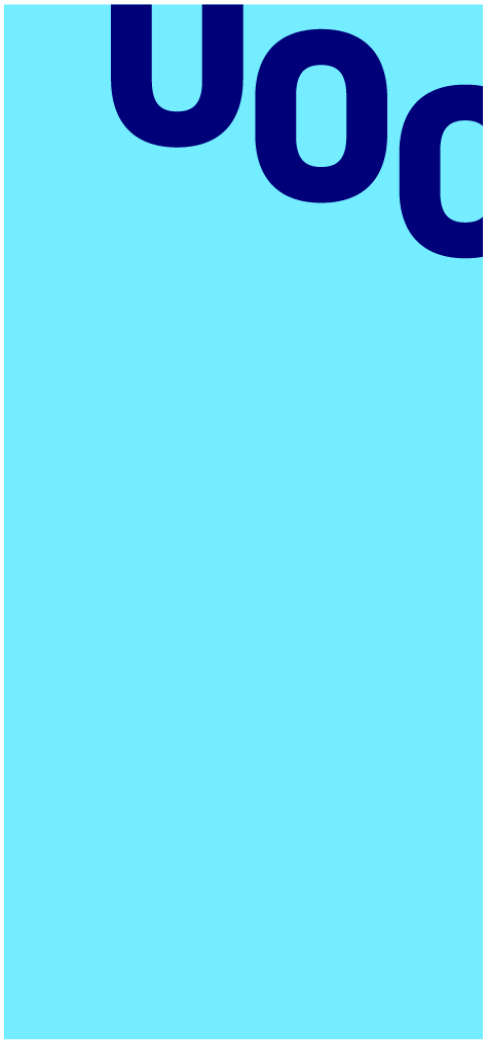
# Análisis de la aplicación de machine learning en sistemas de defensa.



Universitat Oberta de Catalunya

**Nombre Estudiante**
Evaldo Jorge Alcántara Suárez

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Área de Sistemas de Comunicación

**Tutor de TF**
Doctor D. Víctor Monzón Baeza

**Profesor responsable de la asignatura**
Doctor D. Carlos Monzo Sánchez

**Fecha de entrega**
09 de enero de 2023

Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 España de Creative Commons

# Ficha del Trabajo Final

| | |
|---|---|
| **Título del trabajo:** | Análisis de la aplicación de machine learning en sistemas de defensa. |
| **Nombre del autor:** | Evaldo Jorge Alcántara Suárez |
| **Nombre del Tutor de TF:** | Doctor D. Víctor Monzón Baeza |
| **Nombre del/de la PRA:** | Doctor D. Carlos Monzo Sánchez |
| **Fecha de entrega:** | 01/2023 |
| **Titulación o programa:** | Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación |
| **Área del Trabajo Final:** | Sistemas de Comunicación |
| **Idioma del trabajo:** | Castellano |
| **Palabras clave** | Machine Learning – Defensa – Entornos tácticos militares |

**Resumen del Trabajo**

El machine learning, según la investigación y el análisis realizado de la literatura, se aplica ya, entre otros, en sectores como: el sanitario, para diagnósticos por imagen; el de ocio, algoritmo de Netflix para recomendar contenido a clientes; y el del hogar, en los robots Alexa o Siri con sus reconocimientos de voz. Consecuencia de ello, es evidente la importancia de analizar su uso y aplicación en sistemas militares debido a que, en un futuro no muy lejano, esta tecnología marcará la diferencia en el campo de batalla.

Países como Estados Unidos o China son punteros en el desarrollo de proyectos militares de este tipo y realizan una fuerte inversión económica en I+D+i. En contra partida, la Unión Europea y España financian pocas investigaciones, aunque gradualmente van aumentando. En este TFM se analizan, como ejemplo, el desarrollo de alguno de esos proyectos que se están financiando y la evolución de varios sistemas militares como radares, direcciones de tiro, vehículos no tripulados y sistemas de vigilancia, para posteriormente, identificar el valor añadido que aporta la aplicación de esta tecnología en estos sistemas y los posibles usos en operaciones tácticas.

Por último, tras realizar una extensa revisión de referencias relacionadas con defensa y ML, se presentan los resultados obtenidos del análisis, donde se

destaca la escasez de artículos sobre el asunto, una serie de desafíos a superar, una guía de aplicación de ML para nuevos proyectos de defensa y el impacto económico, legal y ético que está presentado esta herramienta.

**Abstract**

Machine learning, according to the research and analysis of the literature, is already applied, among others, in sectors such as: healthcare, for image diagnostics; entertainment, Netflix algorithm to recommend content to customers; and the home, with Alexa or Siri robots and their voice recognition. As a result, it is clearly important to analyze its use and application in military systems because, in the not too distant future, this technology will make a difference on the battlefield.

Countries such as the United States and China are at the forefront in the development of military projects of this type and are investing heavily in R&D and innovation. On the other hand, the European Union and Spain finance little research, although it is gradually increasing. In this TFM is analyzed, as an example, the development of some of these projects that are being funded and the evolution of several military systems such as radars, firing directions, unmanned vehicles and surveillance systems, to subsequently identify the added value provided by the application of this technology in these systems and the possible uses in tactical operations.

Finally, after an extensive review of references related to defense and ML, the results obtained from the analysis are presented, highlighting the scarcity of articles on the subject, a series of challenges to overcome, a guide to the application of ML for new defense projects and the economic, legal and ethical impact of this tool.

# Índice

1. Introducción 3
1.1. Contexto y justificación del Trabajo 3
1.2. Objetivos del Trabajo 5
1.3. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad 6
1.4. Enfoque y método seguido 7
1.5. Planificación del trabajo 8
1.6. Breve sumario de productos obtenidos 9
1.7. Breve descripción de otros capítulos de la memoria 10
2. Estado del arte 2
2.1. Evolución de sistemas militares y aplicación de machine learning. 2
2.1.1. Sistemas de Información en entornos tácticos. 3
2.1.2. Sistemas de Vigilancia por Imágenes. 3
2.1.3. Sistemas de Guerra Electrónica. 4
2.1.4. Sistemas Radar. 6
2.1.5. Sistemas de Dirección de Tiro y Armas. 7
2.1.6. Sistemas No Tripulados. 8
2.1.7. Sistemas de Gestión de Mantenimiento de Unidades y Logística. 9
2.2. Inteligencia Artificial (IA). 11
2.2.1. Niveles de inteligencia. 11
2.2.2. Método para lograr la IA. 12
2.2.3. Machine learning y tipos de aprendizaje. 14
2.3. Presentación de una selección de proyectos de defensa que aplican ML. 16
2.3.1. Proyecto Cobra. 17
2.3.2. Proyecto SEDA 17
2.3.3. Proyecto SOPRENE 18
2.3.4. Proyecto GIDE 19
2.3.5. Proyecto ATLAS 20
3. Análisis de la aplicación de ML desde una perspectiva militar. 21
3.1. Selección de aplicación de ML en defensa. 21
3.2. Descripción del método de evaluación. 21
3.2.1. Criterio/círculo azul: Datos generales. 22

3.2.2. Criterio/círculo verde: Valoración de factores decisivos al desarrollar productos con ML en entornos tácticos militares. 23
3.2.3. Criterio/círculo amarillo: Valoración de áreas militares afectadas. 27
3.3. ML aplicado a los Sistemas de Información en entornos tácticos. 31
3.4. ML aplicado a Sistemas de Guerra Electrónica. 36
3.5. ML aplicado a Sistemas Radar. 40
3.6. ML aplicado a Sistemas de Dirección de Tiro y Armas. 43
3.7. ML aplicado a Sistemas No Tripulados. 45
3.8. ML aplicado a Sistemas de Vigilancia por Imágenes. 47
3.9. ML aplicado a Sistemas de Gestión de Mantenimiento de Unidades y Logística. 49
4. Productos derivados del análisis 52
4.1. Resultados del análisis. 52
4.2. Desafíos identificados tras analizar las referencias seleccionadas de ML en defensa. 55
4.3. Brainstorming o guía para el desarrollo de nuevos proyectos de ML en entornos militares. 59
4.4. Impacto del machine learning en defensa. 61
4.4.1. Marco Legal 62
4.4.2. Ético 63
4.4.3. Impacto económico. 64
4. Conclusiones y trabajos futuros 67
5. Glosario 69
6. Bibliografía 71

# Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama de GANT del TFM. 9
Figura 2. Sistemas de defensa seleccionados 2
Figura 3. Módulos de RIGEL ES and EA Systems [13]. 5
Figura 4. Nomenclatura frecuencias IEEE vs OTAN y equipos de radar operacionales [14]. 5
Figura 5. Descripción general del sistema AN/SPY-6 [18]. 6
Figura 6. Pedestal radar con sensores de dirección de tiro DORNA-2 [20] y cañón Oto-Melara 76mm [21]. 8
Figura 7. Esquema terminología dron [22]. 8
Figura 8. Ejemplos de UASs 9
Figura 9. Programas de transformación industrial y de innovación desarrollados en CESADAR [28]. 10
Figura 10. Niveles de inteligencia 11
Figura 11. Método que usa la IA 12
Figura 12. Tipos de ML 14
Figura 13. Clasificación de ML 15
Figura 14. Proyectos de ML seleccionados 16
Figura 15. Captura de pantalla de video de proyecto SEDA en Youtube [43]. 18
Figura 16. Herramientas empleadas para el análisis de referencias de ML. 22
Figura 17. Datos generales de las referencias 22
Figura 18. Valoración de factores decisivos al aplicar ML en entornos tácticos militares. 24
Figura 19. Valoración de áreas militares al aplicar ML en entornos tácticos militares. 27
Figura 20. Productos derivados del análisis 52
Figura 21. Proceso de análisis de la literatura. 53
Figura 22. Sistemas de defensa y referencias analizadas. 54
Figura 23. Desventajas, desafíos y ventajas de aplicar ML en entornos militares 55
Figura 24. Técnicas de ML empleadas en las referencias. 59
Figura 25. Guía para nuevos proyectos de ML en sistemas de defensa 60

# Lista de Tablas

Tabla 1. Relación de sistemas y referencias. ..... 21
Tabla 2. ML aplicado a los Sistemas de Información en entornos tácticos (1 de 3). ..... 33
Tabla 3. ML aplicado a los Sistemas de Información en entornos tácticos (2 de 3). ..... 34
Tabla 4. ML aplicado a los Sistemas de Información en entornos tácticos (3 de 3). ..... 36
Tabla 5. ML aplicado a Sistemas de Guerra Electrónica (1 de 2). ..... 38
Tabla 6. ML aplicado a Sistemas de Guerra Electrónica (2 de 2). ..... 39
Tabla 7. ML aplicado a Sistemas Radar (1 de 2). ..... 41
Tabla 8. ML aplicado a Sistemas Radar (2 de 2). ..... 43
Tabla 9. ML aplicado a Sistemas de Dirección de Tiro y Armas. ..... 45
Tabla 10. ML aplicado a Sistemas No Tripulados. ..... 47
Tabla 11. ML aplicado a Sistemas de Vigilancia por Imágenes. ..... 49
Tabla 12. ML aplicado a Sistemas de Gestión de Mantenimiento de Unidades y Logística. ..... 51
Tabla 13. Ejemplo de desafío sobre training data ..... 59
Tabla 14. Ejemplo de aplicación de la guía ML ..... 61
Tabla 15. Impacto económico ML en defensa (proyecto vs adjudicación económica) ..... 66

# 1. Introducción

## 1.1. Contexto y justificación del Trabajo

La Inteligencia Artificial (IA) es un término muy popular en las últimas décadas. Es un término del que se escucha hablar frecuentemente incluso fuera de la comunidad científica y del que muchas personas desconocen sus diferentes ramas. Una de ellas es el Machine Learning (ML) o aprendizaje máquina, con sus distintos tipos de aprendizaje, entre los que habría que destacar el Deep Learning (DL). A diferencia de la programación clásica, gracias a los avances tecnológicos, al aumento de las capacidades computacionales y a la recopilación de datos (Big Data), es posible nutrir a un sistema con una serie de "inputs" en masa con resultados asociados y que éste aprenda generando un algoritmo que describa esa relación y que use para intentar predecir estadísticamente la posibilidad de suceso de escenarios futuros.

