De esta forma, el personal civil que se encuentra en las instalaciones del INTA son doctores en Ciencias Físicas, Ingenieros, siendo estos los directores de los departamentos de la especialidad. Dentro de la escala podemos diferenciar si los militares evaluados son Cuadros de Mando (CUMA) y si son oficiales o suboficiales ya que el estudio de la especialidad es mayor en ellos que la que se les asigna a un Militar Profesional de Tropa y Marinería (MPTM). Por tanto, los coeficientes de ponderación quedarían de la siguiente forma:

Personal civil INTA	Escala de Oficiales	Escala de Suboficiales	Tropa y Marinería
1	0.8	0.6	0.4

Tabla 2 Ponderación según escala o puesto de trabajo. Elaboración propia.

- **Años de servicio en el puesto de trabajo:** Este criterio es muy importante puesto que cuantos más años se haya trabajado en el sistema más experiencia de habrá adquirido. (Ver Tabla 3). En la partición de los años no se ha realizado en segmentos idénticos, sino que se han ido espaciando según van aumentando los años. Por tanto, la ponderación quedará de la siguiente manera:

> 10 años	8-10 años	6-8 años	4-6 años	2-4 años	1-2 años	< 1 año
1	0.95	0.90	0.85	0.80	0.60	0.5

Tabla 3 Ponderación según años de servicio. Elaboración propia.

A estos valores se debe realizar una ponderación final que establece la conexión entre los dos criterios que se han propuesto, esto se debe a que las respuestas de cada individuo finalmente implican un estudio individualizado y una ponderación aclarada anteriormente. La Tabla representada a continuación establece los coeficientes de ponderación finales a aplicar tras en el tratamiento de los datos y su posterior análisis (Ver Tabla 4).

la opinión ofrecida por el personal civil del INTA que del personal de Tropa ya que se da mayor importancia a ciertos aspectos técnicos.



	PERSONAL CIVIL INTA	ESCALA DE OFICIALES	ESCALA DE SUBOFICIALES	TROPA Y MARINERIA
> 10	1	0,8	0,6	0,4
8 a 10	0,95	0,76	0,57	0,38
6 a 8	0,9	0,72	0,54	0,36
4 a 6	0,85	0,68	0,51	0,34
2 a 4	0,8	0,64	0,48	0,32
1 a 2	0,6	0,48	0,36	0,24
< 1	0,5	0,4	0,3	0,2

Tabla 4 Coeficientes finales según los criterios. Elaboración propia.

2.2.4. Visita a las Instalaciones del INTA “La marañosa”

Por necesidades del TFG se realizó una visita a las instalaciones de La Marañosa que se encuentran en San Martín de la Vega (Ver Figura 4). Este centro era un organismo de Investigación, desarrollo tecnológico e innovación (I+D+I) pero posteriormente fue integrado en el INTA⁴, como Organismo Público de Investigación (OPI). Actualmente es un referente en Investigación y desarrollo (I+D) para Defensa y las FAS. Sus investigaciones se centran en armamento, material y equipo. En estas instalaciones se llevan a cabo evaluaciones y ensayos de las armas y sus municiones además de proyectos de investigación, análisis y simulación.

La información recabada durante el transcurso de la visita a las instalaciones ha sido en forma de entrevistas y/o fotografías de elaboración propia. Por parte del personal civil, se proporcionó documentación útil para el análisis, desarrollado en el punto 4 de esta memoria.



Figura 4 Instalaciones INTA La marañosa. Fuente: Flickr, Cuenta Ministerio de Defensa

⁴ Artículo 2 de la Ley 15/2014, de 16 de septiembre, de racionalización del Sector Público y otras medidas de reforma administrativa.



2.2.5. Recopilación y estudios de patentes

Para poder trabajar sobre los sistemas de detección se ha buscado información sobre las patentes de la tecnología y análisis en el punto 4. Para la búsqueda de patentes se ha recurrido al buscador de la WIPO (World Intellectual Property Organization).

Con objeto del estudio se han utilizado palabras clave, con la finalidad de obtener el mayor número de patentes para su análisis, tanto en inglés, como en español. Esta metodología es útil para analizar la convergencia tecnológica, lo cual puede ayudar a solucionar discusiones alrededor de la hipótesis de si es viable la implementación del sistema FPA no refrigerado (El et al., 2014, p. 61). Para poder ampliar aún más el espectro de búsqueda se ha decidido usar el traductor a español que dispone para poder obtener las patentes que no están en inglés. A continuación, se detalla las diferentes palabras o conjunto de palabras que se han buscado:

- “Rafael Advanced Defense Systems,” “Rafael Defense.”
- Rafael, FPA, “Rafael FPA”.
- “FPA uncolled”, “FPA colled”, “FPA missile”
- “Matriz de plano focal”.
- “Spike LR2 Dual”.
- “MBDA Mistral”, MBDA, Mistral.
- Bolometer, microbolómetro, bolómetro.

Con los datos de la WIPO se han revisado todos los documentos proporcionados en los resultados de la búsqueda: 3 patentes. (Ver Figura 6, Figura 5 y Figura 7) Dos de ellas han sido localizadas tras la búsqueda de “matriz de plano focal” y la última, correspondiente a una empresa de Corea, ha sido localizada tras buscar “Rafael defense” y “FPA missile” En las imágenes que se adjuntan a continuación se pueden apreciar los títulos de las patentes.

8. **2536750** SENSOR DE SEGURIDAD INFRARROJO CON MICROBOLÓMETRO ES - 28.05.2015
 Int.Class G01J 5/22 (2006.01) Appl.No 06752596 Applicant LIDDIARD, KEVIN Inventor Liddiard, Kevin
 An infrared sensor, comprising a focal plane array (FPA) of resistance microbolometer infrared detectors connected in such a manner to produce different pixel formats to meet specific detection requirements. Typically each imaging pixel may be a mosaic comprising a number of sub-pixels connected in parallel [although other configurations are possible], resulting in enhanced performance and ease of manufacture by micro-fabrication methods. The FPA may be integrated with a readout microcircuit on the same substrate so that with appropriate signal processing one is capable of forming an image of the field of view of interest, facilitating target recognition and very low false alarm rate.

Figura 6 Patente “Sensores infrarrojos con microbolómetros”. Fuente: WIPO

7. **2343134** METODO Y SISTEMA PARA DETERMINAR LA TASA DE NO UNIFORMIDAD DE SISTEMAS A BASE DE BOLOMETRO. ES - 23.07.2010
 Int.Class G01J 5/20 (2006.01) Appl.No 06700672 Applicant SEMI CONDUCTOR DEVICES AN ELBI Inventor MIZRAHI UDI
 Un sistema de matriz de plano focal del tipo de bolómetro que tiene medios para determinar la tasa de no uniformidad que incluye: a. una matriz de $i \times j$ detectores de pixeles del tipo de bolómetro para detectar radiación de paisaje; b. una caja que aloja dicha matriz de detectores, teniendo dicha caja una ventana delantera que proporciona exposición al elemento detector de todos los $i \times j$ detectores de pixeles a radiación que entra del paisaje; c. al menos una porción de columna $j + 1$ de detectores ciegos que están blindados al paisaje por una superficie de referencia homogénea; d. circuitería de lectura para leer la indicación de la radiación de paisaje detectada por cada uno de los $i \times j$ detectores de la matriz, y para leer la indicación de la no uniformidad detectada por dichos detectores en columna $[j + 1]$; e. un registro para registrar los valores de radiación leídos de todos los detectores dentro de la columna $[j + 1]$; y f. una unidad de procesamiento para hallar la desviación estándar σ de todos los valores en dicho registro, y para compararla con un umbral predeterminado Q , donde una desviación estándar anterior Q es una indicación de una no uniformidad superior al nivel permitido.

Figura 5 Patente “Método y sistema para determinar la tasa de no uniformidad de sistemas a base de bolómetro”. Fuente: WIPO

1. [1020170066272](#) CONJUNTO DE FOTODETECTORES Y MÉTODO DE FABRICACIÓN DEL MISMO

KR - 14.06.2017

Int.Class [H01L 27/146](#) Appl.No 1020160165398 Applicant 세미-컨덕터 디바이스-엔 엘벳 시스템즈-라파엘 파트너쉽 Inventor KARNI YORAM

Se describe una matriz de fotodetectores con una ventaja notable en comparación con una tecnología existente y un método de fabricación de la misma. La matriz de fotodetectores comprende: una primera estructura semiconductor con una región activa que incluye una pluralidad de fotodetectores activos que forman una región fotosensible; y una segunda estructura semiconductor para formar una pluralidad de píxeles de circuito integrado de lectura activa (RICP) con una parte de contacto eléctrico conectable eléctricamente a una parte de contacto eléctrico de cada fotodetector activo de la primera estructura semiconductor. Las estructuras primera y segunda se fabrican respectivamente según tecnologías de semiconductores primera y segunda [p. ej., material/composición semiconductor diferente] asociadas con coeficientes de expansión térmica (CTE) primero y segundo diferentes entre sí. Se forman una distancia de paso entre las partes de contacto eléctrico del fotodetector activo y una distancia de paso de la parte de contacto eléctrico de cada RICP activo de acuerdo con una diferencia entre el primer y el segundo CTE, de modo que la parte de contacto eléctrico del fotodetector activo y el las partes de contacto eléctrico de cada RICP se superponen entre sí a una temperatura alta a la que se realiza la combinación eléctrica entre la primera y la segunda estructura semiconductor. En consecuencia, en la matriz de fotodetectores, la primera y la segunda estructuras semiconductoras se ensamblan y se combinan entre sí, por lo que al menos el 99,5 % de las partes de contacto eléctrico del fotodetector activo se superponen sustancialmente a cada parte de contacto eléctrico del RICP relacionado. DERECHOS DE AUTOR KIPO 2017 por lo que la parte de contacto eléctrico del fotodetector activo y la parte de contacto eléctrico de cada RICP se superponen entre sí a una temperatura alta a la que se realiza la combinación eléctrica entre la primera y la segunda estructura semiconductor. En consecuencia, en la matriz de fotodetectores, la primera y la segunda estructuras semiconductoras se ensamblan y se combinan entre sí, por lo que al menos el 99,5 % de las partes de contacto eléctrico del fotodetector activo se superponen sustancialmente a cada parte de contacto eléctrico del RICP relacionado. DERECHOS DE AUTOR KIPO 2017 por lo que la parte de contacto eléctrico del fotodetector activo y la parte de contacto eléctrico de cada RICP se superponen entre sí a una temperatura alta a la que se realiza la combinación eléctrica entre la primera y la segunda estructura semiconductor. En consecuencia, en la matriz de fotodetectores, la primera y la segunda estructuras semiconductoras se ensamblan y se combinan entre sí, por lo que al menos el 99,5 % de las partes de contacto eléctrico del fotodetector activo se superponen sustancialmente a cada parte de contacto eléctrico del RICP relacionado. DERECHOS DE AUTOR KIPO 2017 El 5% de las partes de contacto eléctrico del fotodetector activo se superponen sustancialmente a cada parte de contacto eléctrico del RICP relacionado. DERECHOS DE AUTOR KIPO 2017 El 5% de las partes de contacto eléctrico del fotodetector activo se superponen sustancialmente a cada parte de contacto eléctrico del RICP relacionado. DERECHOS DE AUTOR KIPO 2017

Figura 7 Patente “Conjunto de fotodetectores y método de fabricación del mismo”. Fuente: WIPO

2.2.6. Entrevistas con personal del INTA y del GACA X

La importancia de las entrevistas en el marco de una investigación de este tipo es muy grande (Miguel S. Valles, 2002), por ello durante la visita al INTA se realizó una entrevista al General de Brigada del CIPET⁵ que actualmente es el subdirector General de Sistemas Terrestres del INTA y al teniente coronel perteneciente al Cuerpo de Ingenieros Aeronáuticos del Ejército del Aire, jefe del Departamento de Optoelectrónica⁶ y Misilística en las instalaciones del INTA.

El guion de la entrevista se elaboró en busca de información y para conocer los posibles puntos futuros de la tecnología (Ver Anexo IV: Guion entrevista). Ambas se hicieron al mismo tiempo, lo que permitió discutir las ideas sobre la posibilidad de implementación de los detectores FPA no refrigerados. Toda la información que se recabó de las entrevistas se ha incluido como



Figura 8 Misil AIM-9X Sidewinder en pruebas. Fuente: Propia

5 Cuerpo de Ingenieros Politécnicos del Ejército de Tierra.

6 Estudio de la interacción de la luz con la materia a nanoescala.



soporte que refuta el análisis del punto 4 de la memoria.

Durante la visita se pudo acceder a las explicaciones del personal civil, visita a las instalaciones y pruebas son los *seeker* (Ver Figura 8 y Figura 9). En las imágenes que se muestran a continuación se puede ver diferente material con el que se han realizado las pruebas de detección.