Hoy en día existen muchas empresas de reconocido prestigio como Google, Netflix, Amazon, Twitter, Facebook, IBM, Apple, Microsoft, Oracle y un largo etcétera, que invierten enormes cantidades de recurso económico en esta tecnología para analizar los perfiles de los clientes y obtener nuevos productos de mercado. Por ejemplo, la compañía Netflix analiza todas las búsquedas que realiza el usuario para aprender sobre ello y ofrecerle en la pantalla de inicio de este servicio de streaming un contenido que esté acorde a sus preferencias. También se puede poner de ejemplo el robot Alexa de Amazon cuyo dispositivo graba tu voz, la envía a través de Internet a Alexa Voice Services de Amazon (nube) para analizar la grabación en comandos que entienda (aquí está realmente el ML) y, posteriormente, el sistema envía la salida relevante al dispositivo con lo que el usuario ha solicitado. En sectores como el sanitario también se puede destacar proyectos desarrollados por Microsoft como el proyecto "Inner Eye", cuya función es ayudar a los oncólogos a definir el tratamiento más eficaz para el paciente, o el proyecto "Bio Model Analyzer" que es una herramienta cloud que permite a los biólogos modelar cómo interactúan las células y poder así diseñar medicamentos más efectivos para el cáncer.

Vista la idea básica de funcionamiento del ML y visto el uso que las grandes empresas le están dando hoy día en diversos campos, en este TFM se analiza en qué proyectos relacionados con la defensa de un país se está haciendo uso de esta tecnología y se plantea en qué otros podrían hacerse. Entiéndase que cuando se habla de la defensa de un país o de una guerra no solo hay que pensar en esos hechos físicos con resultados destructivos de materiales tangibles. Hay que pensar también en ataques informáticos, hackeo de redes, terrorismo, alarma social de inseguridad, piratería, inmigración descontrolada, amenazas provenientes del espacio y cualquier otra acción u omisión que provoque una situación de hostilidad de ámbito nacional. Como puede apreciarse, todos estos escenarios son de índole muy diferente y por

tanto es ésta una de las razones por las que surge la necesidad de estudiar en qué podría contribuir el ML en el sector de defensa y realizar una tabla modelo de análisis, así como una guía para el desarrollo de nuevos proyectos. Es un asunto de relativa importancia ya que el ML, a priori, puede aportar una infinidad de ventajas tácticas, como podrían ser:

- Alertar y prevenir de futuras incidencias en base a datos que se han recibido y analizado.
- Aportar información extraordinaria y útil a los mandos operativos para que tomen las mejores decisiones posibles y con menores riesgos.
- Simular posibles escenarios de guerra ofreciendo un resultado estadístico de victoria o derrota.
- Mostrar formas de combatir ciertos ataques en base a la experiencia adquirida.
- Crear máquinas de guerra autónomas.
- Mejorar los sistemas de guerra existentes.

Desde hace algunos años, países como Estados Unidos y China están financiando con miles de millones de dólares de fondo público proyectos con machine learning en el sector de defensa pero, al ser un tema tan amplio y con tantas posibilidades, frecuentemente, surgen nuevas aportaciones y posibilidades de implementación. Podría decirse que estas dos grandes naciones fueron y continúan siendo pioneros en el desarrollo y aplicación de esta tecnología en sus entornos tácticos militares. Por otra parte, Europa y España están comenzado con la inversión y las investigaciones, pero les queda un largo camino por recorrer. Como ejemplo, España en los últimos 3 años ha invertido unos 9 millones de euros en este tipo de proyectos y Estados Unidos, tan solo en el año 2017, invirtió sobre los 2.700 millones de dólares.

Con este TFM se pretende dar una visión general de la aplicación del machine learning en los ejércitos, los desafíos que existen, la evolución de algunos sistemas militares y cómo podrían mejorarse con esta tecnología, presentar algunos proyectos de I+D+i nacionales que ya se están investigando, ver el impacto económico, legal y ético que ha supuesto y, finalmente, presentar un modelo de tabla de análisis y una guía para creación de nuevos proyectos.

## 1.2. Objetivos del Trabajo

Los principales objetivos de este Trabajo Final de Máster (TFM) son los expuestos a continuación:

1) **Analizar la introducción de ML en los sistemas de defensa.**

   En este objetivo se pretende exponer las ventajas e inconvenientes que tiene utilizar ML en los sistemas de militares de defensa. Para ello se definen los siguiente subjetivos:

   a. Recopilar información sobre proyectos recientes, preferiblemente financiados por el Ministerio de Defensa de España.
   b. Identificar los desafíos que puede presentar la aplicación del ML.
   c. Analizar la evolución y las necesidades de innovación de los siguientes sistemas:
      i. Información en entornos tácticos.
      ii. Vigilancia por imágenes.
      iii. Guerra electrónica.
      iv. Radar
      v. Dirección de tiro y armas.
      vi. Vehículos no tripulados.
      vii. Gestión del mantenimiento de unidades.

2) **Diseñar un modelo de tabla para analizar referencias de ML en defensa.**

   Estudiadas las posibles aplicaciones, la extensión de esta tecnología y el aumento de estudios que se está produciendo en los últimos años, es necesario elaborar un modelo de tabla de análisis de ML para aplicaciones en entornos tácticos. Para ello, hay que cubrir los subjetivos expuestos a continuación:

   a. Analizar la literatura de los proyectos actuales y referencias emergentes.
   b. Identificar los tipos de aprendizajes empleados en cada proyecto.
   c. Identificar el sistema de defensa donde aplicar la técnica.
   d. Identificar qué factores son decisivos para una aplicación bélica útil.
   e. Identificar los casos de uso de ML en operaciones tácticas:
      i. Estrategias de guerra en conflictos armados.
      ii. Apoyo en las decisiones del mando.
      iii. Ciberseguridad.
      iv. Inteligencia Militar.
      v. Planes de mantenimiento de unidades.
      vi. Nuevas construcciones de unidades.
      vii. Operaciones aéreas.
      viii. Operaciones terrestres.
      ix. Operaciones navales.
      x. Logística.
      xi. Entrenamiento de unidades.

3) **Exponer los productos derivados del análisis.**

Los subobjetivos a alcanzar, que componen este objetivo principal, serían los siguientes:

a. Mostrar las dimensiones del análisis con la cuantificación del estudio e indicar el procedimiento seguido para la selección de referencias. Destacar también la propuesta de referencias no específicamente militares que si se adaptaran a defensa podrían suponer una mejora de los sistemas.
b. Indicar los desafíos encontrados que habría que superar para una correcta aplicación de la técnica, sobre todo para los sistemas de información.
c. Diseñar una guía para nuevos desarrollos de ML en defensa
d. Averiguar qué aspectos legales hay que tener en cuenta a la hora de desarrollar un producto nuevo, qué cuestiones éticas se plantean y una aproximación de la inversión que realizan los países en esta materia. Por tanto, se cubre también:
    i. Analizar el marco regulador.
    ii. Analizar la ética de uso o “infoética”.
    iii. Analizar el impacto económico.

## 1.3. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad

La aplicación de ML en los sistemas de defensa tiene un impacto directo sobre estos tres factores. A continuación, se expone la relación con cada uno de ellos:

- **Sostenibilidad:** Países como EE.UU. o China han realizado una fuerte inversión económica en esta materia. Por otra parte, algunas investigaciones permiten realizar simulaciones de escenarios o afectan a áreas militares como el mantenimiento y la logística. Por tanto, si la técnica permite predecir qué recursos materiales harán falta en el campo de batalla o cómo enfrentarse a un determinado objetivo, esto repercutirá en un menor movimiento de tropas, un menor traslado de materiales o un mayor porcentaje de acierto en la estrategia de combate empleada. Por consiguiente, al reducir el personal, los materiales y el número de intentos de derribo por la particularización de la estrategia, el castigo al medioambiente se reduce, entre otros, por una menor contaminación y un menor consumo de recursos.

- **Ético-social:** El ML en sistemas bélicos puede materializarse en el arrebato de vidas humanas cuando los algoritmos de las propias máquinas son los encargados, de manera autónoma, de enfrentarse a una amenaza. Dado que este punto es de especial interés, se dedicará parte de un capítulo de este TFM a estudiar este factor.

- **Diversidad:** En este caso concreto de análisis, entiéndase por diversidad la variedad de sistemas militares a los que se puede aplicar esta técnica. Concretamente, se analizan referencias a 7 sistemas de distinta índole, todos ellos muy importantes para el ejército.

## 1.4. Enfoque y método seguido

La primera fase de este trabajo ha consistido en analizar la literatura existente, principalmente publicaciones del IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos), del ResearchGate, de Springer, de Sciencedirect y de otras instituciones de referencia que estuvieran relacionados con el machine learning y los entornos tácticos militares. A raíz de este "brainstorming" se comenzó con una primera clasificación de información en un documento Excel según los sistemas afectados y los entornos tácticos de aplicación. De forma paralela, también se buscó información sobre qué proyectos de I+D+i relacionados con el aprendizaje automático se estaban desarrollando en la industria española, concretamente que hubieran sido seleccionados por el programa COINCIDENTE (Cooperación en Investigación Científica y Desarrollo en Tecnologías Estratégicas) de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM) del Ministerio de Defensa, y qué otros proyectos se estaban financiando a nivel europeo, específicamente en el European Defence Industrial Development Programme (EDIDP). Aprovechando la sinergia de búsqueda, se fueron recopilando datos económicos de las inversiones realizadas a nivel español y europeo de esta tecnología en sistemas de defensa para posteriormente dedicarle un pequeño apartado en el TFM sobre el impacto económico ocasionado.

La siguiente fase consistió en recopilar "inputs" sobre la evolución tecnológica que han sufrido algunos sistemas y entornos tácticos militares para comprobar posteriormente cómo podrían ser mejorados con la aplicación del aprendizaje automático. Se ha buscado información sobre aquellos entornos desarrollados en España y algunos muy destacables a nivel internacional ya que son los que principalmente tienen cabida en este trabajo final de máster. Podría adelantarse que, en todos ellos, el origen del sistema solía basarse en un proceso manual de ejecución, luego por un proceso con tecnología analógica, a continuación se insertaron procesos computacionales analógicos muy limitados, posteriormente se evolucionó a sistemas digitales, inmediatamente después se trabajó con computadoras y procesos con mayores capacidades y, por último, se estaría ahora en la fase del Big Data y del aprendizaje de la máquina con el análisis de los datos recolectados, hasta el punto de poder llegar a crear máquinas autónomas.

Por otra parte, durante todos estos procesos de lectura de artículos y páginas webs, numerosas veces se recalcaba la importancia de la existencia de un marco regulador y de la ética en las decisiones tomadas por aquellos sistemas automáticos que funcionaran con aprendizaje automático. Es por ello por lo que se ha creído

conveniente incluir un apartado sobre esto debido a que, algunas decisiones en el ámbito militar podrían materializarse en muertes de personas.

Por último, a medida que se recopilaba información de las referencias, se percató de la necesidad de elaborar un modelo de tabla de análisis donde se pudieran recoger todos los datos que estuvieran relacionados con factores militares y poder identificar así carencias o potenciales. A raíz de esto, surgió la idea de realizar una presentación de los desafíos que habría que superar para una correcta aplicación de la técnica y una guía para el desarrollo de futuros proyectos.

## 1.5. Planificación del trabajo

Para lograr un correcto desarrollo de este trabajo, se han realizado las siguientes tareas:

- Tarea 1. Definición del TFM.
  Se ha dedicado un total de 13 días a:
  - Buscar información y profundizar conceptos sobre IA y ML.
  - Buscar información sobre entornos tácticos militares y sistemas de defensa.
  - Realizar una primera búsqueda de publicaciones sobre proyectos de ML aplicados a sistemas de defensa.
  - Desarrollar y redactar los puntos exigidos en la PEC1

- Tarea 2. Búsqueda y recopilación de datos sobre el “Estado del arte”.
  El tiempo dedicado a esta tarea ha sido de 16 días. Los hitos son:
  - Elaboración de un breve resumen teórico de IA, ML y tipos de aprendizaje.
  - Presentación de algunos proyectos militares desarrollados con ML como ejemplos.
  - Presentación de algunos sistemas militares y aplicación de ML.

- Tarea 3. Desarrollo del producto.
  La duración del producto conlleva un total de 53 días. Las subtareas a desarrollar son:
  - Exposición de una visión general de ML en entornos militares.
  - Estudio de desafíos que presenta la tecnología en el sector.
  - Diseño de tabla de análisis y conceptos a analizar.
  - Análisis de aplicaciones emergentes y artículos publicados.
  - Análisis de casos de uso de ML en operaciones tácticas.
  - Elaboración de guía para nuevos desarrollos.
  - Búsqueda de información sobre Marco legal, ético e impacto económico del ML en sistemas de defensa.
  - Exposición de resultados.
  - Elaboración de conclusiones

- Tarea 4. Elaboración de memoria final.
  El periodo comprendido de esta tarea va del 19 de diciembre de 2022 al 09 de enero de 2023, lo que supone un total de 22 días. Las subtareas a desarrollar son:
  - Redacción de memoria
  - Revisión de memoria

- Tarea 5. Defensa del TFM.
  El tiempo aproximado para esta tarea es de 9 días. Las acciones a realizar son:
  - Elaboración de presentación.
  - Presentación del TFM.

En la Figura 1 se representa un diagrama de Gant donde se indica la planificación seguida de las tareas más relevantes, con sus periodos de duración y sus fechas de inicio y de fin.

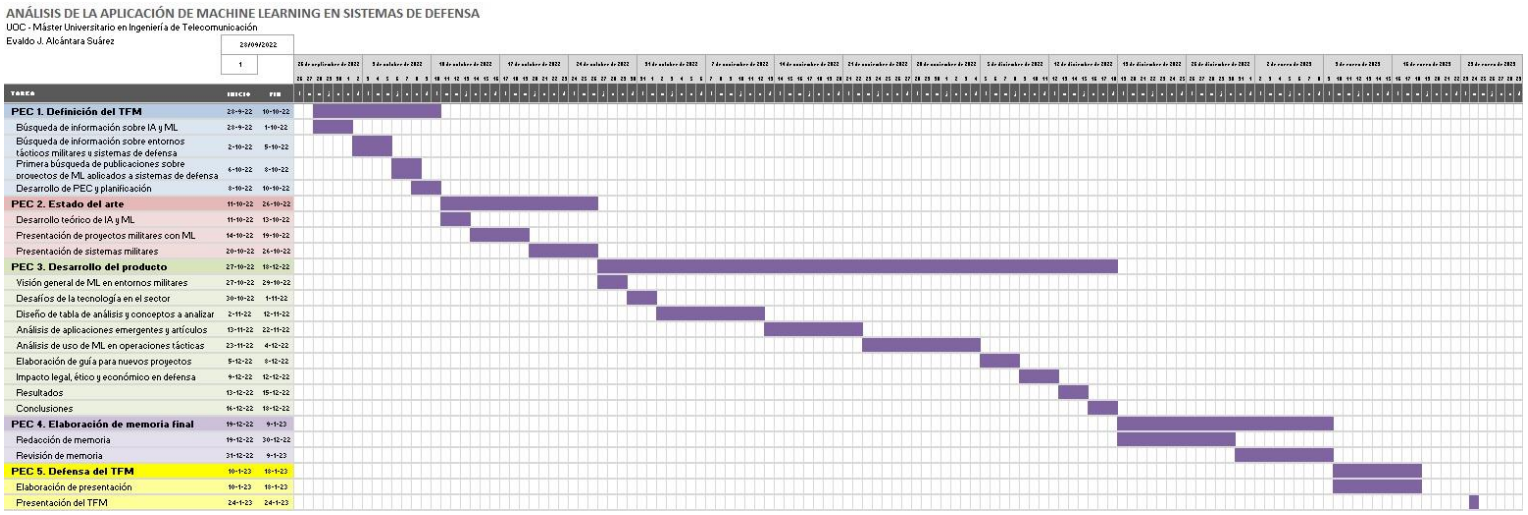



*Figura 1. Diagrama de GANT del TFM.*

## 1.6. Breve sumario de productos obtenidos

Con la ejecución de este TFM se obtienen cinco productos bien diferenciados y son los siguientes:

- Un modelo de análisis, formato tabla, a utilizar cuando se quiera aplicar con ciertas garantías de éxito una técnica de ML en un sistema de defensa. Este modelo distingue tres áreas a completar, que están relacionadas con los datos generales de la técnica, una serie de factores considerados decisivos a tener en cuenta y las áreas militares que se verían afectadas con la implementación.

- La identificación de referencias no pensadas, en origen, para ser implementadas en el mundo militar, pero que podrían desarrollarse fácilmente en el sistema de defensa correspondiente y obtener así una mejora de este.

- La tipificación de una serie de desafíos o retos que habría que superar para que el ML suponga realmente una ventaja cuando sea aplicado en los sistemas de defensa.

- La elaboración de una guía para nuevos desarrollos con ML en sistemas de defensa.

- Un estudio sobre el impacto económico, legal y ético que está suponiendo la aplicación de ML en los sistemas de defensa y las líneas futuras esperadas.

## 1.7. Breve descripción de otros capítulos de la memoria

La memoria se compone de un primer capítulo donde se expondrá el estado del arte. En éste se aportará un resumen sobre la IA, las técnicas de ML existentes, una explicación sobre la evolución de los sistemas de defensa más relevantes del ejército español y algunos ejemplos de proyectos nacionales e internacionales de entornos militares donde se aplica ML.

A continuación, se presenta un segundo capítulo donde se desarrollará primeramente un formato de tabla de análisis para, posteriormente, analizar una selección de referencias de gran interés que pueden ser de aplicación a los sistemas de defensa expuestos en el capítulo anterior.

A raíz del análisis, en el siguiente capítulo, se muestran una serie de productos derivados de ese análisis, como son los desafíos más importantes que habría que superar para una exitosa aplicación de la técnica, una guía de referencia para nuevos proyectos de ML en entornos militares y, por último, el impacto a nivel legal, económico y ético que ha desencadenado esta nueva tecnología.

# 2. Estado del arte

El aprendizaje automático (ML) es una tecnología incluida dentro de la inteligencia artificial (IA). En este apartado se mostrará exactamente qué posición ocupa el ML dentro de la IA y los tipos de aprendizaje que existen.

En el siguiente punto, se realizará un breve resumen de algunos sistemas militares para, posteriormente, fuera del estado del arte, analizar qué publicaciones y qué trabajos de investigación a nivel internacional, relacionados con el ML, se están llevando a cabo y podrían ser de aplicación a los sistemas militares indicados

Por último, visto que el estado actual de aplicación de ML en los sistemas de defensa militares españoles es algo incierto, debido a que no es hasta el Boletín Oficial del Estado de 21 de diciembre de 2018 [1] cuando se seleccionan y se hacen públicos los primeros proyectos relacionados con esta tecnología, será mostrada una selección de los más relevantes y de los que se han encontrado información. Al ser proyectos de I+D+i no hay mucha literatura o especificaciones técnicas sobre ellos sino conceptos generales.

## 2.1. Evolución de sistemas militares y aplicación de machine learning.

El número de sistemas militares que existen en defensa, independientemente que pertenezcan al Ejército de Tierra, a la Armada o al Ejército del Aire y del Espacio, es muy elevado y diverso, como puede apreciarse, por ejemplo, en la web del Ejército de Tierra en referencia [2]. En este apartado se han seleccionado los siete sistemas que se han creído más relevantes y en los que la aplicación de ML, hoy en día por lo menos no existen evidencias de aplicación en España, podría suponer una gran mejora. A continuación, se muestra la Figura 2 con esos sistemas.

*Figura 2. Sistemas de defensa seleccionados*

En los siguientes subapartados se irán presentando cada uno de ellos con la información pública disponible en la red. Simplemente se indicará de forma muy resumida como han ido evolucionando en el tiempo y los aspectos más relevantes para poder tener, al menos, una noción básica del sistema antes de comenzar con el análisis de referencias de ML aplicables a estos.

### 2.1.1. Sistemas de Información en entornos tácticos.

La información es poder [3] y disponer de una información útil, correcta y veraz es el factor más importante a la hora de tomar cualquier decisión, ya sea para establecer un plan de negocios o para marcar una estrategia militar. Podría hablarse desde el principio de los tiempos de señales acústicas o visuales que ofrecían información al mando sobre el estado de la batalla, pasando por mensajeros a caballo con cartas lacradas, por el invento de las radiocomunicaciones terrestres, contactos satelitales y muchos otros, hasta la situación actual, por ejemplo, de la Armada, que a través de su procesador de redes tácticas tipo LINPRO [4] gestiona el intercambio de información en tiempo real entre las redes que se conectan con protocolos Link 11, Link 16, Link 22, protocolo VMF (Variable Message Format) o JREAP (Joint Range Extension) para permitir recibir y enviar la información táctica a largas distancias, por ejemplo, mediante redes de satélites cumpliendo estándares OTAN del tipo STANAG.

Como se mostrará en el apartado siguiente, donde se expondrá una selección de proyectos militares que emplean ML, el proyecto americano GIDE es un sistema militar de información de entornos tácticos que ha evolucionado hacia la aplicación de técnicas de IA y de ML. El fin que persigue este proyecto es crear, primeramente, una arquitectura organizada del dato para, posteriormente, poder analizarla y trasladarla a algoritmos de predicción que otorguen al mando una visión conjunta del entorno y un pronóstico de cuáles serían las señales de alarma del campo de batalla y los siguientes pasos del enemigo. Este proyecto parece que, hoy en día, continua en desarrollo, pero las últimas pruebas del GIDE 3 han sido satisfactorias según referencia [5].

### 2.1.2. Sistemas de Vigilancia por Imágenes.

Fue sobre el año 1969 cuando se registró el primer Circuito Cerrado de TV doméstico [6], aunque algunos años antes ya se usaban en proyectos militares. El desarrollo tecnológico hasta la fecha actual ha sido impresionante, mejorando en calidad de imagen, incluyendo visión por infrarrojos, habilitando opciones de datos térmicos, operando con servidores y grabaciones digitales, reconocimientos faciales, activación de pixelados de movimiento, reconocimiento de matrículas de vehículos, video-seguimiento y un largo etcétera como se aprecia en [7].

Toda esta tecnología ha supuesto un cambio en los sistemas de vigilancia puesto que el tipo de sensores empleados en la captación es muy diverso según

referencia [8] y los softwares de reconocimiento y tratamiento de datos ofrecen muchas potencialidades. Por ejemplo, como se verá en al apartado siguiente, proyectos como SEDA y ATLAS, gracias al ML pueden enseñar a la máquina cómo es la figura visual de un tanque enemigo, la firma térmica que tiene, y establecer unos parámetros de alarma para que cuando las imágenes por satélite capten alguna figura similar, se avise al operador rápidamente, evitando así tener que depender de la sensibilidad del personal de vigilancia a la par que se aumenta enormemente la zona a cubrir. También, los sistemas de vigilancia por imágenes pueden emplearse para detectar posibles ataques terroristas y anticiparse a los hechos como se indica en [9].

### 2.1.3. Sistemas de Guerra Electrónica.

Según la definición del Ministerio de Defensa del Gobierno de España, "la guerra electrónica (abreviado EW de Electronic Warfare) consiste en una actividad tecnológica y electrónica con el fin de determinar, explotar, reducir o impedir el uso hostil de todos los espectros de energía, por ejemplo, el electromagnético, por parte del adversario y a la vez conservar la utilización de dicho espectro en beneficio propio" [10]. Nótese que este tipo de guerra afecta tanto a las transmisiones de comunicaciones vía radio, como a los sistemas radar de vigilancia y a los sistemas electrónicos de dirección de tiro.