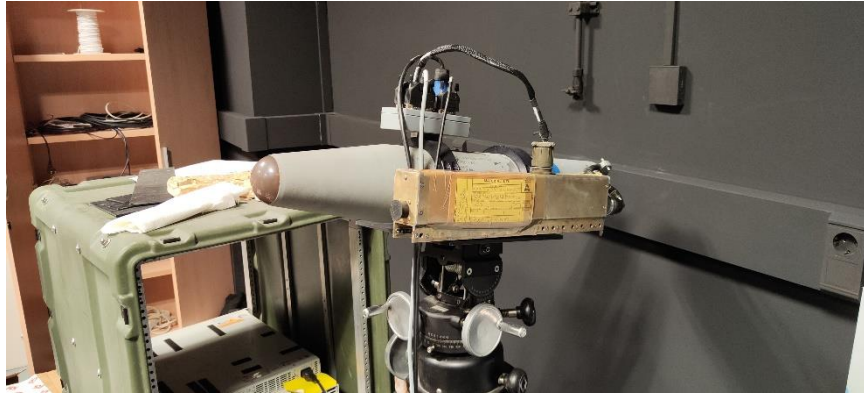


Figura 9 Misil AIM-9M Sidewinder en pruebas. Fuente: Propia

2.2.7. Análisis de la disponibilidad tecnológica de los FPA

La disponibilidad tecnológica, conocida por sus siglas en inglés TRL (Technology Readiness Level), es una escala diseñada para avalar el estado de madurez del producto. (Sausser et al., 2009; Tlapanco Rios & Castaño Urrego, 2022) y se clasifica en los siguientes niveles:

- TRL 1: Aparición de una Idea básica. Mínima disponibilidad.
- TRL 2: El concepto y la tecnología están formulados.
- TRL 3: Prueba de concepto.
- TRL 4: Comprobación y validación de los componentes en un laboratorio.
- TRL 5: Comprobación y validación de los componentes en un entorno relevante.
- TRL 6: Tecnología validada en un entorno relevante.
- TRL 7: Tecnología validada en un entorno real.
- TRL 8: Tecnología validada y certificada en un entorno no real
- TRL 9: Tecnología disponible en entorno real. Disponibilidad máxima.

A partir de esta escala se han clasificado los diferentes tipos de sensores térmicos que existen actualmente en el mercado.

3. ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO



La memoria se centra en el estudio de viabilidad de una Matriz FPA no refrigerada, para ello es necesario conocer el estado de la técnica y cómo se han desarrollado los sensores térmicos, desde sus primeros experimentos, hasta los microbolómetros (Ver 3.1). Dentro del marco teórico se ha desglosado el misil Mistral, por ser el misil que lleva implementado la tecnología, junto a las características técnicas (Ver 3.2), la evolución del misil junto a los *seeker* a lo largo de las diferentes generaciones (Ver 3.2.1) y las diferentes partes que lo componen (Ver 3.2.2).

3.1. Estado de la técnica de los detectores infrarrojos.

La historia de los materiales infrarrojos da comienzo a partir del experimento que realizó Herschel el 11 de febrero de 1800 con un termómetro. En general, Los detectores se han usado para detectar, general imágenes y calcular patrones de radiación térmica que todos los objetos emiten.

En un principio, el desarrollo estaba relacionado con detectores térmicos como los termopares⁷ o los bolómetros, que hoy en día se siguen usando y, estos últimos con parte del estudio del proyecto, que generalmente son sensibles a todas las longitudes de onda y pueden operar a temperatura ambiente.

El segundo tipo de detectores, llamados detectores de fotones, se desarrollaron principalmente durante el siglo XX y buscaban mejorar la sensibilidad y reducir el tiempo de respuesta (Rogalski, 2012). Estos tipos de detectores comenzaron su desarrollo desde la década de 1940. El primer detector IR práctico fue el Sulfuro de Plomo (PbS), el cual tenía una sensibilidad a longitudes de onda infrarrojas de hasta 3 μm .

Después de la Segunda Guerra Mundial, el desarrollo de la tecnología siguió impulsada sobre todo por el ejército y sus posibles aplicaciones militares (Rogalski, 2012). El descubrimiento de la aleación entre el mercurio, cadmio y telurio (HgCdTe) por Lawson en 1959 abrió una nueva área en la tecnología de los detectores IR, la cual nos ha proporcionado una gran libertad en el diseño de nuevos detectores infrarrojos.

Posteriormente, las aplicaciones civiles que usan tecnología infrarroja son frecuentemente llamadas “aplicaciones de doble tecnología”, en la que ofrecen una combinación de ondas Doppler e infrarrojo pasivo como por ejemplo los sensores de movimiento MS15 y MS16 (Southwest Microwave, 2011). Cabe señalar la creciente utilización de estas tecnologías en este sector, así como la notable disminución de precios en estas tecnologías de alto costo (José et al., 2013)

En las últimas cuatro décadas, se han combinado diferentes tipos de detectores con lecturas electrónicas para que el detector sea FPA. Este desarrollo de la tecnología FPA ha revolucionado la imagen infrarroja. Las técnicas de diseño y fabricación han acabado dando como resultado un incremento en la fabricación de sensores y en la disminución del tamaño de estos dispositivos de plano focal.

En la actualidad, los detectores FPA refrigerados se encuentran disponibles en algunos los misiles, como el IRIS-T o el Mistral 3. Este último ha sido el elegido para su análisis en este TFG por estar en funcionamiento en las FAS y, en concreto, implementado en el GACA X.

⁷ Sensor para medir la temperatura, consta de dos metales diferentes unidos en un extremo. Si se enfría o se calienta, la unión produce una tensión proporcional a la temperatura.



3.2. Misil mistral

El sistema de tiro Mistral es un sistema de tiro de baja y muy baja cota que lleva operativo en España desde el año 1988. Este misil es de origen francés y ha sido creado por la empresa MBDA. Fue adquirido por las FAS para poder afrontar y solventar cualquier acción que esté relacionada con la defensa antiaérea (DAA) (Ver Figura 10).

El alcance máximo del misil es de 6500 metros (MBDA, 2011). La cabeza de guerra explosiva consta de tres posibles formas de actuación:

- Por colisión.
- Espoleta de proximidad.
- Autodestrucción a los 15,2 segundos del lanzamiento.

Dentro de sus misiones se encuentran:

- Defensa de un punto vital.
- Defensa de zona.
- Defensa de distintas unidades.



Figura 10 Seguimiento de una aeronave con Mistral. Fuente: Elaboración Propia

Con el paso del tiempo la empresa fabricante MBDA ha ido modificando y ampliando las capacidades de los misiles Mistral hasta el punto en el cual España adquirió el Mistral I y en la actualidad se está trabajando con el Mistral III. Los diferentes modelos son fruto de la evolución en los sistemas de guiado.

A continuación, podemos ver la evolución del Mistral en sus diferentes versiones (Cap. Daniel Arribas García, 2020) y posteriormente en el punto 3.2.1 se describe la evolución de los sistemas de guiado y las 4 generaciones que lo componen.

- Mistral 1: Fue la primera generación que entro en servicio desde comienzos de la década de los 90.
- Mistral 1 Block 1: Se creó una versión intermedia utilizando el seeker M1 junto a componentes del M2 con mejoras en maniobrabilidad e incorporación de espoleta de proximidad por laser
- Mistral 2: Entrada en servicio en 1998. Incorpora los componentes citados en el apartado anterior incluyendo anti-contramedidas (CCMIR)
- Mistral 3: Puesta en servicio en 2013 por las Fuerzas Armadas Francesas. Incorpora una serie de mejoras con respecto a la sensibilidad IR, mayor alcance, mayor velocidad y vida operativa. También se mejoran las capacidades CCMIR.

Las características técnicas de cada una de las versiones del misil Mistral quedan definidas en la Tabla 5.



	M 1	M 1 Block 1	M 2	M 3
Peso (kg)	24.5	24.3	23.7	24.7
Máxima aceleración lateral	4g	7g	7g	9g
Velocidad máxima (m/s)	810	825	850	930
Máximo alcance (km)	5	5.4	5.5	6.5
Rango IR (en base a M1)	100%	100%	100%	170%
Vida media misil (años)	12	12	12	15-20
Medidas CCMIR	No	No	Si	Si

Tabla 5 Comparación misiles Mistral según modelo. Elaboración propia.

3.2.1. Evolución de los sistemas de guiado del misil Mistral

- Primera generación:

La primera generación aparece a finales de los años 50. El elemento usado en los detectores era el Sulfuro de Plomo (PbS) el cual operaba en Banda I (1- 2,5 μm) sin refrigeración.



Estos seeker solo eran capaces de detectar objetivos dentro de su rango y desde la cola además de tener muchas dificultades de discriminar el blanco de la radiación atmosférica. Este sistema no dispone de ningún tipo de anti-contramedidas, por tanto, el lanzamiento de cualquiera de ellas por parte del objetivo, como por ejemplo bengalas, harían que el misil no impactara en el objetivo.

Los blancos más factibles de neutralizar son las aeronaves de ala rotatoria por su baja velocidad, quedando prácticamente descartados los cazas modernos.

Como ejemplo de esta generación se encuentran los sistemas Redeye de Estados Unidos y el SA-7 Strela-2 de Rusia. (Ver Figura 11 y Figura 12).

Figura 11 Misil Redeye. Fuente: wikiwand.com



El propósito del sistema de guiado en esta generación era proporcionar seguimiento e información IR. Las retículas también podían suprimir el fondo de emisión con respecto al objetivo mediante un proceso llamado filtrado espacial. Con este sistema se trataba de maximizar la relación señal/ruido. El objetivo era una fuente caliente que proporcionaba una señal que se mostraba como una serie de pulsos con frecuencia de corte que dependía de la disposición en la que se encontraba el retículo y su frecuencia rotacional (Ver Figura 13). La señal posteriormente es amplificada y filtrada de tal forma que suprime la radiación de fondo.



Figura 12 Misil SA-7 Strela-2. Fuente: aquellasarmasdeguerra.wordpress.com

En la primera generación de cabezas detectoras infrarrojas solo tenía un elemento detector y poseían un campo rectangular giratorio, por lo que conducía a una mayor imprecisión cuanto más cerca se encontrase del objetivo. La cúpula del buscador requiere estar hecha de un material

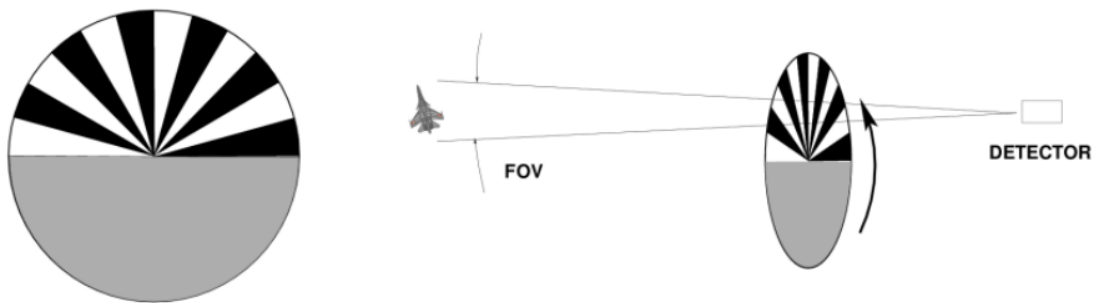


Figura 13 Retículo Chopper de escaneo IR. Fuente: Curso combate AAA-IR

transmisor de IR como el silicio, germanio o una variante del seleniuro de zinc. Tras atravesar el domo, un catadióptrico telescópico refleja la señal IR en una retícula giratoria.

Los buscadores *Spin Scan* también mostraron insensibilidad en el eje, por lo que podía ser fácilmente engañado por áreas diseñadas para irradiar en el mismo espectro. Este problema se superó al girar la óptica en lugar de la retícula, método que se conoció como exploración cónica (Cor. Gómez Pardo, 2018)



- Segunda generación:



Figura 14 Misil Stinger. Fuente: Marca.com

Esta proliferó en las décadas de los 70 y 80. Disponen de detectores criogénicos de antimonio de indio (InSb) es un compuesto de indio y Antimonio. Es un semiconductor de banda prohibida, similar al arseniuro de galio (GaAs).

Se opera en Banda II mejorando así su nivel de detectividad. Incorpora retículos modulados en frecuencia y fase además de mejorar las relaciones señal/ruido y la capacidad de discriminación.

En la fabricación se aprovechó para incorporar ciertos niveles de anti-contramedidas (CCMIR):

- Detección del incremento rápido de intensidad radiante (Automatic Gain Control, AGC).
- Detección y separación de blanco-señuelo.
- Blanqueo de sectores.

La mejora en los campos como la velocidad, el alcance y la maniobrabilidad lo convirtieron en un sistema de armas más versátil (Cor. Gómez Pardo, 2018)

Como ejemplos se encuentran el misil Stinger de Estados Unidos y los misiles Rusos SA-14 Gremlin o SA-16 Igla (Ver Figura 14 y Figura 15).

La mejora de los detectores ha permitido operar en el rango de 3 a 5 micrómetros, en el que se utiliza argón o nitrógeno para enfriar el detector, pudiendo percibir las partes más frías de la pluma y componentes calientes de la aeronave, permitiendo así aumentar el espectro de seguimiento.



Figura 15 Misil SA-16 Igla. Fuente: falcon-lounge.com

El SA-14 ruso es una versión mejorada del SA-7b de primera generación con mejor seguimiento y una capacidad de seguimiento más amplia. Puede rastrear objetivos más fríos a mayores distancias y atacar objetivos que se mueven a mayor velocidad.



Además de los retículos modulados en frecuencia y fase, existe otro tipo de *seeker* (Ver Figura 16 y Figura 17) que utiliza cuatro detectores formando una cruz abierta en lugar de una retícula. Todavía se mantiene el círculo de nutación⁸ para dar la modulación de frecuencia mediante la producción de cuatro salidas igualmente espaciadas para un objetico en el eje y otro fuera del mismo (EMIES ACART, s. f.). Este Tipo de Sistema es el Mistral 2.

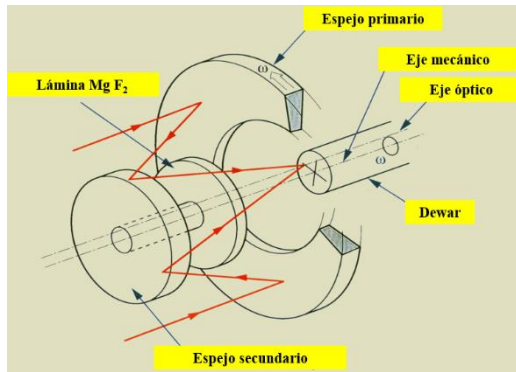


Figura 16 Conjunto giroscópico. Fuente: ACART EMIES. Elaboración propia.

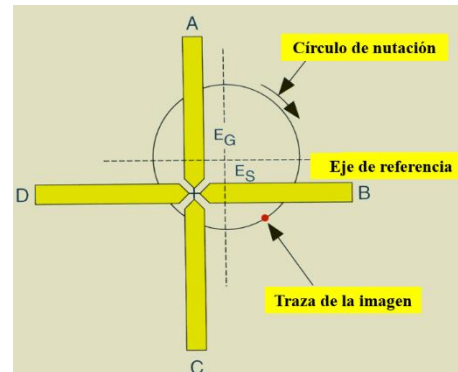


Figura 17 Detectores lineales fotovoltaicos en InSb. Fuente: ACART EMIES. Elaboración propia.

- Tercera generación:

El desarrollo de esta generación se produce a finales de los 80 y durante los 90. Las nuevas técnicas de escaneo lo convierten en más resistentes frente a las contramedidas de los objetivos. Fueron ideados para sustituir el sistema de retícula convencional y su objetivo es espectral. La sensibilidad está adaptada para que coincida estrechamente con las firmas de emisión de objetivos y, así, poder discriminar otros, como las contramedidas (Álvaro Pastor, 2020) El inconveniente del procesamiento de señales digitales es hacer frente a un gran volumen de datos. Estos *seeker* se denominan pseudoimágenes o roseta debido a que crean una imagen simulada del objetivo moviendo la señal IR sobre el detector (Ver Figura 18).

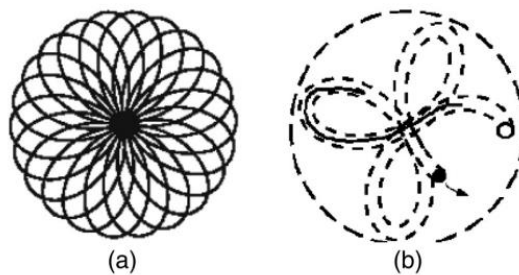


Figura 18 (a) Roseta, (b) Pseudoimágenes. Fuente: Artículo de SPIE

⁸ Es un movimiento ligero sobre el eje de rotación de un objeto simétrico que giran sobre su eje, en este caso el objeto simétrico son los detectores.



En los seeker de roseta de un solo detector, este muestrea la señal de la escena con un patrón de exploración, pero en lugar de formar una imagen con las adquiridas, se emplean otras técnicas de procesamiento para estimar la posición de los objetivos. La señal IR atraviesa el domo, se refleja en 2 espejos y penetra 2 prismas para finalmente impactar sobre el detector (Ver Figura 19). Este proceso junto a la continua revolución sobre el eje de nutación del sistema hace que se creen las pseudo imágenes

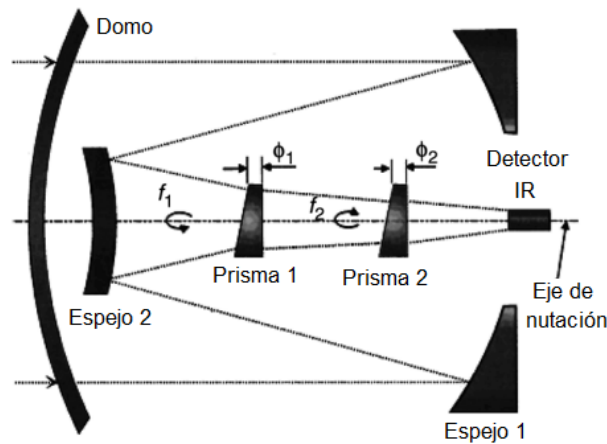


Figura 19 Recorrido radiación IR dentro de seeker.
Fuente: Artículo de SPIE.

Junto a las nuevas técnicas de escaneo también se incorporaron detectores multiespectrales. Estos proporcionan reconocimiento de objetivos en condiciones en las que las longitudes de onda son incapaces de identificar el objetivo. Estos espectros podían ser ultravioleta (UV) o IR de onda corta y onda media (SWIR/MWIR). Esta capacidad hizo que la discriminación entre el objetivo y la contramedida fuese más fácil.

Los llamados *seeker* de color dual se pueden utilizar dos bandas en el espectro IR o una combinación de IR y una diferente como por ejemplo la UV, ondas milimétricas o luz visible. Como máximo pueden ser cuatro bandas apiladas en un solo píxel. Estos modelos utilizan InSb o HgCdTe que requiere ser enfriado sobre los 200 grados centígrados negativos para poder lograr una sensibilidad suficiente. El CdS se usó también para poder cubrir parte del espectro UV (Cor. Gómez Pardo, 2018).

Como ejemplo de tercera generación tenemos el Misil Mistral francés, el Igla SA-18 y SA-24 Grinch ruso y el Stinger FIM-92B de EE. UU. (Ver Figura 20).



Figura 20 Misil SA-24 Grinch. Fuente: kyivindependent.com



- Cuarta generación:

Actualmente el Mistral III está comenzando a entrar en servicio en España. Este sistema de armas dispone de una matriz de detectores que permite formar una imagen del blanco y el procesamiento de la señal es completamente digital.

Una FPA es una matriz que puede contener desde 4 a 1.000.000 de detectores a los que se les denomina píxeles y son sensibles a una parte del espectro IR. Cada pixel utilizado en los seeker de un misil tiene un tamaño de 20 a 30 μm .

Los FPA constan de dos partes:

- Una matriz de píxeles que puede ser UV, visible o IR
- Un chip electrónico de lectura que mide las ondas estacionarias (Voltage Standing Wave Radio en sus siglas en inglés, VSWR).

Ambos están unidos por unas protuberancias de indio que es el encargado de realizar contacto eléctrico entre los dos componentes (Ver Figura 21). El ROE convierte la salida del conjunto de píxeles en un tren de pulsos, esto reduce considerablemente la cantidad de cables de decenas de miles a menos de cien.

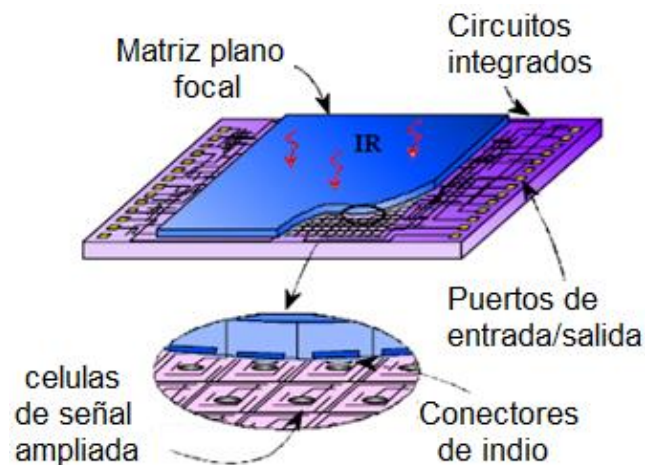


Figura 21 Detector FPA. Fuente: Curso impartido por Applied Technology Institute. Elaboración propia.

La velocidad de fotogramas es la cantidad de veces que se lee la matriz en cada segundo (FPS). Las frecuencias de cuadro de un seeker son de 10-100 Hz y por tanto los FPS deben ser lo suficientemente lenta para evitar manchar la imagen de destino ya que el aumento de los FPS perjudica la transmisión de los datos. Por ejemplo, un FPA de 512 x 512 píxeles que funciona a 50 Hz debe transferir más de 200 Mb/s (Walter R. Dyer, 2004).

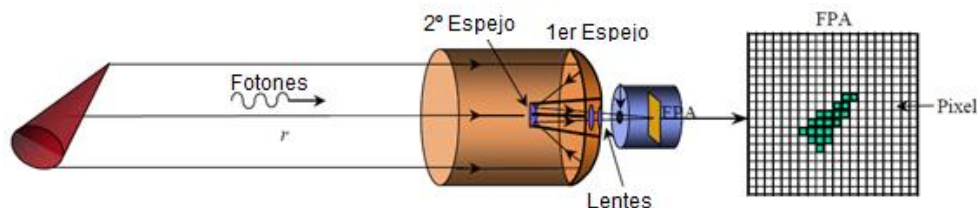


Figura 22 Proceso de entrada de los fotones hasta crear una imagen. Fuente: Curso impartido por Applied Technology Institute.



Los fotones radiados por los objetivos son captados por el autodirector IR y, tras rebotar en el dispositivo opto-mecánico, los fotones impactan contra el sensor FPA creando una imagen en la matriz (Ver Figura 22)

Todos los píxeles del FPA de un *seeker* observan el FOV durante una fracción de cada fotograma y a esto se le llama tiempo de integración. Durante este tiempo los fotoelectrones se encargan de recoger en pequeños condensadores la información de cada pixel y esto se transmite a las ROE quedando almacenado en los pozos. La capacidad de almacenamiento de los pozos limita la FPA.

3.2.2. Composición Misil Mistral:

Para el estudio del arte del componente del que trata la memoria es necesario saber dónde está comprendido. Para ello, se va a desglosar las diferentes partes del misil.

Como podemos apreciar en la imagen (Ver Figura 23) se dispone el misil Mistral 3 con todas las partes exteriores enumeradas para poder diferenciarlas (Ver Tabla 6). Este misil corresponde con la última versión actualizada que está en uso en las FAS.

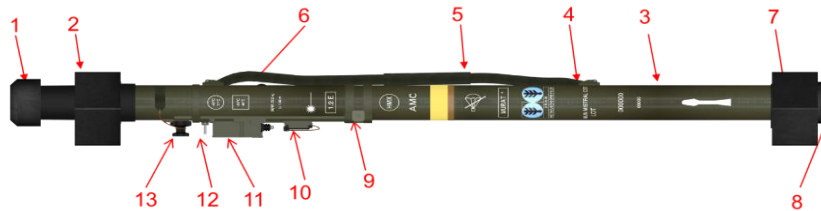


Figura 23 Misil Mistral 3. Fuente: MBDA

Numero	Nombre
1	Tapa delantera
2	Amortiguador delantero
3	Tubo
4	Pin
5	Arnés de transporte
6	Acceso para dispositivo de posicionamiento del tubo del misil
7	Tapa trasera
8	Punto fijación trasero
9	Conector P1
10	Caja de bloqueo-desbloqueo y conexión de misiles
11	Punto de fijación delantera
12	Entrada criogénica

Tabla 6 Enumeración partes misil Mistral 3. Elaboración Propia



Los diferentes conjuntos y subconjuntos de los que está el misil compuesto son los siguientes (Ver Figura 24) (EMIES ACART, s. f.):

- Autodirector IR
- Actuadores
- Unidad de Guiado y Control
- Batería
- Espoleta de proximidad
- Estructura frontal
- Cableado
- Dispositivo de Seguridad y Armado
- Cabeza de Guerra
- Conjunto Propulsor

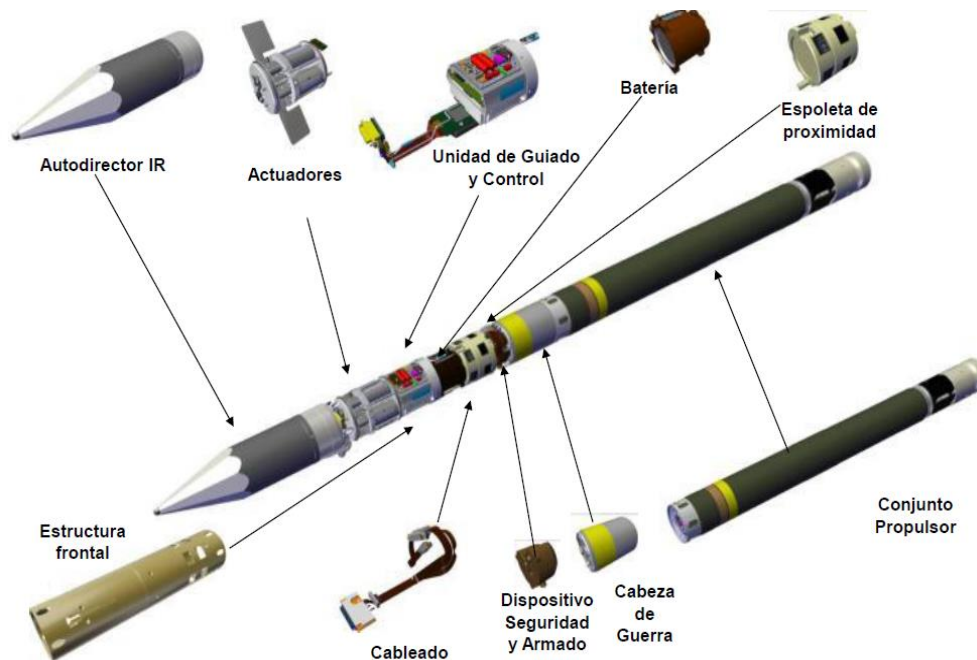


Figura 24 Conjunto y subconjuntos Misil Mistral. Fuente: MBDA

Tras desglosar del misil, se analiza el Autodirector IR. Está compuesto de un Domo IR (Ver Figura 25) con 8 cristales fotovoltaicos de indio-antimonio y selenio que tienen forma triangular para evitar los reflejos dejando pasar la radiación.