Debido a la diversidad de escenarios y sistemas, a grandes rasgos, es conveniente dividir el EW en tres tipos de medidas o partes elementales:

- Medidas de apoyo de Guerra Electrónica (ESM): Comprende las acciones adoptadas para buscar, interceptar, identificar o ubicar fuentes de energía electromagnética irradiada con el fin de obtener un reconocimiento inmediato de la amenaza.
- Contramedidas electrónicas (ECM): Comprende las acciones adoptadas para impedir o reducir la utilización enemiga del espectro electromagnético. Incluyen la perturbación, el engaño y todo tipo de señuelos usados, como defensa antimisiles.
- Medidas de Protección Electrónicas (EPM): Comprende la adopción de medidas encaminadas a asegurar el uso propio del espectro electromagnético. Por ejemplo, radares de dirección de tiro con agilidad en saltos de frecuencia.

El primer sistema de guerra electrónica podría decirse que fue el WLR-1 desarrollado por los americanos en los años 50. Sobre los años 70 surgió el sistema Beta Mk1000 de origen italiano y no fue hasta los años 80 cuando España comenzó a crear el programa DENEB para tener su propio sistema ESM. Con el transcurso de los años, los buques de la Armada de España tienen instalados los sistemas ALDEBARAN y REGULUS en las fragatas F100, el RIGEL en el LHD Juan Carlos I y en los BAM, y la compañía Indra está desarrollando el RIGEL i110 y REGULUS i110 para las fragatas F110 de próxima construcción como puede apreciarse en [11]. También, en la referencia [12] puede encontrarse algo más de literatura sobre la evolución de estos sistemas en la Armada de España.

*Figura 3. Módulos de RIGEL ES and EA Systems [13].*

El sistema RIGEL ES y EA mostrado en la Figura 3 es un producto desarrollado por la compañía INDRA. Se expone de manera general como ejemplo de un sistema de guerra electrónica, donde pueden apreciarse todos los módulos que lo componen. Por regla general, prácticamente todos estos sistemas ES, tienen la misma composición: una consola de operador con una librería cargada, un rack de procesado de señales donde se analiza el tipo de señal interferida y su demora, un módulo instalado en la superestructura encargado de realizar un primer filtrado de señales en búsqueda de la dirección, y tres antenas instaladas también en la superestructura de las cuales una de ellas es omnidireccional y dos direccionales, a cada costado del buque, para captar la energía procedente de esas secciones. Las bandas de frecuencia con las que trabajaría, por ejemplo, el Rigel i110, irían desde los 0,5GHz hasta los 18GHz. Se adjunta la Figura 4 donde se muestran las bandas de frecuencia IEEE, OTAN y, en color verde, las bandas de radares operacionales con la finalidad de tener un referente.

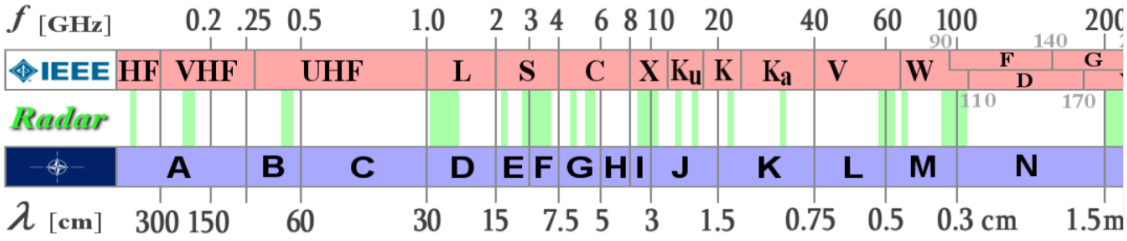



*Figura 4. Nomenclatura frecuencias IEEE vs OTAN y equipos de radar operacionales [14].*

El ML tiene un gran campo de aplicación en la guerra electrónica. Dentro del campo ESM podría automatizar la identificación y búsqueda de emisiones radioeléctricas a través del estudio y aprendizaje de las librerías disponibles. En el área ECM podría recomendar el tipo de contramedida a emplear y la estrategia de uso y, por último, en la parte EPM (medidas de protección), en base a la perturbación recibida, podría automatizar el salto de frecuencia de los radares de transmisión de frecuencia ágil para evitar ser anulados.

### 2.1.4. Sistemas Radar.

Desde el año 1934, que los británicos construyeron el primer radar militar, hasta la actualidad, ha habido muchos avances en esta materia como se desarrolla en [15]. A grosso modo, podría decirse que el esquema básico funcional es el mismo, pero a nivel individual ha habido muchos avances en los tipos de antena, en los procesadores de señal, en los niveles de potencia RF transmitida, en los tipos de osciladores, en su clasificación según la tecnología (primario, secundario, pulsado, onda continua…) o en su clasificación según su aplicación (tráfico aéreo, meteorológico, navegación, seguimiento…) como se esquematiza en [16].

En el mundo militar, quizás el radar más avanzado y versátil sería el SPY-7 de la compañía americana Lockheed Martin comercializado en [17]. Este radar digital en banda S, de estado sólido, basado en nitruro de galio, definido por software modular y escalable según necesidades, es capaz de detectar, rastrear y atacar amenazas de misiles balísticos sofisticados, incluso de varios a la vez, además de ser interoperable con la mayoría de los radares y plataformas de defensa existentes. Al estar en desarrollo, no hay mucha literatura sobre éste, así que como referencia se expondrán algunos datos su antecesor, el SPY-6, cuya composición modular se muestra en la Figura 5.

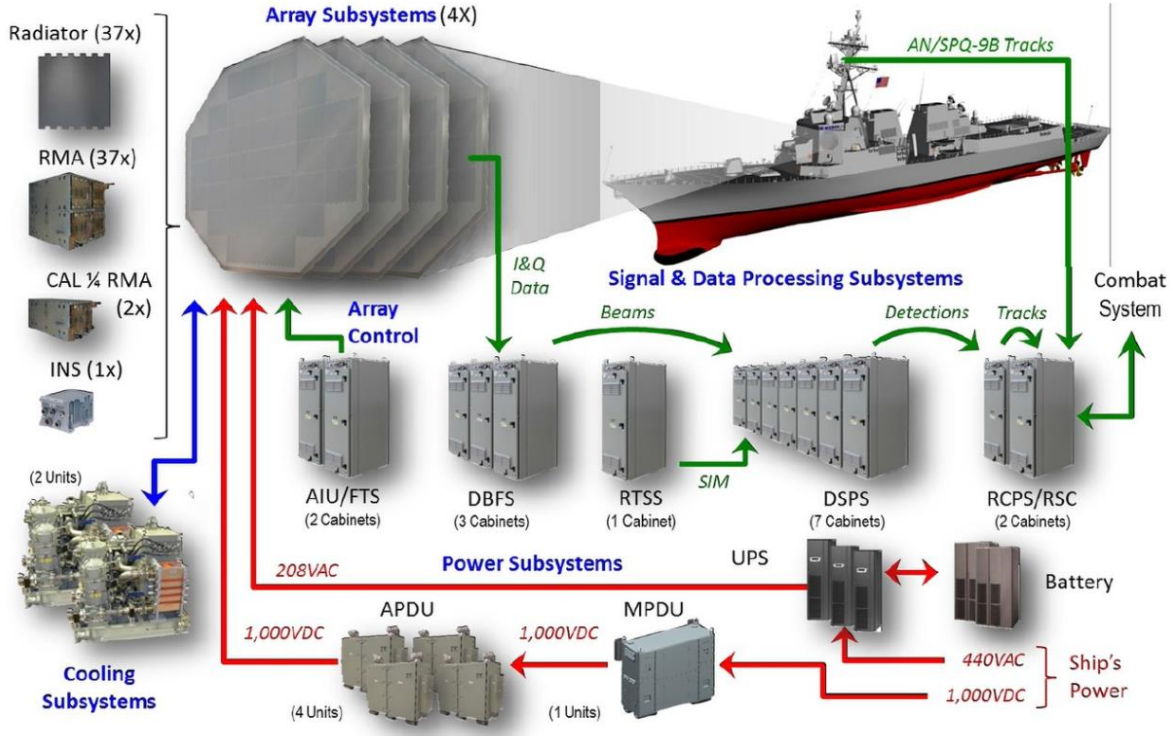



*Figura 5. Descripción general del sistema AN/SPY-6 [18].*

El SPY-6, en base a la información disponible en [18], es un radar AESA (Active Electronically Scanned Array) que consta de tres componentes principales: un radar de banda S AMDR (Air and Missile Defense Radar), que proporciona búsqueda de

volumen, seguimiento y discriminación de misiles; un radar de banda X AMDR, que proporciona búsqueda de horizontes y superficies, seguimiento de precisión e iluminación de terminales; y un AMDR Radar Suite Controller, que coordina e integra ambos radares. Este AMDR es el primer radar construido con bloques de construcción RMA (Radar Modular Assemble) de tamaño 2' x 2' x 2', lo que le permite ser escalable, y que utilizan nitruro de galio (GaN) en su construcción para necesitar menos energía y mejorar su enfriamiento.

Este radar también permite la formación de haces digitales, logrando así un seguimiento más preciso, un mayor alcance y ser 30 veces más sensible que otros radares. El SPY-6 también puede tener capacidades ofensivas, incluida la capacidad de realizar ataques electrónicos con su antena AESA, puesto que puede atacar objetivos aéreos o de superficie mediante el uso de haces de ondas de radio, estrechamente dirigidas y de alta potencia, que podrían cegar los activos adversarios.

### 2.1.5. Sistemas de Dirección de Tiro y Armas.

Toda arma, sea de fuego o no, necesita un sistema de apuntamiento que garantice el alcance del objetivo. Con la aparición de la artillería pesada, se escribieron documentos que relacionaban la cantidad de pólvora, el peso del proyectil, la inclinación del cañón y la distancia que alcanzaba el proyectil en base a lo anterior. Era un documento muy valioso que, unido a la pericia del personal artillero, supondría un derribo casi garantizado del blanco como se describe en [19].

En la actualidad, los sistemas de dirección de tiro han evolucionado mucho y cualquiera que se precie y que tenga asociado un arma de cierto calibre, dispondrá como mínimo de un sensor óptico por infrarrojos, un sensor óptico diurno y un telémetro láser. Por ejemplo, según el proyecto ATLAS, proyecto que se comentará en el siguiente apartado, a los carros de combate se les dotará de sensores de imágenes en las bandas de onda visible, NIR, SWIR, MWIR y LWIR, y de un telémetro láser, todos ellos con rotación continua en 360º, para la búsqueda e identificación de objetivos y posteriormente como elementos de la dirección de tiro.

En otras unidades, como buques de guerra que hacen uso de cañones de calibre de 76mm, o similar, y que pueden disparar a objetivos a más de 15km, en su dirección de tiro se incluye un radar de seguimiento de onda continua para garantizar un disparo certero. A esa distancia tan elevada hay factores como la lluvia, la nubosidad, la calima o cualquier artefacto intermedio entre el buque y el blanco, que podría imposibilitar un seguimiento de imagen, pero no un seguimiento radárico.

En la Figura 6 se puede observar el pedestal de la dirección de tiro DORNA-2 que llevan instalados buques de guerra españoles (incluye radar, telémetro, cámara CCD y cámara IR) y el cañón Oto-Melara de 76mm, efectuando un disparo.

*Figura 6. Pedestal radar con sensores de dirección de tiro DORNA-2 [20] y cañón Oto-Melara 76mm [21]*

### 2.1.6. Sistemas No Tripulados.

Los vehículos no tripulados pueden ser aéreos (UAV, aunque si se incluyese al sistema de control y comunicación sería UAS), marítimos (USV) o terrestres (UGV) y dentro de esta clasificación, podría realizarse una segunda subdivisión según el tipo de misión encomendada (vigilancia, ataque, suicida…) o el tipo de tecnología aplicada (Control remoto, autónomos, alas fijas, alas rotatorias...). Visto que en los últimos años y sobre todo en la guerra de Ucrania, los UASs están acaparando algunos titulares de las noticias por los desarrollos logrados y por su uso bélico, se ha creído conveniente centrar la atención de este estudio en ellos. A continuación, en la Figura 7 se muestra un esquema de terminologías sobre drones que facilita el entendimiento.