Figura 25 Domo IR. Fuente: MBDA.

Necesita ser enfriado cerca de los 87 K mediante el uso de el Conjunto Pila Refrigerador (CPR) (Ver Figura 26). La CPR una vez activada dispone de máximo de 45 segundos para proceder al lanzamiento del misil, esto es debido a la limitación actual del sistema con la presurización del gas argón a 700 bares. Este gas se encuentra en el interior de la CPR, que está alojada en el puesto de tiro.

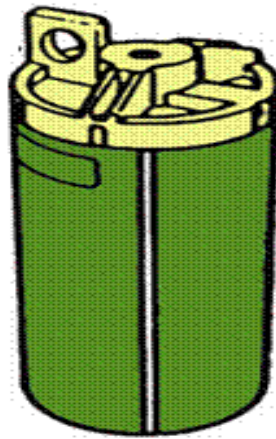


Figura 26 CPR. Fuente: presentación Mistral EMIES

La señal que recibe el *seeker* es amplificada y tratada en un filtro de banda III adaptado al ancho de pulso específico para el tipo de blanco que nos interesa, excluyendo aquellas pequeñas señales de eco que proceden de aves, vegetación, o posibles interferencias de señales en el mar.



Para que la señal llegue hasta el FPA es necesario el uso de dos cristales (Ver Figura 27), que reciben el nombre de dispositivo opto-mecánico y se encargan de concentrar toda la radiación incidente para acabar alojándola en el sensor (PCMASACOM. *Presentación Mistral*, s. f.).



Figura 27 Dispositivo Opto-mecánico. Fuente: PCMASACOM.

La misión del sistema de guiado del Mistral 3 (Ver Figura 28) - idéntica al de las versiones anteriores-, (Ver 3.2.1) es guiar al misil hacia el objetivo. La modificación en este caso consiste en mejorar el detector que capta la radiación del objetivo. Este nuevo sistema está constituido por un detector de plano focal. La principal diferencia entre los sensores de primera y segunda versión -que usaban la banda III ($8\text{ }\mu\text{m} < \lambda < 12\text{ }\mu\text{m}$) dentro del espectro IR-, la tercera versión utiliza la banda II del espectro IR que comprende las longitudes de onda entre $3,7\text{ }\mu\text{m} < \lambda < 4,8\text{ }\mu\text{m}$.

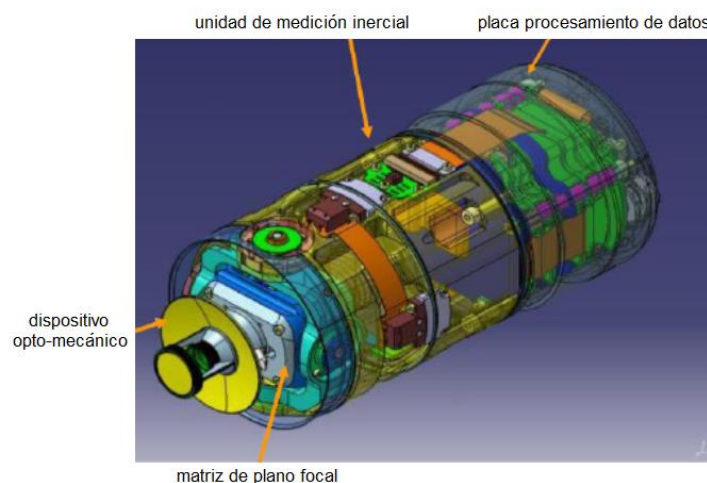


Figura 28 Interior Seeker. Fuente: MBDA. Elaboración propia.



4. DESARROLLO: ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados que se han ido obteniendo tras la aplicación de la metodología expuesta en el punto 2.2. Para ello la información obtenida me ha permitido analizar en profundidad el sistema actual con el que cuenta las FAS. Posteriormente, se realizará una comparativa entre el sistema FPA refrigerado y el no refrigerado.

4.1. Análisis comparativo sensores

Para la comparación de sensores se ha investigado diferente tipo de sensores entre los que se destacan los bolómetros/microbolómetros, HgCdTe, SLS tipo II⁹, los sensores fotodetectores de Infrarrojo de pozos cuánticos (QWIP) y el detector de punto cuántico de doble capa (QDIP).

Para el análisis se ha creado una tabla que recoge la comparación de los sistemas de última generación existentes (Ver Tabla 7) respecto a la madurez de los sistemas según el nivel de preparación tecnológica (TRL), el estado actual del sistema, los usos militares, así como las limitaciones y ventajas.

	Bolómetro	HgCdTe	SLS Tipo II	QWIP	DWIP
Madurez	TRL 9	TRL 9	TRL 2-3	TRL 8	TRL 1-2
Estado actual sistema	Uso en aplicaciones de rendimiento medio o bajo	Uso en aplicaciones que requieren un alto rendimiento	Investigación y desarrollo	Comercial	Investigación y desarrollo
Uso militar	Visor armamento, Gafas de visión nocturna, seeker misiles, pequeños UAV	Interceptación de misiles, imágenes tácticas aéreas y terrestres, seeker misiles	Uso industrial	En evaluación para aplicaciones militares	En desarrollo
Limitaciones	Baja sensibilidad y tasas de refrescos largas	Prestaciones variables según fabricación.	Requiere mucha inversión. < \$100 Millones. Necesita avances en el material.	Ancho de banda pequeño y baja sensibilidad	Ancho de banda pequeño y baja sensibilidad
Ventajas	Muy bajo precio, no requiere refrigeración.	Rendimiento casi teórico, material de uso al menos en los próximos 10 años	Mejor rendimiento que HgCdTe para radiaciones > 14 μm	Aplicación de bajo coste. Material uniforme	No existen datos suficientes

Tabla 7 Comparativa de los sistemas de última generación. Elaboración propia.

9 Strained-Layer Superlattice Tipo II.



Tras una primera evaluación se ha decidido eliminar del análisis el sensor SLS tipo II por estar aún en desarrollo y su integración está limitada para el uso aeroespacial, siendo el principal investigador la NASA. El sistema QDIP tampoco ha entrado en análisis debido a que se encuentra en una etapa muy temprana de desarrollo.

4.2. Valoración inicial

Los sistemas que se han valorado en este estudio comparativo tienen una alta madurez, están validados, certificados e, incluso están disponibles en entorno real (TRL 8 y TRL 9). Esto se debe a que tanto los bolómetros como el HgCdTe están ya implementados en diferentes sistemas en servicio. El sistema QWIP tiene una madurez de TRL 8 y, aunque hoy en día solo se usa en productos civiles, se está llevando a cabo un estudio y evaluación para poder implementarlo en aplicaciones militares (Rogalski, 2012), aunque no han trascendido ningún resultado.

Los dos primeros sistemas (bolómetros y HgCdTe) están ya en uso militar, quedando relegados los bolómetros a aplicaciones de bajos rendimientos y el HgCdTe a los altos rendimientos. Esto no implica que la tecnología no pueda usarse para cualquier aplicación militar, indiferentemente del rendimiento que necesite.

Actualmente los *seeker* FPA refrigerados llevan implementados detectores de HgCdTe. Este material ha demostrado tener un comportamiento casi perfecto y eso lo convierte en un sistema difícil de sustituir. La entrada de la tecnología bolométrica a los sistemas FPA no refrigerados ha creado una visión conceptual de que sea posible una implementación futura en los *seeker*.

A la hora de adoptar una u otra tecnología se deben considerar además de los requisitos de capacidades y funcionalidades, físicos, potencia, ambientales, La Compatibilidad Electromagnética (EMC) o la relación marginal técnica de sustitución (RMTS), otros como el coste o el ciclo de vida del componente o subsistema que lo integra.

4.3. Comparación *seeker* FPA refrigerada y no refrigerada

Para comenzar, la tecnología FPA no refrigerada con sistemas de bolómetros o microbolómetros ha ido evolucionando y mejorando las resoluciones de la matriz consiguiendo uniformidad y estabilidad (Claudio Prado, 2011)

Actualmente, el tamaño de las matrices y el número de píxeles usados en los detectores no refrigerados está a la par de los refrigerados (Claudio Prado, 2011). Sin embargo, el coste y la complejidad de creación de los sistemas FPA no refrigerados son considerablemente menores en comparación con las refrigeradas. Los precios oscilan entre los 1 000-2 000 €¹⁰ en el caso de los no refrigerados y los 30 000 € en los refrigerados.

Con respecto a las capacidades, los no refrigerados trabajan en la banda LWIR del espectro, que es una banda de mayor transmisividad atmosférica permitiendo una máxima detección de cuerpos a temperatura ambiente. Los detectores refrigerados por otro lado son

¹⁰ Información proporcionada por personal del INTA.



capaces de usar las bandas LWIR y MWIR, siendo esta última mucho más sensible a los contrastes entre los objetos a mayores temperaturas que la ambiente y el clutter del entorno, siendo perfecta para detectar la pluma de salida de gases de una aeronave, pero al mismo tiempo que tiene una resolución mayor esta se ve limitada por la difracción de la óptica.

Por tanto, si se busca un sistema capaz de detectar y seguir un blanco terrestre a una distancia de 4 km o a un blanco aéreo a 10 km, ambos detectores parecen adecuados, aunque cabe destacar que el nivel de ruido adquirido sería mayor en el no refrigerado que en el que si lo está. Es el motivo por el cual los refrigerados tienen una mayor distancia de detección.

Si se consideran las capacidades de discriminación, reconocimiento o identificación, a igualdad de tamaños de la óptica, la banda LWIR tiene menor capacidad de resolución, siendo esto un inconveniente a la hora de enganchar sobre la firma térmica de un objetivo. No obstante, la discriminación podría realizarse mediante el uso de la cámara del tirador que normalmente es refrigerada, como es el caso del misil Spike LR 2 DUAL, transfiriéndole al *seeker* el objetivo adquirido para su posterior seguimiento durante el vuelo del misil. De este modo, los sistemas refrigerados proporcionan una mayor sensibilidad y estabilidad que los microbolómetros no refrigerados.

Uno de los limitantes del sensor FPA refrigerado es la vida media del sensor. Físicamente también encontramos que estos detectores son más voluminosos y mucho más complejos de crear, además, consumen más potencia ya que cuentan con un sistema que los enfría a temperaturas de 77K. En el caso del *seeker* del misil Mistral 3 se usa una CPR de gas argón a presión que se acopla en el misil antes del lanzamiento y tiene un tiempo de operatividad de 45 segundos. Este fungible es indispensable para la operatividad del *seeker* ya que solo incluye dos unidades CPR por misil y puede tener fallos derivados de las fugas en el almacenamiento o al traslado, por tanto, hay que considerarlo como un posible coste adicional de disponibilidad de material.

El *seeker* es un dispositivo de un solo uso que es utilizado en un corto periodo de tiempo de decenas de segundos, y no se consideran las horas de uso y fallo (MTBF) de los refrigerados como si ocurre en el mantenimiento de las cámaras de observación y vigilancia.

4.4. Análisis de patentes

El análisis de las patentes ofrece la posibilidad de conocer la creación de los microbolómetros para otros sistemas, así como los materiales que más se han estado usando como películas termosensoras: Óxido de vanadio (VOx), Silicio-germanio (SiGe), Silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H), Silicio-germanio policristalino (poly SiGe).

El uso de Poly SiGe se encuentra limitado para el uso en la tecnología para FPA refrigerado ya que tiene un gran aporte de ruido en sus detecciones, ello es debido a que tiene una estructura cristalina. El resto de los materiales son compatibles con la tecnología, pero sus coeficientes de cambio resistividad son bajos.

El material necesario debe presentar un alto coeficiente de resistencia a la temperatura (TCR) y una baja conductancia térmica (G_{th}), de esta manera el conductor puede ser capaz de seguir los rápidos cambios de radiación incidente.

Las patentes estudiadas utilizan resistencias de VOx en sus bolómetros por tener un TCR elevado y una baja contribución $1/f$. Los tipos de circuitos usados para la medición diferencial



son puentes Wheatstone¹¹. Incluso usando este tipo de puente, que se encarga de realizar las mediciones, las FPA no refrigeradas de tipo bolómetro siguen siendo muy sensibles a la variación de temperaturas y requiere circuitos especiales que compensen a nivel del píxel.

4.5. Análisis de encuesta

La encuesta se realizó a diferente personal del GACA X, incluyendo las 3 escalas, además de a cierto personal civil que trabajan en el INTA

Para la evaluación según los criterios también se ha tenido en cuenta los años de servicio o los años trabajados en las instalaciones del INTA ya que una persona que ha estado trabajando muchos años en el mismo sistema tendrá un mayor conocimiento de este.

	Número de participantes	Media de años
Oficiales	3	6-8
Suboficiales	8	4-6
Tropa	26	2-4
INTA	3	>10

Tabla 8 Media de años de servicio. Elaboración propia.

Los criterios en cuanto a años de servicio han sido muy útiles a la hora de establecer unos baremos. Como podemos observar (Ver Tabla 8 Tabla 8 Media de años de servicio. Elaboración propia.), el personal del INTA además de ser especialistas en la materia, llevan de media más de 8 años trabajando en la misma área, esto hace pensar que sus valoraciones son más que justificadas. En cambio, el personal de tropa, que sus funciones se limitan al manejo del sistema, pero sin entrar en temas técnicos, su media se coloca por debajo de los 4 años de servicio.

A continuación, se detallan los resultados de las 10 preguntas (Ver Gráfico 1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) que se ha evaluado mediante una escala de Likert de 1 a 7. Es importante recalcar que la tabla es la valoración de la encuesta directamente sin usar las ponderaciones, las cuales se aplicaran posteriormente para obtener una sola valoración de conjunto.

¹¹ Circuito eléctrico que se usa para medir resistencias que desconocemos mediante el equilibrio de los brazos del puente.

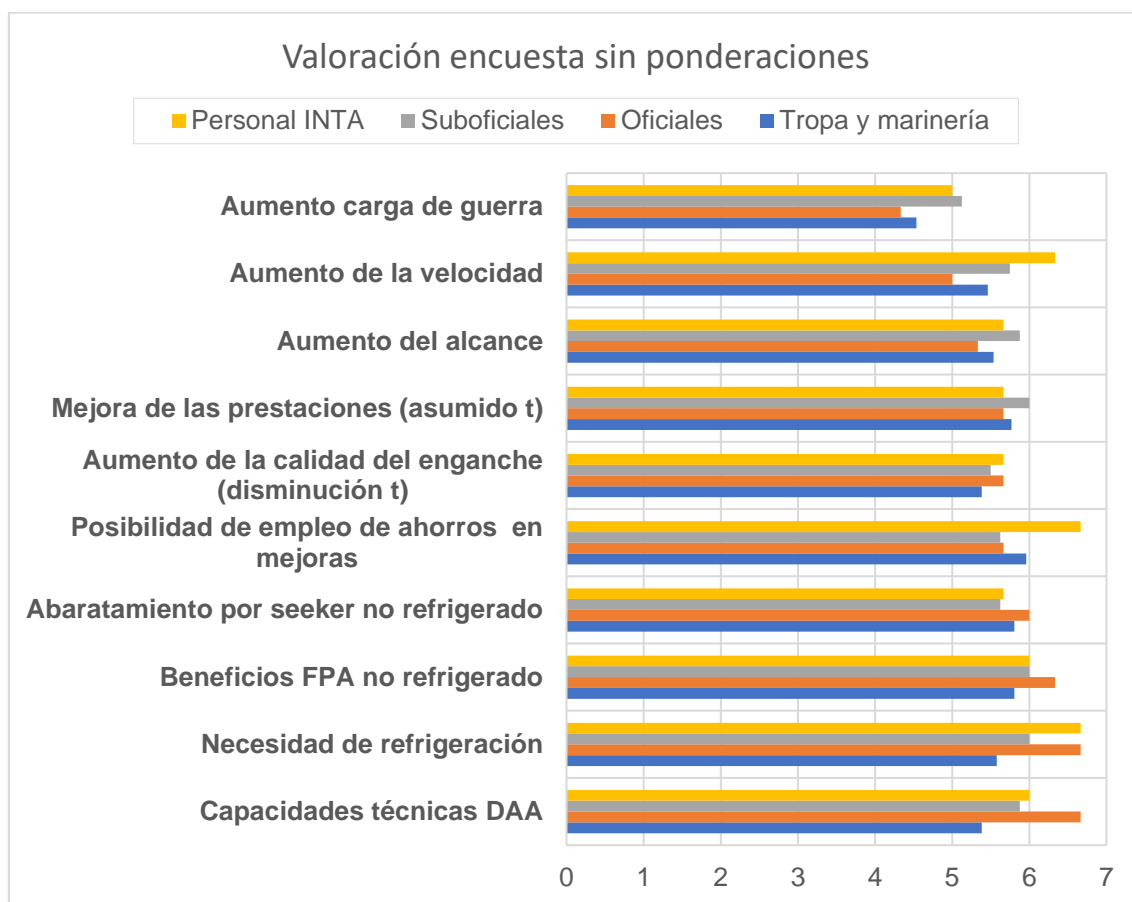


Gráfico 1 Resultados encuesta. Elaboración propia.

En el Anexo II: Resultados de la encuesta. se encuentra la información gráfica de cada pregunta analizada presentándose a continuación las conclusiones más destacadas del análisis:

- La valoración de las capacidades tácticas de los actuales misiles es más favorable por el personal conforme sube de escala de oficialía. Así, los oficiales tienen una visión más táctica del uso de la DAA y, por ende, su valoración con respecto a los misiles se ve incrementada.
- Pese al buen funcionamiento de los sistemas, la refrigeración externa de los sensores mediante cartuchos de argón o nitrógeno y su limitación en el tiempo de adquisición y enganche, son considerados un inconveniente por todo el personal encuestado. La tropa considera este inconveniente menos importante, aunque le da una valoración de 5.58 sobre 7.
- La opinión generalizada es que la implementación del nuevo sistema FPA no refrigerado sería beneficioso para el sistema y su operatividad.
- Todos los encuestados confían en que un abaratamiento del coste de producción de los *seeker* acabe abaratando el precio global final. El personal especialista que trabaja en el INTA refuta con una valoración positiva la capacidad de mejora de los sistemas.



- Al eliminar la limitación de tiempo para el seguimiento del objetivo mejoraría la calidad del enganche. Además, el no necesitar refrigeración implicaría que se podría activar y desactivar el misil en cualquier momento mientras que en la actualidad una vez activado el misil comienza a agotarse el tiempo de 45 segundos para realizar el disparo. Además, todos los encuestados coinciden con una valoración positiva, esto se debe a que la mejora de los sistemas de DAA es una de las necesidades constantes de las FAS, para estar a la vanguardia tecnológica. La posibilidad de implementar una cámara térmica refrigerada y otra de visión diurna con aumentos, además de poder implementar una pantalla digital de mejores prestaciones a la actual donde se vean reflejados todos estos sistemas. Esto ayudaría a una mejor identificación de las aeronaves además de facilitar a los operadores el manejo del sistema.
- Toda disminución de peso del sistema implica la posibilidad de implementar una mayor carga de proyección que permita al sistema alcanzar mayores distancias. En el caso de tener velocidades mayores se necesitaría un aumento en FPS por parte del *seeker* y esto no se ha valorado tan positivamente por el personal del INTA.
- En este caso, las valoraciones se estancan cercanas al punto de indiferencia. La carga de guerra actual de los misiles es suficiente para poder combatir las amenazas, de tal forma, que un aumento de la carga conseguiría un beneficio insignificante.

Tras la aplicación de las ponderaciones en las respuestas de la encuesta se ha obtenido la gráfica siguiente (Ver Gráfico 2):

Valoración general de la encuesta con ponderaciones

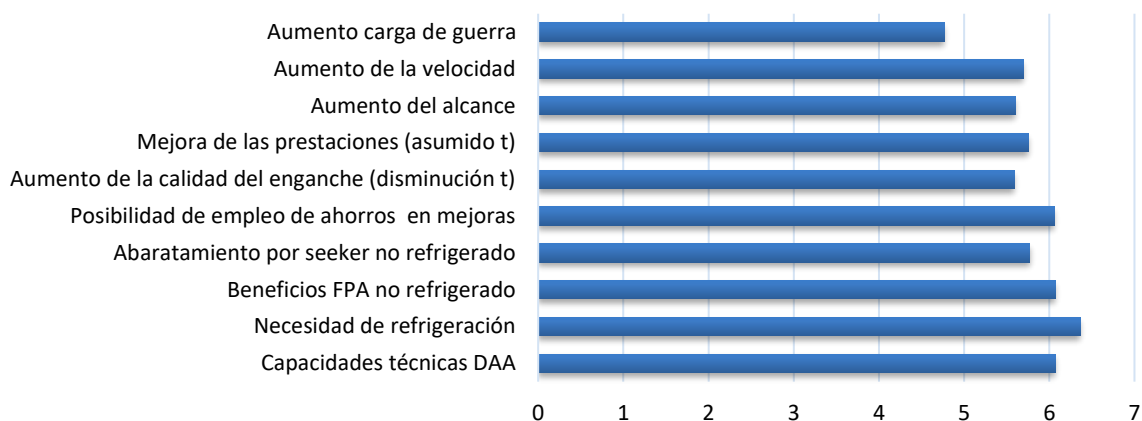


Gráfico 2 Valoración general de la encuesta con ponderaciones. *Elaboración propia.*

4.6. Ventajas y desventajas FPA no refrigerado

A continuación, se refunda en una sola tabla todas las ventajas y desventajas obtenidas de la búsqueda de información, lectura de patentes y entrevistas con personal del INTA (Ver Tabla 9).



VENTAJAS	DESVENTAJAS
Tamaño matriz igual a las refrigeradas	Solo trabaja en LWIR
Coste producción muy bajo	Menor contraste entre objetivo y ambiente
Complejidad de creación baja	Mayor captación de ruido
Mayor vida media del sensor	Menor distancia de detección
Menos voluminoso	Menor resolución
Menor peso	
No refrigerado	

Tabla 9 Ventajas y desventajas FPA no refrigerado. Elaboración propia.

La nueva tecnología no refrigerada aportaría los siguientes beneficios:

- Una mayor vida media del sistema implica la posibilidad de aumentar el tiempo de almacenamiento y un aumento de la reserva de misiles.
- Al no tener CPR se eliminan los fallos de almacenamiento o disparo.
- Bajadas de precios de los sistemas por un menor costo en la fabricación de los sensores.
- Al reducir el peso del sistema tenemos dos opciones, aprovechar esa diferencia de peso para implementar alguna mejora que aumente las prestaciones del misil o mantener un misil más ligero que permita mayor maniobrabilidad.

Por el contrario, las desventajas de implementar el cambio de sistema son las siguientes:

- Al trabajar solamente en LWIR nos encontramos con el problema de pérdida de distancia de detección.
- Los microbolómetros al no estar refrigerados su capacidad de contraste entre el objetivo y el ambiente es menor, además la resolución del sistema es inferior debido a la captación de mucho ruido.



4.7. Otras tecnologías afines consideradas: microespejos

El sistema de microespejos mecánicos (MEMS) tiene una matriz 2D de microespejos de aluminio que están controlados individualmente. El MEMS modula la luz espacial mediante un sistema de procesamiento de luz digital (DPL). Actualmente los MEMS están disponibles de manera comercial en formatos de 1280x1024. Cada microespejo puede reflejar la luz en una de las dos direcciones, según el estado de la celda de memoria subyacente (SRAM). Con la iluminación adecuada, cada uno de los espejos reflejará la luz en el sistema óptico cuando se escribe un 1 en su SRAM y fuera del sistema óptico cuando se escribe un 0. Por tanto, el sistema tiene una naturaleza binaria. (Ver Figura 29)

La velocidad de conmutación de cada espejo es aproximadamente de 10 microsegundos. La imagen binaria en la matriz se puede actualizar a una velocidad aproximadamente de 5000 Hz, con un reinicio global que permite la eliminación de la imagen en menos de 20 segundos.