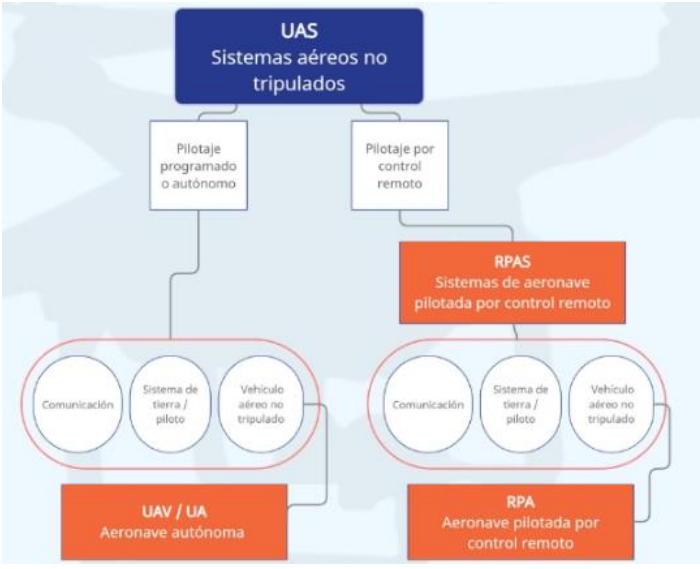



*Figura 7. Esquema terminología dron [22].*

Tras el análisis de la literatura, podría decirse que la aviación no tripulada es tan antigua como la tripulada, pero ha sido en los últimos años cuando mayor evolución ha existido en esta materia, principalmente motivada por las nuevas tecnologías, los nuevos materiales, los nuevos sistemas de almacenamiento de energía y los nuevos roles que han desempeñado estos artefactos en el mundo militar según referencia [23].

*Figura 8. Ejemplos de UASs*

En la Figura 8 se muestran algunos ejemplos de UASs, algunos de ellos tan pequeños como la palma de la mano y otros de dimensiones similares a los de un caza de combate. Los proyectos más destacables son: el minidron Black Hornet 3 de FLIR Systems, por su labor de vigilancia, ligereza y por su cámara de alta resolución, cualidades descritas en [24]; el dron armado turco SONGAR, por su arma integrada de calibre 5,56mm y por su apoyo a la infantería; y el dron Depredador C Vengador americano, por su fiabilidad y su capacidad de carga de armamento.

La integración de ML en drones militares supondrá la creación de un arma muy valiosa en conflictos armados. El escenario ideal en una batalla tierra-tierra sería poder disponer de un enjambre de minidrones económicos, autónomos, sigilosos, con capacidad de reconocimiento del enemigo y letales. Aún queda un largo camino por recorrer para materializar esa idea de ciencia ficción, pero ya existen muchos estudios de ML para mejorar la confiabilidad de los UAV en relación a su rendimiento y retrasos en la comunicación, la eficiencia de la gestión de recursos y su desempeño en función de sus roles o misiones, como se aprecia en [25].

### 2.1.7. Sistemas de Gestión de Mantenimiento de Unidades y Logística.

Hasta aproximadamente el año 2000, la gestión del mantenimiento de muchas unidades militares se realizaba en formato papel, siguiendo las indicaciones que marcaban los manuales técnicos de los equipos. Con el paso de los años, la situación ha ido mejorando debido a que, por ejemplo, en la Armada, se hace uso de la plataforma de Gestión del Apoyo Logístico Integrado de la Armada (GALIA) donde, valga la redundancia, se gestionan las tareas del Plan de Mantenimiento Integrado de la Clase (ICMP en inglés) según buques, Árbol de Elementos Configurados (AEC), equipos, periodicidades y tipos de tareas. Puede encontrarse más información sobre este asunto en las referencias [26] y [27].

Dentro de esas tares del ICMP, existen algunas que son predictivas, es decir, consisten en realizar un análisis de las vibraciones, termografía, presiones y tacómetros de algunos equipos. Los elementos de análisis pueden ser motores eléctricos, ventiladores, bombas contraincendios, motores principales de propulsión, generadores de corriente y muchos otros, para intentar conocer el estado real de los mismos e intentar predecir la necesidad de realizar un mantenimiento previo antes de que se produzca una rotura o, incluso, de demorar la ejecución de mantenimientos costos simplemente porque han sido recomendados por el fabricante. Por ejemplo, en motores principales de propulsión, el fabricante puede recomendar sustituir una serie de elementos a las 10.000h de uso, pero puede que el sistema predictivo, por medio del análisis de los datos recopilados y el ML, no lo considere necesario y, por tanto, sería una opción viable demorar la ejecución de ese mantenimiento hasta las 11.000h de uso o hasta que el sistema de ML detecte algún indicio que corrobore esa necesidad. Esto supondría un gran ahorro de costes, una mayor disponibilidad de las unidades y una eficiente gestión medioambiental puesto que el volumen de residuos generados por las acciones es menor. También podría darse el caso de adelantar esos mantenimientos si el análisis determinara esa necesidad, antes de provocar una avería.

Como se estudiará en el apartado siguiente, la Armada está inmersa en los proyectos SOPRENE y MAPRE cuya finalidad es intentar conocer en tiempo real el estado de sus unidades y poder así realizar una planificación operativa de las mismas según [28]. También es muy importante a nivel económico porque, en base a esa información, la financiación que debe destinarse a esas partidas será de mayor o menor entidad y la disposición temporal del mismo también dependería de este factor.

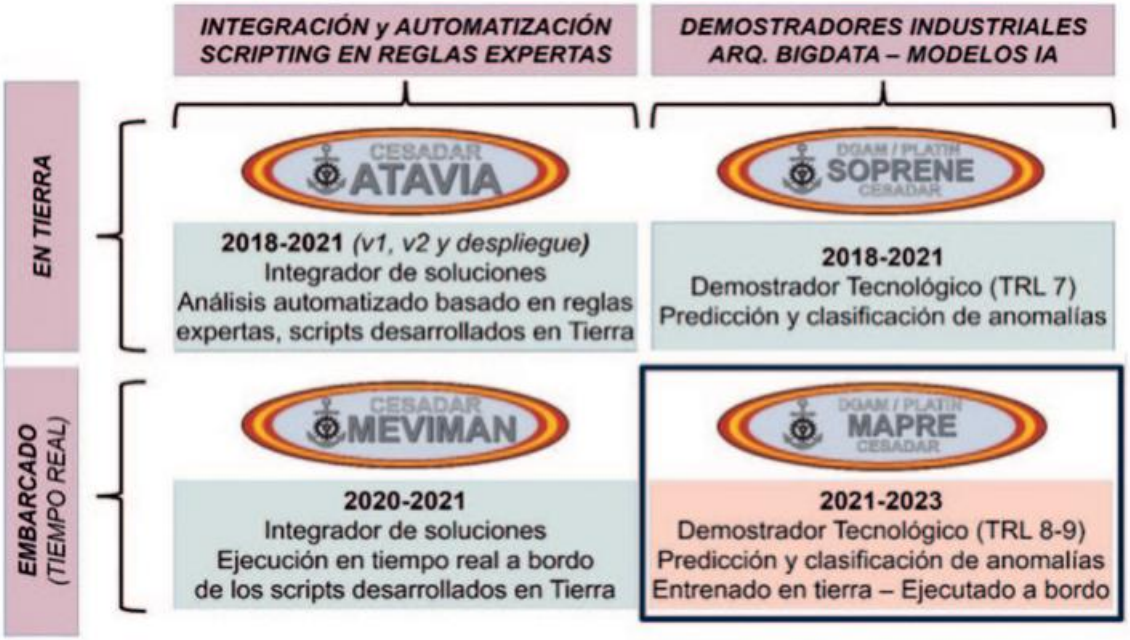



*Figura 9. Programas de transformación industrial y de innovación desarrollados en CESADAR [28]*

La Figura 9 muestra como han ido evolucionando los programas de la Armada en los últimos años en su afán de conseguir, en tiempo real, un diagnóstico predictivo de los equipos embarcados como motores propulsores, generadores de electricidad y bombas contraincendios, entre otros.

## 2.2. Inteligencia Artificial (IA).

La IA es una tecnología que ofrece nuevos proyectos en I+D+i y ha supuesto una perspectiva completamente diferente en las guerras y en las estrategias militares. Brinda una nueva herramienta en la ingeniería del conocimiento, en la ingeniería del aprendizaje del Big Data y en la simulación de estrategias y entornos tácticos. Podría decirse que es tan relevante el impacto que ha tenido en las teorías militares y en las artes de guerra que ha supuesto nuevos modos y formas de concebirla [29].

En esta tecnología se someten a prueba aspectos como la ciencia del pensamiento, la ciencia cognitiva y la ciencia de la información, entre otros. El crecimiento exponencial del número de proyectos llevados a cabo con la IA y los resultados obtenidos son pruebas fehacientes de que este recurso podría cambiar el futuro que se conoce hoy día.

Con respecto al mundo militar, cada día afloran nuevas investigaciones, nuevas visiones y potencialidades que confirman que la carrera armamentística tendrá como base fundamental la inteligencia artificial. Se prevé que la propia máquina observe, se oriente, tome decisiones y actúe en consecuencia [29]. Un ejército con múltiples o, incluso, infinidad de cerebros inteligentes actuando de forma autónoma en el campo de batalla o ayudando al comandante en la toma de decisiones, marcará la diferencia en los enfrentamientos.

### 2.2.1. Niveles de inteligencia.

Para entender la IA y el aprendizaje de la máquina es conveniente saber que existen tres niveles de inteligencia. A continuación, se muestra la Figura 10 donde se representan esos niveles para posteriormente proceder a su explicación.

*Figura 10. Niveles de inteligencia*

En primer lugar, estaría la “inteligencia cognitiva” que es aquella cuyo fin es comprender, razonar y decidir. Se basa en la programación neurolingüística y en

algunos escenarios se ha conseguido superar las capacidades de los seres humanos. Por ejemplo, el programa informático AlphaStar que eliminó en tiempo real a jugadores profesionales del juego de estrategia StarCraft II [30].

Por otro lado, estaría la "inteligencia perceptiva" que está justamente relacionada con la forma de percibir, una percepción basada en los sentidos con una connotación subjetiva. Salvo el gusto, que al mejor conocimiento del autor no se han encontrado publicaciones sobre ello, la vista, el tacto, el oído e, incluso, recientemente el olfato, están inmersos en este nivel. Las redes neuronales profundas o *Deep Neural Networks* (DNN) junto al Big Data han evolucionado enormemente en este concepto superando incluso la percepción humana. Ejemplo de estos desarrollos son los programas de reconocimiento de imágenes como Google Lens [31] o programas de reconocimiento facial con detección de emociones como Google Vision API [31], sistemas de reconocimiento de voz como *Windows Speech Recognition* o *Dragon NaturallySpeaking* [32] o sistemas de traducción de idiomas con tasas de errores entorno al 5% [33].

Por último, estaría la "inteligencia computacional" que es la encargada del almacenamiento de datos y del cálculo. Lógicamente, entre mayor sea el número de datos que se pueda almacenar y mayor sea la velocidad con la que se pueda calcular o trabajar, mejor. Al principio de los tiempos este tipo de inteligencia se basaba sobre todo en tareas aritméticas y tareas lógicas, pero hoy en día incluye labores de aprendizaje, adaptación y lógica difusa que es lo que permite, de cierta manera, concebir esa inteligencia. Actualmente, en este aspecto, los ordenadores han sobrepasado con creces a los humanos. Como ejemplo, se podría nombrar el desarrollo de la computadora MareNostrum 5 ubicada en Barcelona, que alcanzará una potencia de 314 petaflops [34]. No obstante, los superordenadores más potentes del mundo serían el Summit de IBM con 200 petaflops [35] o el Tianhe-3 de China con un pico de 1,3 exaflops [36].

### 2.2.2. Método para lograr la IA.

El método que usa la IA para llegar a lograr esa inteligencia se basa en la búsqueda de la solución, la inferencia del conocimiento y el aprendizaje automático como se desarrolla en la referencia [29]. En la Figura 11 se representa ese modelo que posteriormente se explicará.