La empresa Optical sciences Corporation (OSC) ha desarrollado un proyector IR basados en la tecnología MEMS. (*Digital Micromirror Device*, 2006)

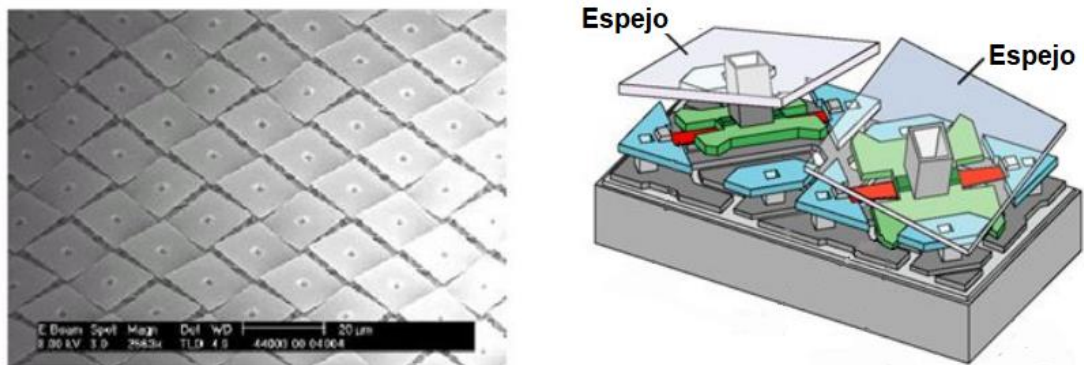


Figura 29 Imagen microscópica y esquema de un microespejo. Fuente: *Single photon detector image reconstruction object Richard Baraniuk. Elaboración propia.*

Sistema de proyector de matriz de microespejos (MAPS) (Ver Figura 30): este sistema contiene un proyector infrarrojo dinámico independiente que es capaz de generar imágenes IR realistas. Estas imágenes se pueden usar dentro de un laboratorio para pruebas avanzadas de buscadores IR.

Las aplicaciones del proyector incluyen pruebas de hardware en el circuito del sistema, equipos de prueba móviles, validación del sistema, pruebas integradas, pruebas de línea de producción y capacitación. El sistema MAPS es capaz de operar en dos modos: binario sin parpadeos y modulación por ancho de pulsos (PWM).



En el modo binario, el sistema prácticamente no parpadea, realiza solo un breve reinicio en cada cuadro para evitar el colapso de la memoria de los microespejos. El proyector es compacto y de pequeñas dimensiones y se puede producir a bajo costo en comparación con otras tecnologías de proyectores IR.

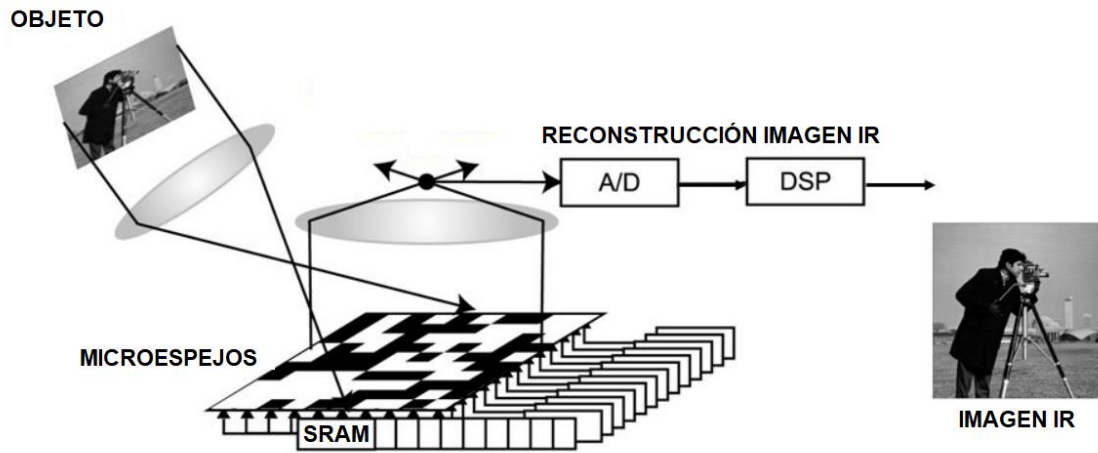


Figura 30 Proceso creacion imagen IR. Fuente: single photon detector image reconstruction object Richard Baraniuk. Elaboración propia.



5. CONCLUSIONES

Entre los materiales en uso por el Ejército de Tierra español que proporcionan protección a baja cota, se encuentra el sistema de armas Mistral. El objetivo principal del TFG es poder determinar la viabilidad de una posible implementación del sistema FPA no refrigerado con la finalidad de que puedan mejorar los sistemas de guiado actuales, en concreto, sobre el sistema Mistral 3, en servicio en el GACA X que dispone de estos detectores refrigerados. El desarrollo de la tecnología FPA ha revolucionado la imagen infrarroja y las técnicas de diseño y fabricación actuales proporcionando sensores más pequeños y abaratando el uso de los sistemas, especialmente si no requieren refrigeración.

El desarrollo de un nuevo sistema de FPA no refrigerado no requeriría un sensor de elevadas prestaciones para la discriminación de objetivos ya que la distancia de detección y reconocimiento se encuentra dentro del alcance de este, incluyendo la óptica. Por tanto, esta tecnología es totalmente válida para incorporarla en los *seeker*.

El primero de los objetivos secundarios era conocer los diferentes detectores térmicos que se han estado usando en el sistema de misiles Mistral y el estudio ha permitido conocer la evolución desde los primeros sistemas que tenían retículos *chopper* hasta los sistemas actuales FPA refrigerados.

El segundo de los objetivos secundarios era dar a conocer una posible vía de desarrollo con visión de futuro sobre la posible adquisición de la tecnología de micro-espejos, concluyendo que esta permitiría facilitar la capacidad de validación de los sistemas en laboratorio al permitir crear imágenes IR reales en una sala.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexandra Schmitt. (2013). *MANPADS de un vistazo*.
<https://www.Armscontrol.Org/Factsheets/Manpads>.
- Álvaro Pastor. (2020). *Infrared guidance systems. A review of two man-portable defense applications*. <https://doi.org/10.31219/osf.io/c6gxf>
- Cap. Daniel Arribas García. (2020). *Mistral 3*.
- Claudio Prado. (2011). *RNDS, Cámaras Térmicas*. Recuperado 27 de noviembre de 2022, a partir de www.rnds.com.ar
- Cor. Gómez Pardo. (2018). *Curso Optrónica y misilística ACART*.
- Digital Micromirror Device*. (2006). Optical Sciences Corporation.
- El, U., Colombia, B., Mesa, A., Montoya, A. ;, Montoya, A. ;, & Alexandra, L. (2014). Cuadernos Latinoamericanos de Administración Patentes: ¿Son realmente una medida efectiva para la innovación? *Cuadernos Latinoamericanos de Administración*, 18, 61.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=409634370007>
- EMIES ACART. (s. f.). *SISTEMA MISTRAL*.
- Guadalupe Ortiz. (2014). *Tema 6. LA ENTREVISTA CUALITATIVA O EN PROFUNDIDAD*.
<https://rua.ua.es>
- Guil Bozal, M. (2006). ESCALA MIXTA LIKERT-THURSTONE. *Revista Andaluza de Ciencias Sociales*.
- J. Casas Anguita, J.R. Repullo Labrador, & J. Donado Campos. (2002). *La encuesta como técnica de investigación. Elaboración de cuestionarios y tratamiento estadístico de los datos*.
- José Iserte Bou. (2022, septiembre 26). *El rol de los MANPADS para ganar la guerra aérea en Ucrania*. Lisa News.
- José, J., Autor, Z., & Pastoriza, H. (2013). *Detección de infrarrojo lejano con bolómetros micromaquinados*.
- Juanjo Fernández. (2022, octubre 2). *Cómo la defensa antiaérea ucraniana está desbaratando por sorpresa los ataques rusos*. El Confidencial.
- KARNI, Y. (2006). *PATENTE: PHOTODECTOR-ARRAYS AND METHODS OF FABRICATION THEREOF*.
- LIDDIARD, K. (2006). *PATENTE: Sensor de seguridad infrarrojo con microbolómetro*.
- MBDA. (2011). *Mistral 3 MBDA*.
- Miguel S. Valles. (2002). *Entrevistas cualitativas*. <https://books.google.es/books?id=6xkfw->



n9n8EC&lpg=PA7&ots=0sddlKPoYc&dq=importancia%20de%20las%20entrevistas&lr&hl=es&pg=PA7#v=onepage&q=importancia%20de%20las%20entrevistas&f=false

Mizrahi, U., Fraenkel, A., Kopolovich, Z., Adin, A., & Bikov, L. (2006). *PATENTE: SEMI-CONDUCTOR DEVICES - AN ELBIT SYSTEMS - RAFAEL PARTNERSHIP*.

PCMASACOM. *Presentación Mistral*. (s. f.).

PD3-311. (2015). *DEFENSA ANTIAÉREA*.

Rogalski, A. (2012). *History of infrared detectors*. <https://doi.org/10.2478/s11772-012-0037-7>

Sausser, B., Ramirez-Marquez, J. E., Magnaye, R., & Tan, W. (2009). *A Systems Approach to Expanding the Technology Readiness Level within Defense Acquisition*. www.acquisitionresearch.org

Southwest Microwave. (2011). *SENSORES DE MOVIMIENTO DE TECNOLOGÍA DUAL*. www.southwestmicrowave.com

Tlapanco Rios, E. I., & Castaño Urrego, C. A. (2022). Management of Technology Readiness Level 1 (TRL 1); Product Innovation Management Strategy in Mechanical Design Processes. *Revista Politecnica*, 49(1), 7-17. <https://doi.org/10.33333/rp.vol49n1.01>

Walter R. Dyer. (2004). *Sample Pages From Modern Missile Analysis Course Outline*. <http://www.ATlcourses.com/schedule.htm>ATI'sModernMissileAnalysis:http://www.atlcourse.com/missile_systems_analysis.htmwww.ATlcourses.comorcallATIat888.501.2100or410.956.8805



ANEXOS

Anexo I: Encuesta.

Encuesta para la realización del TFG por parte el CAC Francisco Gabriel Navarro Redondo.

Gracias a su aportación se conseguirá una valoración sobre la posible implementación de nuevos seeker FPA no refrigerados. Lea detenidamente las preguntas e intente razonarlas con visión de futuro.

¡MUY IMPORTANTE! La valoración de algunas de las preguntas siguen una escala Likert que va de 1 a 7.

Start

Figura 32 Introducción encuesta. Elaboración propia.

Encuesta TFG

¿A qué grupo pertenece? (Recuerde que a continuación solo responderá en las casillas de su grupo)

- ☐ Escala de Oficiales
- ☐ Escala de Suboficiales
- ☐ Tropa y marinería
- ☐ Personal Civil INTA

Si es militar: ¿Años de servicio?
Si es civil: ¿Años trabajados en INTA?
(Solo conteste según sea su grupo)

	< 1	1-2	2-4	4-6	6-8	8-10	> 10
Oficiales	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Suboficiales	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tropa y marinería	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Personal Civil INTA	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 31 Encuesta sobre grupo. Elaboración propia.



¿A qué grupo pertenece? (Recuerde que a continuación solo responderá en las casillas de su grupo)

☐ Escala de Oficiales
☐ Escala de Suboficiales
☐ Tropa y marinería
☐ Personal Civil INTA

Si es militar: ¿Años de servicio?
 Si es civil: ¿Años trabajados en INTA?
 (Solo conteste según sea su grupo)

	< 1	1-2	2-4	4-6	6-8	8-10	> 10
Oficiales	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Suboficiales	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tropa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
INTA	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Valore la siguiente pregunta de 1 a 7, siendo 1 nada satisfecho y 7 muy satisfecho.
 ¿Piensa que la DAA de las FAS está a buen nivel en cuanto a capacidades tácticas?
 (Solo conteste en el apartado de su grupo)

Nada satisfecho 1 2 3 4 5 6 7 Muy satisfecho

Figura 33 Encuesta años trabajados o de servicio. Elaboración propia

Oficiales	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Suboficiales	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tropa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
INTA	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Valore la siguiente pregunta de 1 a 7, siendo 1 nada satisfecho y 7 muy satisfecho.
 ¿Piensa que la DAA de las FAS está a buen nivel en cuanto a capacidades tácticas?
 (Solo conteste en el apartado de su grupo)

Nada satisfecho 1 2 3 4 5 6 7 Muy satisfecho

Oficiales

Suboficiales

Tropa

INTA

Valore la siguiente pregunta de 1 a 7, siendo 1 no estoy de acuerdo y 7 totalmente de acuerdo.
 ¿Cree que es un inconveniente el que aún se necesite refrigeración en los sistemas para su funcionamiento?
 (Solo conteste en el apartado de su grupo)

No estoy de acuerdo 1 2 3 4 5 6 7 Totalmente de acuerdo

Oficiales

Figura 34 Encuesta pregunta 1. Elaboración propia.



Oficiales

Suboficiales

Tropa

INTA

Valore la siguiente pregunta de 1 a 7, siendo 1 no estoy de acuerdo y 7 totalmente de acuerdo.

¿Cree que es un inconveniente el que aún se necesite refrigeración en los sistemas para su funcionamiento?

(Solo conteste en el apartado de su grupo)

No estoy de acuerdo Totalmente de acuerdo

1 2 3 4 5 6 7

Oficiales

Suboficiales

Tropa

INTA

Valore la siguiente pregunta de 1 a 7, siendo 1 no estoy de acuerdo y 7 totalmente de acuerdo.

¿Cree que la implementación de un FPA no refrigerado beneficiaría al sistema?

(Solo conteste en el apartado de su grupo)

Figura 35 Encuesta pregunta 2. Elaboración propia.

Tropa

INTA

Valore la siguiente pregunta de 1 a 7, siendo 1 no estoy de acuerdo y 7 totalmente de acuerdo.

¿Cree qué la implementación de un FPA no refrigerado beneficiaría al sistema?

(Solo conteste en el apartado de su grupo)

No estoy de acuerdo Totalmente de acuerdo

1 2 3 4 5 6 7

Oficiales

Suboficiales

Tropa

INTA

El precio de un sistema no refrigerado reduce considerablemente el precio del sistema.

Valore las siguientes preguntas de 1 a 7, siendo 1 no estoy de acuerdo y 7 totalmente de acuerdo.

(Solo conteste en el apartado de su grupo)

Figura 36 Encuesta pregunta 3. Elaboración propia.



Tropa

INTA

El precio de un sistema no refrigerado reduce considerablemente el precio del sistema.

Valore las siguientes preguntas de 1 a 7, siendo 1 no estoy de acuerdo y 7 totalmente de acuerdo.

(Solo conteste en el apartado de su grupo)

¿Cree que la adquisición de este seeker ayudaría a abaratar el producto final?

No estoy de acuerdo Totalmente de acuerdo

1 2 3 4 5 6 7

Oficiales

Suboficiales

Tropa

INTA

¿Cree que con ese dinero se podría aumentar las capacidades del sistema actual ?.

Valore las siguientes preguntas de 1 a 7, siendo 1 no estoy de acuerdo y 7 totalmente de acuerdo.

(Solo conteste en el apartado de su grupo)

Figura 37 Encuesta pregunta 4. Elaboración propia.

Suboficiales

Tropa

INTA

¿Cree que con ese dinero se podría aumentar las capacidades del sistema actual ?.

Valore las siguientes preguntas de 1 a 7, siendo 1 no estoy de acuerdo y 7 totalmente de acuerdo.

(Solo conteste en el apartado de su grupo)

No estoy de acuerdo Totalmente de acuerdo

1 2 3 4 5 6 7

Oficiales

Suboficiales

Tropa

INTA

Al eliminar de la ecuación la limitación que implica la necesidad de refrigeración por parte del sistema.

Valore las siguientes preguntas de 1 a 7, siendo 1 no estoy de acuerdo y 7 totalmente de acuerdo.

¿Cree que no tener limitación de tiempo para la adquisición del objetivo aumenta la calidad del enganche?

Figura 38 Encuesta pregunta 5. Elaboración propia.



Tropa

INTA

Al eliminar de la ecuación la limitación que implica la necesidad de refrigeración por parte del sistema.

Valore las siguientes preguntas de 1 a 7, siendo 1 no estoy de acuerdo y 7 totalmente de acuerdo.

¿Cree que no tener limitación de tiempo para la adquisición del objetivo aumenta la calidad del enganche?

(Solo conteste en el apartado de su grupo)

	No estoy de acuerdo	1	2	3	4	5	6	7	Totalmente de acuerdo
Oficiales									
Suboficiales									
Tropa									
INTA									

¿Cree que sin la limitación de tiempo se debería mejorar en un futuro las prestaciones del misil ?.

(Solo conteste en el apartado de su grupo)

	No estoy de acuerdo	1	2	3	4	5	6	7	Totalmente de acuerdo
Oficiales									
Suboficiales									
Tropa									
INTA									

Figura 39 Encuesta pregunta 6. Elaboración propia.

Suboficiales

Tropa

INTA

¿Cree que sin la limitación de tiempo se debería mejorar en un futuro las prestaciones del misil ?.

(Solo conteste en el apartado de su grupo)

	No estoy de acuerdo	1	2	3	4	5	6	7	Totalmente de acuerdo
Oficiales									
Suboficiales									
Tropa									
INTA									

Con la implementación del seeker FPA no refrigerado eliminamos parte del peso del sistema.

Sabiendo esto conteste las siguientes preguntas:

Valore las siguientes preguntas de 1 a 7, siendo 1 no estoy de acuerdo y 7 totalmente de acuerdo.

¿Cree que se podría aumentar el alcance del misil?.

Figura 40 Encuesta pregunta 7. Elaboración propia.



Tropa

INTA

Con la implementación del seeker FPA no refrigerado eliminamos parte del peso del sistema.

Sabiendo esto conteste las siguientes preguntas:

Valore las siguientes preguntas de 1 a 7, siendo 1 no estoy de acuerdo y 7 totalmente de acuerdo.

¿Cree qué se podría aumentar el alcance del misil?

(Solo conteste en el apartado de su grupo)

	No estoy de acuerdo	1	2	3	4	5	6	7	Totalmente de acuerdo
Oficiales									
Suboficiales									
Tropa									
INTA									

Valore las siguientes preguntas de 1 a 7, siendo 1 no estoy de acuerdo y 7 totalmente de acuerdo.

¿Cree qué se podría aumentar la velocidad del misil para evitar la capacidad de contramedidas por parte de las

Figura 41 Encuesta pregunta 8. Elaboración propia.

Tropa

INTA

Valore las siguientes preguntas de 1 a 7, siendo 1 no estoy de acuerdo y 7 totalmente de acuerdo.

¿Cree qué se podría aumentar la velocidad del misil para evitar la capacidad de contramedidas por parte de las aeronaves?

(Solo conteste en el apartado de su grupo)

	No estoy de acuerdo	1	2	3	4	5	6	7	Totalmente de acuerdo
Oficiales									
Suboficiales									
Tropa									
INTA									

Valore las siguientes preguntas de 1 a 7, siendo 1 no estoy de acuerdo y 7 totalmente de acuerdo.

¿Cree qué serviría aumentar la carga de guerra?

(Solo conteste en el apartado de su grupo)

Figura 42 Encuesta pregunta 9. Elaboración propia.



La imagen muestra una encuesta digital en un dispositivo tablet. La encuesta está dividida en secciones para diferentes grupos: Tropa y INTA. Cada grupo tiene una barra de progreso. La pregunta principal es: "¿Cree qué serviría aumentar la carga de guerra?". Se indica que se debe contestar en el apartado de su grupo. La escala de respuesta va de 1 a 7, donde 1 es "No estoy de acuerdo" y 7 es "Totalmente de acuerdo". Hay cuatro barras de respuesta para Oficiales, Suboficiales, Tropa y INTA. En la parte inferior hay un botón de retroceso y un botón "Done".

Figura 43 Encuesta pregunta 10. Elaboración propia.



Anexo II: Resultados de la encuesta.

Los resultados obtenidos de la encuesta realizada están expresados en forma de tabla en la que se desarrolla según su escala o grupo y el valor de cada una de las respuestas ofrecidas.

Caracterización de la muestra:

Escala de Oficiales											
¿A qué escala pertenece?	¿Cuántos años de servicio?	Pregunta 1	Pregunta 2	Pregunta 3	Pregunta 4	Pregunta 5	Pregunta 6	Pregunta 7	Pregunta 8	Pregunta 9	Pregunta 10
Escala de Oficiales	> 10	7	6	6	7	6	7	6	5	4	3
Escala de Oficiales	> 10	7	7	7	6	6	6	6	6	6	6
Escala de Oficiales	1-2	6	7	6	5	5	4	5	5	5	4
Media		6,666667	6,666667	6,333333	6	5,666667	5,666667	5,666667	5,333333	5	4,333333

Tabla 10 Resultados encuesta oficiales. Elaboración propia.

Escala de Suboficiales											
¿A qué escala pertenece?	¿Cuántos años de servicio?	Pregunta 1	Pregunta 2	Pregunta 3	Pregunta 4	Pregunta 5	Pregunta 6	Pregunta 7	Pregunta 8	Pregunta 9	Pregunta 10
Escala de Suboficiales	2-4	5	5	7	6	5	6	7	6	6	2
Escala de Suboficiales	6-8	6	6	6	7	6	5	7	6	6	5
Escala de Suboficiales	> 10	7	7	7	6	6	7	7	6	6	5
Escala de Suboficiales	2-4	5	5	4	5	6	5	6	7	6	6
Escala de Suboficiales	< 1	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Escala de Suboficiales	8-10	6	7	6	5	6	5	5	5	5	6
Escala de Suboficiales	4-6	5	5	5	4	5	4	4	5	5	5
Escala de Suboficiales	6-8	6	6	6	5	4	5	5	5	5	5
Media		5,875	6	6	5,625	5,625	5,5	6	5,875	5,75	5,125

Tabla 11 Resultados encuesta suboficiales. Elaboración propia.

Personal INTA											
¿A qué escala pertenece?	¿Cuántos años de servicio?	Pregunta 1	Pregunta 2	Pregunta 3	Pregunta 4	Pregunta 5	Pregunta 6	Pregunta 7	Pregunta 8	Pregunta 9	Pregunta 10
Personal INTA	> 10	6	7	7	5	6	5	5	5	6	4
Personal INTA	8-10	6	6	6	6	7	5	6	6	6	6
Personal INTA	> 10	6	7	5	6	7	7	6	6	7	5
Media		6	6,666667	6	5,666667	6,666667	5,666667	5,666667	5,666667	6,333333	5

Tabla 12 Resultados encuesta personal civil INTA. Elaboración propia.



Escala de Tropa y Marinería											
¿A qué escala pertenece?	¿Cuántos años de servicio?	Pregunta 1	Pregunta 2	Pregunta 3	Pregunta 4	Pregunta 5	Pregunta 6	Pregunta 7	Pregunta 8	Pregunta 9	Pregunta 10
Tropa y marinería	< 1	5	5	7	6	7	5	7	6	5	3
Tropa y marinería	< 1	7	6	6	5	6	4	6	4	4	4
Tropa y marinería	> 10	5	7	6	5	5	6	5	6	5	2
Tropa y marinería	1-2	4	1	4	6	6	5	7	5	4	3
Tropa y marinería	2-4	3	6	7	6	7	5	6	5	6	3
Tropa y marinería	8-10	3	5	6	7	6	5	6	5	7	6
Tropa y marinería	< 1	6	7	6	5	4	4	4	4	4	4
Tropa y marinería	< 1	6	3	3	4	5	4	3	4	3	3
Tropa y marinería	1-2	5	6	5	7	7	6	6	6	6	1
Tropa y marinería	< 1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4
Tropa y marinería	2-4	6	7	7	6	6	6	6	6	6	6
Tropa y marinería	< 1	6	5	5	6	6	5	7	5	4	4
Tropa y marinería	< 1	6	5	7	6	6	7	6	7	6	5
Tropa y marinería	1-2	6	6	5	6	7	5	6	6	5	4
Tropa y marinería	2-4	7	6	7	6	5	5	6	6	6	6
Tropa y marinería	4-6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Tropa y marinería	< 1	5	4	4	5	5	5	5	5	5	5
Tropa y marinería	1-2	5	6	7	7	7	7	7	7	7	7
Tropa y marinería	1-2	5	6	5	6	6	6	5	5	6	4
Tropa y marinería	4-6	5	6	6	6	6	5	6	6	6	6
Tropa y marinería	6-8	6	6	6	6	5	5	5	6	5	5
Tropa y marinería	1-2	5	6	7	6	6	5	7	5	6	4
Tropa y marinería	> 10	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6
Tropa y marinería	6-8	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Tropa y marinería	< 1	5	6	6	5	7	6	5	6	7	5
Tropa y marinería	2-4	6	7	6	6	7	6	6	6	6	7
Media		5,3846	5,5769	5,8077	5,8077	5,9615	5,3846	5,7692	5,5385	5,4615	4,5385

Tabla 13 Resultados encuesta personal tropa y marinería. Elaboración propia.



Análisis de las preguntas

A continuación, los resultados obtenidos en la encuesta se muestran según el valor obtenido en la escala Likert, quedando de la siguiente forma:

Capacidades técnicas DAA

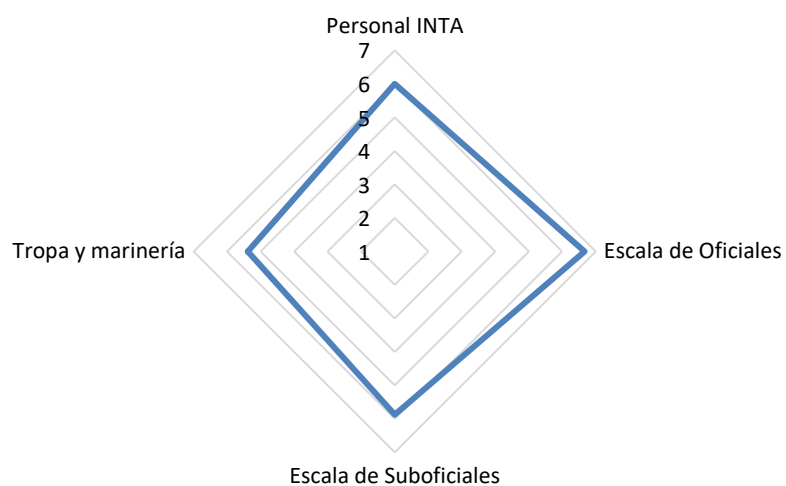


Gráfico 3 Gráfica araña capacidades técnicas DAA. Elaboración propia.