*Figura 11. Método que usa la IA*

Cuando se habla de ”buscar la solución” entiéndase el proceso de búsqueda compuesto por algoritmos, reglas y métodos empleados cuya finalidad es abarcar la resolución del problema desde el nivel de representación. En este punto de búsqueda de solución se mantiene al margen el factor de decisión ya que lo que estudia son los distintos estados del problema y las transiciones entre los mismos para encontrar la mejor vía desde el estado inicial al estado final. Es decir, en este apartado la finalidad es encontrar soluciones o caminos factibles donde previamente se ha tenido que estudiar todas las rutas posibles. Ya se decidirá en otro punto de la IA qué camino es el mejor, puesto que son muchísimos los factores a tener en cuenta, como el consumo de energía, la duración, la peligrosidad, la distancia, el porcentaje de acierto, entre otros.

Por otra parte, estaría la inferencia del conocimiento cuyo principal objetivo, a grandes rasgos, sería representar el conocimiento formal de tal manera que facilite el razonamiento. Es decir, sacar premisas y conclusiones válidas que representen el conocimiento formal y éstas puedan usarse para pensar y resolver problemas en computadoras o sistemas inteligentes mediante la simulación de modos de razonamiento y estrategias de control. En esta abstracción de conclusiones, se presenta un gran problema, y es la incertidumbre que aparece cuando al buscar la relación lógica entre las premisas y las conclusiones no se encuentra, o directamente no existe. Para resolver estas cuestiones, el sistema se apoya en un motor de inferencia cuya función es intentar razonar, es buscar la información que existe en la base del conocimiento disponible, asociarlo con los elementos de una base de datos y crear o exponer nuevas ideas guiadas por alguna estrategia de control. Un buen motor de inferencia debe destacar por su mecanismo eficiente de búsqueda y coincidencia, por ser controlable, por su representación observable de causa-efecto y por su calidad heurística.

En la inferencia del conocimiento de los sistemas de IA surgen dos problemas muy relevantes. Por un lado, estaría el método de inferencia empleado, en el que habría que destacar el estudio de las relaciones lógicas y la fiabilidad de las relaciones establecidas, y por otro lado, la estrategia de control cuya finalidad es limitar y reducir el volumen de búsqueda para poder obtener una respuesta en tiempo [29]. Para atacar esta estrategia de control se puede emplear un aprendizaje de reglas, un programa informático inteligente con gran cantidad de conocimientos y experiencia en ese campo, o la lógica difusa cuando el modelo descriptivo es incierto o existe una linealidad muy débil.

Por último, la tercera tecnología que emplea la IA es el aprendizaje automático o machine learning, que podría describirse como la ciencia que estudia el aprendizaje de los ordenadores a partir de los datos disponibles. Principalmente consiste en identificar y aprender modelos y patrones de un gran volumen de muestras para posteriormente predecir o resolver problemas prácticos.

### 2.2.3. Machine learning y tipos de aprendizaje.

Existe numerosa bibliografía sobre el ML y los tipos de aprendizaje empleados. Según la información disponible en las referencias [37] y [38], se expone en la Figura 12 un resumen de los tipos de aprendizaje junto con los algoritmos más empleados en cada uno de ellos para, posteriormente, de forma muy resumida, explicarlos.

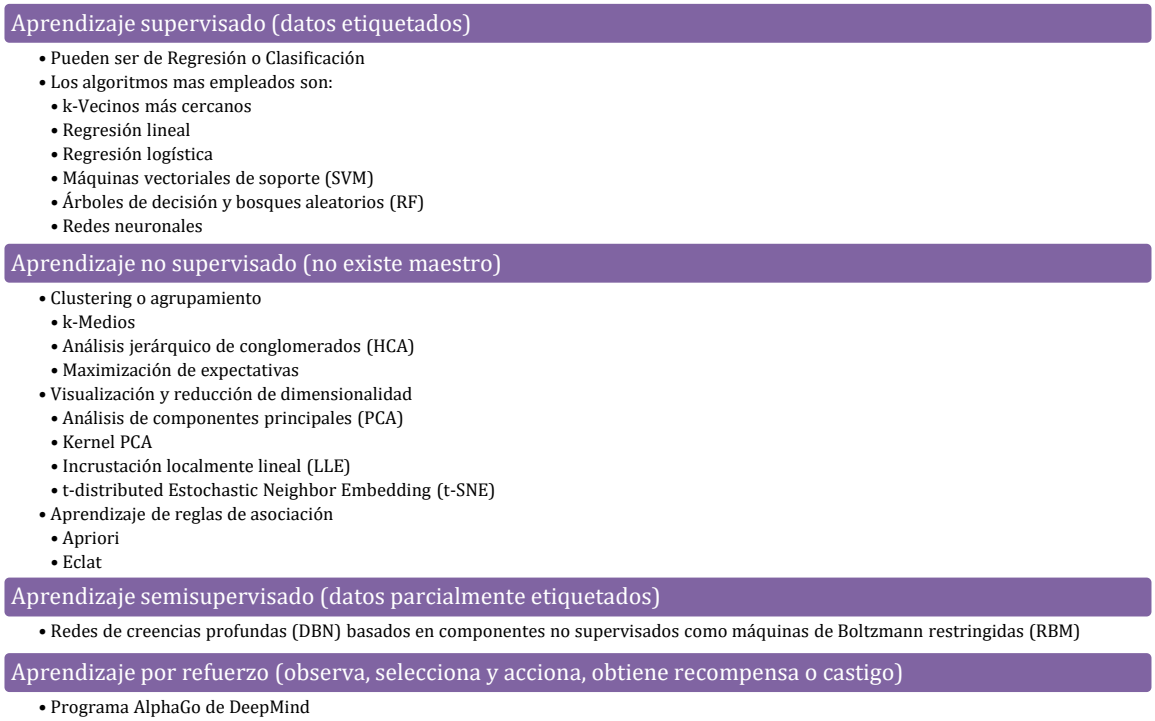



*Figura 12. Tipos de ML*

- Aprendizaje supervisado: Los datos de entrenamiento que se suministran al algoritmo incluyen las soluciones deseadas, están etiquetados. Se hace uso de un conjunto de muestras de categorías conocidas. Como ejemplo, estaría la clasificación del filtro spam del correo electrónico o la predicción de un valor numérico objetivo dado un conjunto de características, como puede ser la tasación de un vehículo. Se puede emplear también para la predicción o el análisis de los datos obtenidos en el Internet de las Cosas (IoT), en las redes sociales o en técnicas de reconocimiento facial.

- Aprendizaje no supervisado: Los datos de entrenamiento no están etiquetados y el sistema intenta aprender sin un maestro por medio de agrupamientos, visualizaciones y reducciones de la dimensionalidad, o reglas de asociación. Se usa mucho en la minería de datos para descubrir algo. Por ejemplo, en la búsqueda de una persona en una trama de imágenes diferentes, en un algoritmo de visualización para representación gráfica de datos no etiquetados que facilita la trazabilidad al agruparlos, en la agrupación jerárquica o en clústeres de visitantes de un blog para

detectar grupos de usuarios similares, en la simplificación de datos al fusionar varias características correlacionadas en una, en la detección de anomalías como defectos en una cadena de producción y en el aprendizaje de reglas de asociación de datos para descubrir la relación que guarda entre ellos.

- Aprendizaje semisupervisado: Se usa cuando gran parte de los datos que se manejan están sin etiquetar, algunos etiquetados parcialmente y unos pocos etiquetados. Por ejemplo, tenemos muchas fotos y el sistema identifica que la persona 1 aparece en las fotos A, C y D (parte no supervisada) para posteriormente etiquetarla con su nombre en una de ellas y que automáticamente el sistema la etiquete en todas, facilitando así su búsqueda.

- Aprendizaje por refuerzo: Este tipo de tecnología se basa en la observación, en la elección de una política de actuación y en maximizar el número de recompensas o en minimizar el de penalizaciones. La gran mayoría de sistemas de IA especializados en juegos usan este enfoque, como ejemplo AlphaGo.

Por otra parte, los algoritmos también se pueden clasificar según la disponibilidad de los datos, la generalización de los datos o el número de capas que se necesiten para aprender. A continuación, se muestra en la Figura 13 esa clasificación para después explicar brevemente cada uno de esos conceptos.

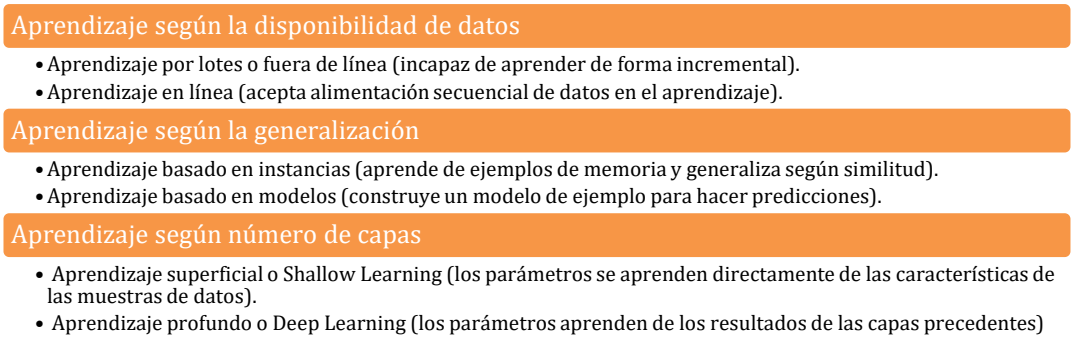



*Figura 13. Clasificación de ML*

- Aprendizaje por lotes: Es un sistema que aprende utilizando todos los datos disponibles, pero siempre desde el principio. Si se entrena un sistema con 2.000 muestras se genera un algoritmo. Si se quisiera incluir la información de 500 muestras más, habría que empezar desde el principio volviendo a entrenar al sistema con 2.500 muestras. Por lo general, necesita muchos recursos informáticos, tiempo y se hace fuera de línea.

- Aprendizaje en línea o incremental: Se inyecta al sistema nuevos datos para que éste sume el aprendizaje al anterior de tal forma que se produzca un nuevo aprendizaje inmediato. Las principales ventajas son el ahorro de memoria, ya que una vez entrenado el sistema con unos datos ya no sería necesario almacenarlos, y

la rapidez de adaptación a unos datos cambiantes. Por el contrario, presenta el inconveniente de que si los nuevos datos aportados al entrenamiento son erróneos (sensor deteriorado) el rendimiento del sistema empeorará siendo imprescindible revertir a un estado anterior de aprendizaje. Se emplea en el mercado bursátil.

- Aprendizaje basado en instancias: El sistema aprende de los ejemplos memorizados y, posteriormente, en base a una medida de similitud, discierne los nuevos casos entrantes. Suele usarse en los filtros antispam de los correos electrónicos cuya medida de similitud podría ser el número de palabras de 2 correos.

- Aprendizaje basado en modelos: Los pasos suelen ser: estudiar los datos, seleccionar un modelo a partir de un conjunto de ejemplos, entrenar al sistema hasta que los parámetros del modelo minimicen una función de costo y, finalmente, aplicar el algoritmo para hacer predicciones sobre nuevos eventos.

- Aprendizaje profundo: Se caracteriza porque en su arquitectura existe más de un nivel o capa donde los parámetros aprenden de los resultados de las capas precedentes. Nunca aprenden directamente de las características de las muestras de datos, que están situadas en la primera capa. Además, cada capa puede emplear su propio tipo de ML, aunque de manera habitual suelen estar basadas en redes neuronales multi-capa. Este tipo de aprendizaje intenta imitar el mecanismo del cerebro humano para interpretar datos como imágenes, sonidos y textos.

## 2.3. Presentación de una selección de proyectos de defensa que aplican ML.

Dentro del estado del arte se ha creído conveniente dedicar un subapartado para presentar una selección de proyectos en los que se aplica ML. Los tres primeros, actualmente en desarrollo, son de origen español, dentro del ámbito de Defensa, según el programa COINCIDENTE de la Dirección General de Armamento y Materiales (DGAM) en [39]. Los otros dos proyectos son de desarrollo estadounidense, también en fase de desarrollo, conocidos internacionalmente por la fuerte inversión económica realizada por el país y por algunas noticias que emitieron periodistas españoles como las de la referencia [40].

| PROYECTOS NACIONALES (todos en desarrollo) | PROYECTOS INTERNACIONALES (todos en desarrollo) |
|---|---|
| • Cobra<br>• SEDA<br>• SOPRENE | • GIDE<br>• ATLAS |

*Figura 14. Proyectos de ML seleccionados*

En la Figura 14 se muestran los cinco proyectos que se explicarán en los sucesivos apartados, como ejemplo de la importancia que está tomando esta técnica en los sistemas de defensa. Al ser proyectos de I+D+i, la información pública es muy escueta y, por tanto, presumiblemente no se podrán responder a todas las preguntas técnicas que cualquier científico de la materia se plantee.