Necesidad de refrigeración

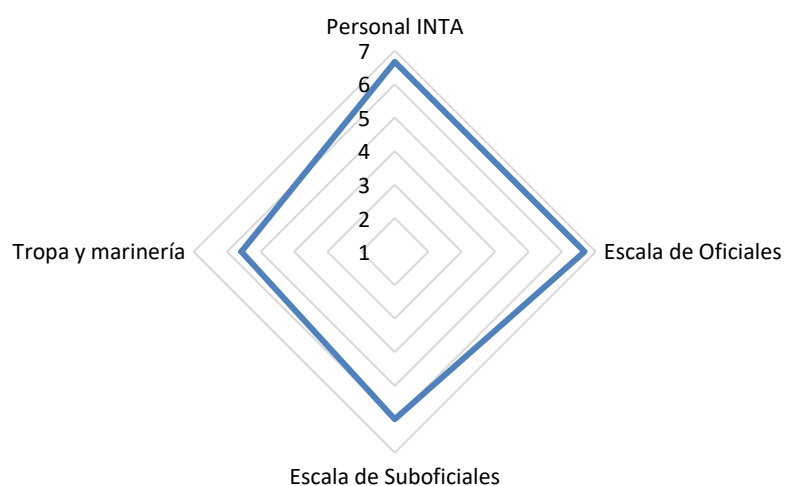


Gráfico 4 Gráfica araña necesidad de refrigeración. Elaboración propia.



Beneficios FPA no refrigerado

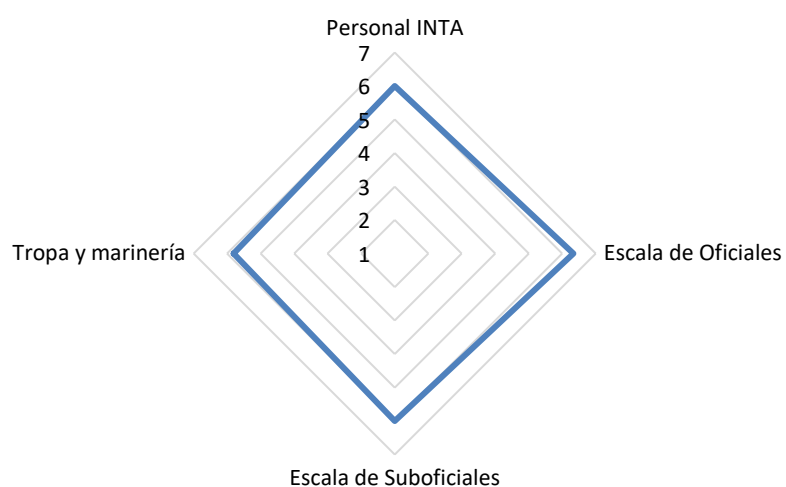


Gráfico 5 Gráfica araña beneficios FPA no refrigerado. Elaboración propia.

Abaratamiento por seeker no refrigerado

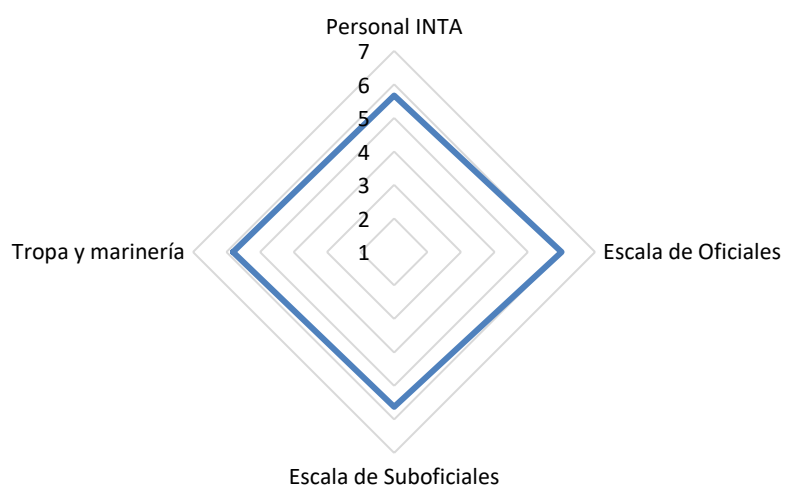


Gráfico 6 Gráfica araña abaratamiento por seeker no refrigerado. Elaboración propia.



Posibilidad de empleo de ahorros en mejoras

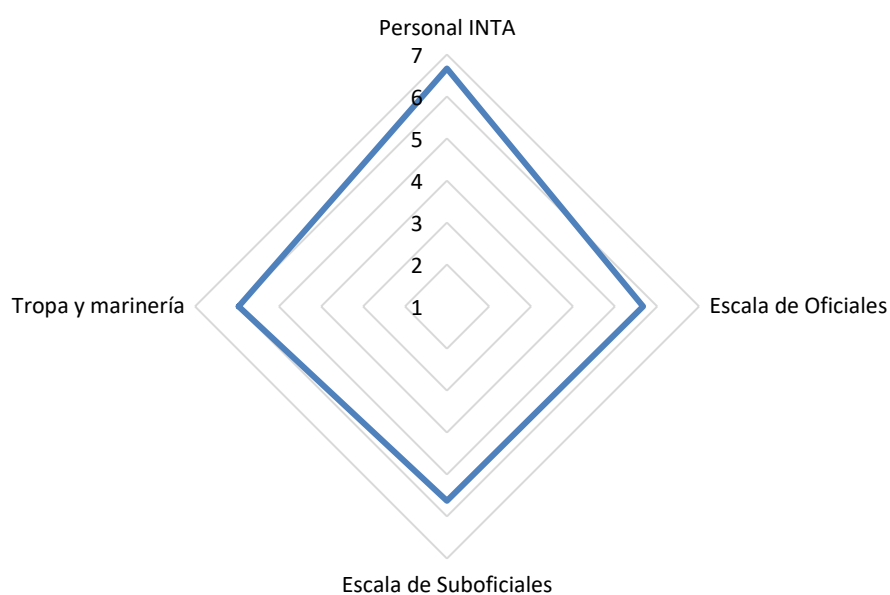


Gráfico 7 Gráfica araña posibilidad de empleo de ahorros en mejoras. Elaboración propia.

- Aumento de la calidad del enganche (disminución t)
- Mejora de las prestaciones (asumido t)

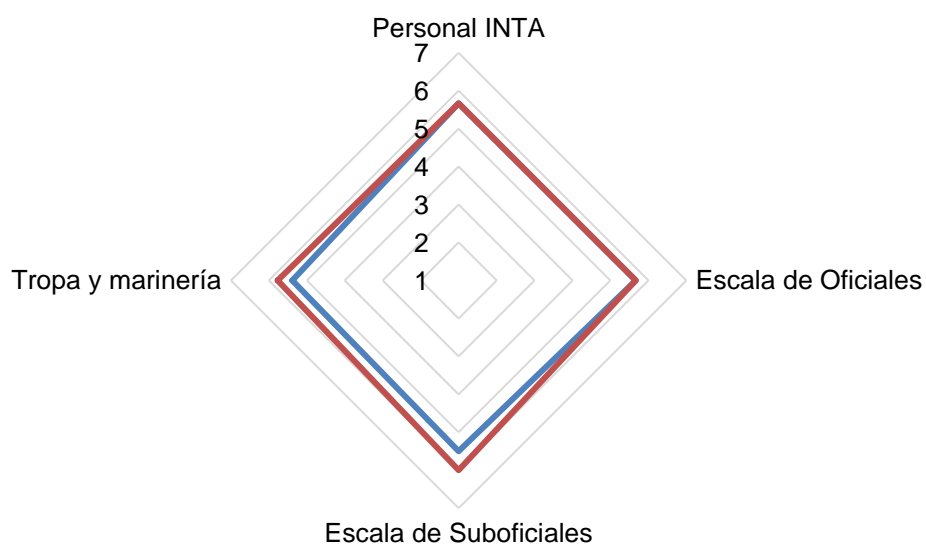


Gráfico 8 Gráfica araña preguntas 6 y 7. Elaboración propia.

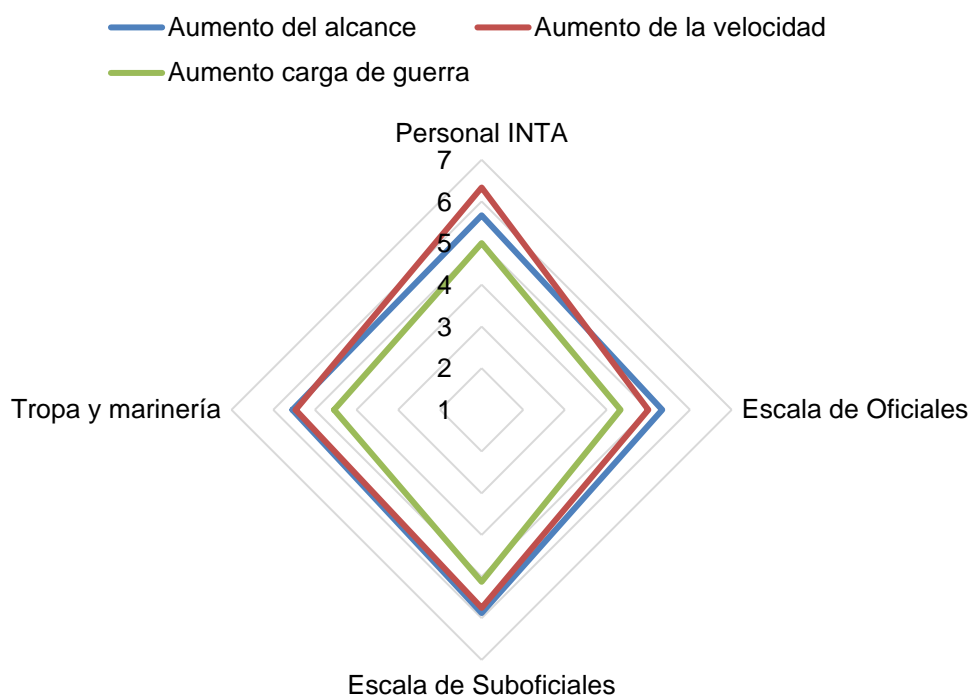


Gráfico 9 Gráfica araña preguntas 8,9 y 10. Elaboración propia.



Anexo III: Patentes

De las patentes se han conseguido resaltar frases que han aportado información sobre los microbolómetros. Se van a detallar de manera entrecomillada algunas descripciones:

- *“Se utilizan ampliamente bolómetros para detectar baja radiación de luz, generalmente en la banda IR. En la mayoría de los casos convencionales, los bolómetros están dispuestos en forma de una matriz de plano focal (FPA), donde la matriz incluye una pluralidad de elementos detectores individuales”.*(Mizrahi et al., 2006, p. 2)
- *“Se utilizan ampliamente resistencias de Vox (óxido de vanadio) en bolómetros típicos, puesto que el Vox tiene un TCR (coeficiente de resistencia a la temperatura) relativamente grande, y baja contribución 1/f”.*(Mizrahi et al., 2006, p. 2)
- *“Incluso aunque se use un puente Wheatstone que realice una medición diferencial, las FPA no enfriadas de la técnica anterior del tipo de bolómetro todavía son muy sensibles a las variaciones de la temperatura ambiente, y se requiere circuitería de compensación especial para compensación en el nivel de píxel de FPA”.*(Mizrahi et al., 2006, p. 2)
- *“De manera preferente, la matriz de plano focal se forma sobre un CMOS o circuito integrado de transistor de película fina (TFT)”.*(LIDDIARD, 2006, p. 3)
- *“De manera preferente, el detector infrarrojo con microbolómetro comprende material termosensible seleccionado entre, pero no limitado a, un silicio nano cristalino o amorfo dopado o no dopado o aleación de silicio”.*(LIDDIARD, 2006, p. 3)
- *“De manera preferente, dicho sensor de seguridad infrarrojo utiliza un material de microbolómetro que tiene mayor coeficiente de temperatura de resistencia”.*(LIDDIARD, 2006, p. 3)
- *“De manera preferente, dicho sensor de seguridad infrarrojo incluye además un medio de almacenamiento para guardar señales de la matriz”.*(LIDDIARD, 2006, p. 4).
- *“In some embodiments of the present invention, the array of active photodetectors comprises at least 1280x1024 active photodetectors at a pitch of 10 micrometers, and preferably comprises about 1920x1536 active photodetectors at a pitch of 10 micrometers”.* (KARNI, 2006, p. 11)



Anexo IV: Guion entrevista

Para la entrevista se detalló un guion escrito que tiene como finalidad la obtención de datos a través de la interrogación.

Con la entrevista cualitativa se busca acceder a la individualidad del entrevistado, saber acerca de su propia visión, sus impresiones e interpretaciones. En este caso la entrevista se ha realizado mediante una conversación con una finalidad cognoscitiva. Se trata de una entrevista semiestructurada con un guion con los temas a tratar con orden y formulación flexibles. A continuación, se relaciona el guion seguido para la entrevista:

- Sistema de guiado actuales en las FAS:
 - Estudio de la tecnología
 - Trabajo especializado en el INTA
 - Materiales en uso
 - Uso de la tecnología CCMIR
 - Ventajas e inconvenientes
- Detectores FPA no refrigerados:
 - ¿Posible innovación?
 - Rentabilidad
 - Microbolómetros u otros tipos de sensores
 - Ventajas e inconvenientes
 - Alcance de la evolución
- Visión de futuro:
 - Microespejos