### 2.3.1. Proyecto Cobra.

El proyecto Cobra permitirá realizar cibermaniobras adaptativas y personalizables de simulación hiperrealista de Amenazas Persistente Avanzadas (APTs) y entrenamientos en ciberdefensa, usando gamificación, según [41]. En base a la misma referencia anterior, señalar que este proyecto comenzó el 1 de diciembre de 2020, con una duración total de 24 meses, y que participan la Universidad de Murcia, la Universidad Politécnica de Madrid y la empresa Indra.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una solución innovadora que ofrezca cobertura a los siguientes objetivos:

- Simular topologías de red y trafico real.
- Simular de forma hiperrealista Amenazas Avanzadas Persistentes (APTs).
- Desarrollar escenarios aleatorios y parametrizables.
- Desarrollar cibermaniobras adaptativas utilizando gamificación.
- Validar toda la propuesta en el Ciber Range del Mando Conjunto del Ciber Espacio (MCCE) del Ministerio de Defensa de España.

En este proyecto se incorporan técnicas de Inteligencia Artificial con aprendizaje adaptativo para que los escenarios puedan adaptarse de forma específica a cada estudiante y poder realizar cibermaniobras adaptativas con gamificación. Se incorporan sistemas de telemetría que captan información sobre la ejecución de los ejercicios por el usuario, diversos datos biométricos sobre el uso del sistema y técnicas de gamificación que permite la adaptación de escenarios en base a las capacidades, desempeño y estrés del usuario.

### 2.3.2. Proyecto SEDA

El proyecto SEDA (SatEllite Data Ai) expuesto en [42] y [43], surgió a finales del 2018 y fue seleccionado dentro del Programa Coincidente del Ministerio de Defensa con el que se financió a la empresa HI Iberia Ingeniería y Proyectos S.L. con 358.182,00 € para su desarrollo. Es un sistema inteligente geoespacial, implementado en una plataforma web, que analiza y explota la información satelital para detectar cambios de estado temporales de las imágenes proporcionadas por los satélites.

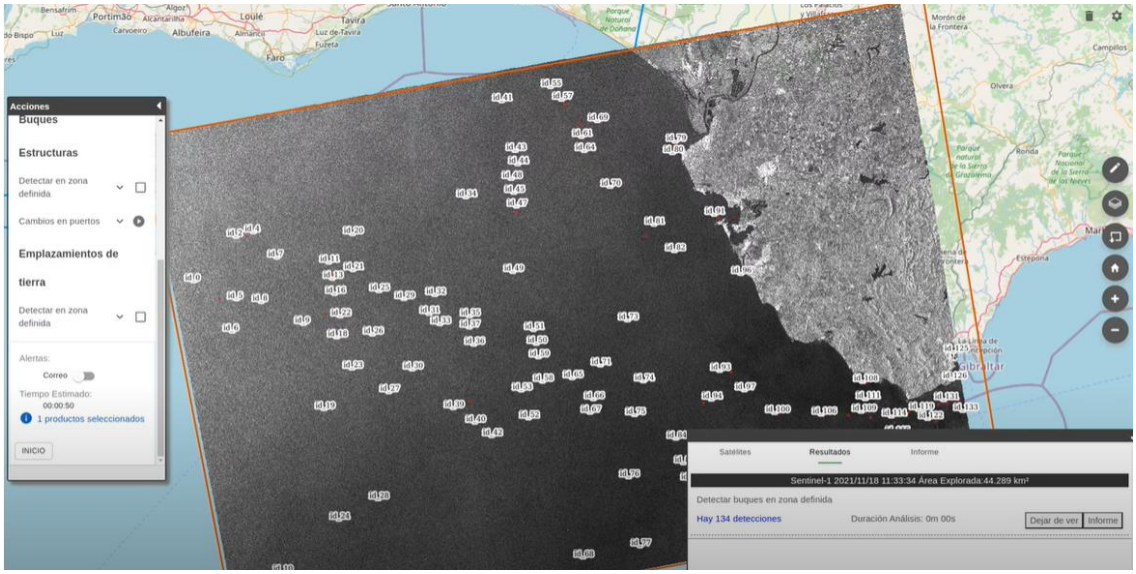



*Figura 15. Captura de pantalla de video de proyecto SEDA en Youtube [43].*

En la Figura 15, se realizó una captura de pantalla de un video de demostración existente en la plataforma Youtube sobre el uso del proyecto SEDA. En el video, el operador seleccionó las fechas en las que quería comprar las imágenes para que, posteriormente, el software le presentara los buques que había en la zona elegida.

El número de satélites orbitando (el proyecto no hace referencia al tipo de constelación de donde se nutre), y lo datos derivados de los mismos, cada vez son mayores, lo que ha hecho pensar en la creación de una herramienta que permita gestionar toda esa información. Se combina el potencial del ML, concretamente del Deep Learning, con el tratamiento de datos y con los avances en el campo de la fusión de datos para analizar automáticamente la información satelital.

Con esta herramienta, dependiendo de las imágenes satelitales con las que se opere, información que no se termina de desvelar, se podría detectar de manera automática el movimiento de tropas o equipos de guerra. Se le podría indicar al sistema que vigile una determinada área y, al compararla con imágenes anteriores, por medio del ML, el sistema podría identificar cambios de estado y avisar al operador de consola de esos movimientos.

### 2.3.3. Proyecto SOPRENE

El proyecto SOPRENE cuyo significado es Sostenimiento Predictivo basado en Redes Neuronales, según [44], consiste en la utilización de redes neuronales como método para el mantenimiento basado en la condición en los buques de la Armada. Esta aspiración surgió en diciembre de 2018, con la adjudicación a Indra Sistemas S.A. de un importe de 714.049,58 € y que a finales de 2022 se continúa trabajando en una mejora de la técnica empleada.

Los buques más modernos de la Armada Española tienen instalados un Sistema Integrado de Control de Plataforma (SICP) con el que principalmente controlan su planta propulsora, su planta eléctrica, máquinas auxiliares y su sistema contraincendios. A este SICP también está asociado un sistema llamado Sistema de Mantenimiento Basado en la Condición (SMBC) al que están conectados cientos de sensores del buque que generan miles de señales y cientos de megabyte de información diaria. Todos estos datos se envían al Centro de Supervisión y Análisis de datos de la Armada (CESADAR) por medio de conexión terrestre de internet cuando están en puerto o vía satélite cuando están navegando, para crear una arquitectura Big Data de señales de los motores de propulsión, generadores eléctricos, bombas contraincendios y muchos otros equipos, de tal forma que se puedan analizar y predecir averías o funcionamientos anómalos.

Principalmente, con el trabajo de Indra, se creó un producto escalable, abierto y con madurez tecnológica objetivo (TRL 7), capaz de gestionar y computarizar los datos de CESADAR en tierra aplicando modelos basados en Deep Learning y predecir fallos. A raíz de este proyecto, según [44], se descubrió la necesidad de iniciar otros como:

- ATAVIA (Automatización de Tareas de Vigilancia y Análisis), cuyo objetivo es la reestructuración de los datos del SICP y del SMBC e integrar los algoritmos de mantenimiento predictivo inferidos en el CESADAR.
- MAPRE (Mantenimiento Predictivo Embarcado), que consiste en modificar el SOPRENE para que computarice mayor número de datos en tiempo real y pueda disponerse de una herramienta predictiva a bordo de los buques, en base a la información disponible en [28].

### 2.3.4. Proyecto GIDE

Las siglas del proyecto GIDE, información procedente de [45], significan Global Information Dominance Experiment (Experimento de dominio de la información global) y, simplificando mucho, podría decirse que su finalidad es la de predecir posibles amenazas tras analizar, por medio de la IA y del ML, todos los datos disponibles en la nube procedentes de satélites, radares, drones, capacidades submarinas, tráfico en las redes y muchos otros. Según la investigación realizada a este respecto, esta tecnología permitiría al ejército de los EE.UU. ver con varios días de antelación los movimientos del enemigo, lo que proporcionaría un entorno táctico ventajoso frente a cualquier ataque.

No obstante, realmente la tecnología empleada en este proyecto no es novedosa. Lo innovador es el empleo de la IA y del ML para cambiar la forma de uso de la información y los datos, de tal manera que se ofrezca al mando militar una visión mayor, ordenada y global, que le permita estar alerta y un mayor tiempo de decisión a la hora de trazar una estrategia. El aprendizaje automático y la IA pueden detectar cambios, permitir al mando establecer unos parámetros de alerta para tomar conciencia y realizar comprobaciones con otros sensores tipo GEOINT para observar de cerca lo que está sucediendo en un lugar específico como se detalla en [46].

### 2.3.5. Proyecto ATLAS

Las siglas del proyecto ATLAS, según [47], significan “Advanced Targeting and Lethality Automated System” (Sistema Automático Avanzado de Objetivo y Letalidad) y su principal objetivo es proporcionar de IA y ML a los tanques de combate de los EE.UU. para que puedan identificar y atacar tres veces más rápido que con los procesos convencionales. Para ello, en este proyecto, se han centrado en desarrollar las siguientes áreas tecnológicas:

- Recopilación de datos sobre los posibles tipos de objetivos militares y realizar un entrenamiento previo del algoritmo de ML empleado.
- Procesamiento de imágenes, donde habría que destacar la capacidad de detección, clasificación, reconocimiento, identificación y seguimiento de objetivos aplicando técnicas de ML para ello.
- Control de disparo. En esta área son muy importantes los algoritmos de orientación avanzados, la automatización del proceso de disparo y la recomendación del arma a emplear según el objetivo identificado.
- El soporte técnico integrado al vehículo de combate puesto que es necesario un sistema de alimentación de alto voltaje (600Vdc) y la integración de sensores y electrónica.
- Sensores. Para poder llevar a cabo toda esta automatización y que el algoritmo de ML disponga de datos de trabajo en tiempo real, los tanques son equipados con sensores de imágenes en las bandas de onda visible, NIR, SWIR, MWIR y LWIR, mecanismos de giro que hacen posible la rotación continua en 360º de los sensores y láseres tipo telémetros y LADAR/LIDAR.

Por tanto, el proyecto ATLAS, desde un punto de vista de la IA y del ML, se centró en desarrollar un algoritmo de aprendizaje capaz de procesar un gran volumen de datos recogidos por los sensores. Su finalidad es la de detectar e identificar amenazas de forma automática y asignar la orientación y elevación correspondiente a los sistemas de armas para proceder al ataque [48]. Además, también se implementa un algoritmo de ML capaz de asignar directamente la mejor arma, de las disponibles, para abatir al objetivo detectado.

# 3. Análisis de la aplicación de ML desde una perspectiva militar.

En este capítulo se toma como referencia los sistemas de defensa presentados en el estado del arte y se evalúa y analiza el uso de ML en sus diferentes componentes. En primer lugar, se han seleccionado las referencias más relevantes que demuestran las opciones actuales de aplicación de ML. A continuación, sobre estas referencias se aplicará un modelo de análisis definido en este trabajo que es explicado en la siguiente sección. Finalmente, basado en este modelo se lleva a cabo un análisis donde se proponen como parte de esta contribución nuevos puntos y usos de aplicación de ML en estos sistemas.

## 3.1. Selección de aplicación de ML en defensa.

En la Tabla 1 se presenta el conjunto de referencias seleccionadas para el objeto de análisis. Se han agrupado considerando los diferentes sistemas de defensa comentados en el estado del arte.

| ML SISTEMAS Y REFERENCIAS | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Sistemas de Información en entornos tácticos | Sistemas de Guerra Electrónica | Sistemas Radar | Sistemas de Dirección de Tiro y Armas | Sistemas No Tripulados | Sistemas de Vigilancia por imágenes | Sistemas de Gestión de Mantenimiento de Unidades y Logística |
| [49] [50] [51] [52] [53] [54] [55] [56] [57] | [58] [59] [60] [61] [62] [63] | [64] [65] [66] [67] [68] [69] | [70] [71] | [72] [73] [74] | [75] [76] [77] | [78] [79] [80] |

*Tabla 1. Relación de sistemas y referencias.*

La finalidad de este estudio es saber con más exactitud cuáles son los avances tecnológicos de la materia y poder comprobar los campos de estudio que ya están abiertos y los que faltarían por emprender o completar en el ámbito de defensa identificando “gaps”. La aplicación del ML en los sistemas militares puede suponer un gran avance en la tecnología y nuevas ventajas frente a los adversarios, y es por ello por lo que se ha considerado conveniente realizar este análisis.

## 3.2. Descripción del método de evaluación.

Para realizar el análisis de la materia, se ha decido diseñar un modelo de tabla en la que se diferencian tres apartados como se muestra en la Figura 16:

- Criterio/círculo azul: está relacionado con los datos generales de las referencias seleccionadas;
- Criterio/círculo verde: consiste en una valoración de los factores destacables y decisivos a tener en cuenta en la aplicación
- Criterio/círculo amarillo: es una valoración de las áreas militares afectadas.

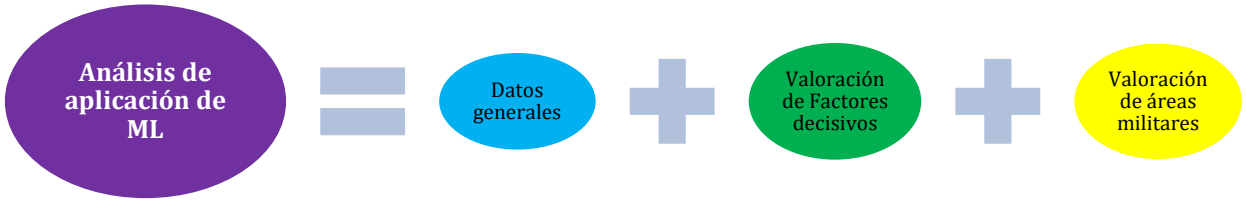



*Figura 16. Herramientas empleadas para el análisis de referencias de ML*

En la Figura 16 se muestra cómo la suma de cada uno de los apartados anteriores, en su color correspondiente, componen el análisis de la referencia objeto, que iría en un tono violeta y daría lugar a cada una de las tablas resultado del análisis. Cada sistema será evaluado por una tabla que compone cada uno de los tres criterios referenciados por colores donde se explicará y analizará la aplicación de la técnica ML correspondiente.

### 3.2.1. Criterio/círculo azul: Datos generales.

Bajo este criterio se aporta información general, información básica que debe presentar cualquier estudio de estas características y recordar que se presenta en color azul en cada una de las tablas posteriores obtenidas del análisis. En la Figura 17 se muestran los conceptos empleados para posteriormente definir cada uno de ellos.

*Figura 17. Datos generales de las referencias*

- **Referencia:** Es la referencia bibliográfica que se va a analizar. De esta forma, se tendrá un enlace directo y ágil con la publicación completa.

- **Aplicación:** Por regla general suele coincidir con el título de la referencia. No obstante, está relacionado con el objetivo de la publicación. Debe responder a la pregunta sobre qué es lo que se quiere conseguir.

- **Trade-off:** En un contexto de economía, se emplea este término como un elemento de compensación, es decir, qué es lo que se gana con la técnica y qué es lo que se pierde. No obstante, en este análisis, solamente se especificará la ventaja, la mejora o el procedimiento que se ha desarrollado. En otras palabras, qué es lo que se hace para conseguir el objetivo o la aplicación.

- **Conceptos novedosos:** Es conveniente saber si con la referencia se ha creado algún concepto no visto anteriormente o poco utilizado y que sea conveniente recordar.

- **Tipo de ML:** Es importante identificar el modelo de aprendizaje que se emplea y el algoritmo. No es lo mismo extender un diseño comercial a un sistema de defensa cuando el algoritmo desarrollado es fuera de línea y no incremental. En el estado del arte se realizó un resumen sobre tipos de ML y clasificación que podría ser de gran ayuda para completar este apartado.

- **Estado de base de datos**: Es trascendental saber con qué datos se ha entrenado el sistema ya que pueden ser insuficientes, obtenidos en un entorno controlado o para una situación específica. Esta información es muy relevante cuando se trabaje con algoritmos supervisados ya que puede limitar el alcance de la aplicabilidad.

### 3.2.2. Criterio/círculo verde: Valoración de factores decisivos al desarrollar productos con ML en entornos tácticos militares.

Los factores decisivos, en color verde en cada una de las tablas posteriores obtenidas del análisis, son aquellos a los que hay prestar especial atención al querer implementar una técnica nueva en un sistema y que servirán para identificar el potencial de los algoritmos o sus limitaciones. Gracias a la consulta que se ha realizado de cientos de referencias, la gran mayoría de ellas aplicadas a productos comerciales, unido al proceso de interiorización de los datos expuestos en el estado del arte, se ha adquirido el bagaje necesario para proponer la observación de los siguientes factores representados en la Figura 18. Son factores decisivos que habría que tener en cuenta a la hora de aplicar la tecnología de ML en los entornos tácticos militares.

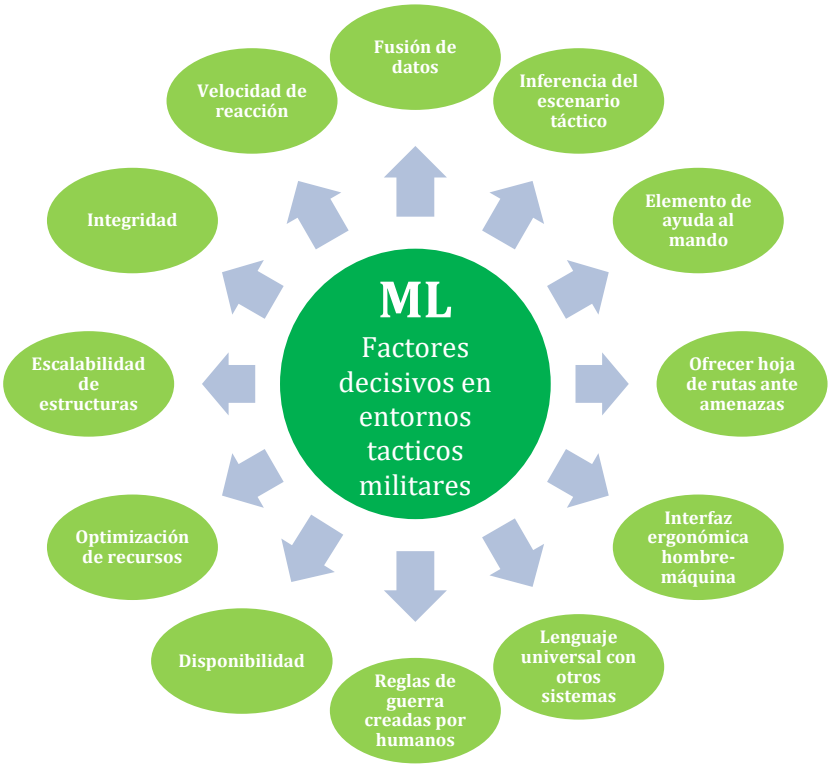



*Figura 18. Valoración de factores decisivos al aplicar ML en entornos tácticos militares.*

La Figura 18 muestra esos conceptos que hay que ir desgranando de las referencias para lograr un análisis valioso. A continuación, se explicará cada uno de éstos para posteriormente presentarlos en las tablas de análisis de las referencias y valorarlos en base a la información disponible:

- **Fusión de datos:** Estos sistemas fusionan información y datos de distintas fuentes y son capaces de procesarlos de manera integral con la finalidad de obtener una descripción precisa y fiable del entorno. Pueden describir aspectos de un objetivo (velocidad, rumbo, tamaño, blindaje…) o un evento (personal implicado, perímetro de seguridad, topografía, zonas hostiles…) a la par que realizan una fusión de capas de datos, de características y una última capa llamada de decisión que auxilia al mando en sus tareas.

- **Inferencia del escenario táctico:** El sistema debe ser capaz de percibir y comprender cada uno de los elementos del escenario y ubicarlos en tiempo y espacio, así como comprender las intenciones del entorno y poder inferir las tendencias de estados. Con los avances tecnológicos, el modelo de guerra ha evolucionado a un combate conjunto integrado, donde toma especial relevancia la unificación y coordinación de todas las unidades de combate (soldados, drones, carros de combate, aviones, barcos, satélites y muchos otros). El combate es ahora multidimensional, formado por un comandante al mando de la operación y multitud de fuerzas de combate de toda índole. Por tanto, es muy

importante que el mando disponga de información de la batalla en tiempo real y para ello es imprescindible procesar la información fusionada y que ésta se reparta adecuadamente a todos los sistemas.

- **Elemento de ayuda al mando:** En el sistema de apoyo a la decisión se diferencia una parte semiestructurada y otra no estructurada. La parte semiestructurada se refiere a la participación del mando cuando toma las decisiones a través del lenguaje humano-máquina y a la manipulación de datos. La parte no estructurada, hace referencia al entorno, al objeto y a los problemas que son inciertos y confusos. En el proceso de toma de decisiones, el conocimiento en su totalidad no puede ser representado por datos o modelos, por lo que no existe una forma específica de aplicar la experiencia y la experiencia histórica. Para ello, el sistema inteligente de apoyo a la decisión puede analizar modelos de guerra de manera cuantitativa y, por otro lado, el uso de técnicas de ML puede realizar un razonamiento del conocimiento y ofrecer un análisis cualitativo de la situación. En el futuro, el comandante al mando seguramente se verá abrumado por la diferencia entre el número de elecciones que tiene que hacer y la información con la que tiene que lidiar.

- **Ofrecer hoja de rutas ante amenazas**: La planificación de rutas se emplea cuando existe la necesidad de evitar amenazar emergentes y la evitación de obstáculos. Para ello es primordial una respuesta rápida, razonable y, a ser posible, seguir un camino optimizado. Las investigaciones que existen al respecto están relacionadas con planificaciones basadas en algoritmos genéticos y planificaciones dinámicas. El principal problema es que, al extender la planificación a 3 dimensiones, la cantidad de datos con la que debe trabajar el algoritmo es muy elevada y la velocidad de convergencia de éstos es muy lenta.

- **Interfaz ergonómica hombre-máquina:** El principal propósito de esta interfaz es facilitar la información al mando de forma correcta, por la mejor vía posible y en el momento más adecuado. Desde el punto de vista de la comprensión humana, siempre ha sido más sencillo entender algo visual, una representación gráfica, que textos o tablas de datos, por lo que sería conveniente evitar estos medios siempre que no fueran necesarios. Es muy importante que el operador, en esta interacción, se sienta guiado, cómodo, natural e, incluso, hasta inspirado.

- **Lenguaje universal con otros sistemas**: El lenguaje máquina para llevar a cabo el ML es universal por lo que todos los sistemas que formen parte del entorno se entenderán de una forma rápida y concisa, dejando a un lado la interpretación. A diferencia del lenguaje empleado por combatientes, por ejemplo, en unas operaciones OTAN, que al tener distinto idioma de raíz podría llevar a equívocos y a extenderse la información de forma no ágil.

- **Reglas de guerra creadas por humanos:** El ML permitirá que algunos sistemas dentro del entorno táctico sean autónomos, lo que supone un abandono del aprendizaje por reglas que se venía implementando hasta ahora. Es muy importante no dejar en manos de las máquinas esas decisiones bélicas.

- **Disponibilidad:** El sistema no debe fallar en ningún momento y los datos deben estar disponibles para los usuarios siempre que lo soliciten. Si el sistema no está disponible en tiempo y forma, podría decirse que la aplicación del ML no aportaría una mejora al sistema.

- **Optimización de recursos:** Como se comentó anteriormente, el combate es ahora multidimensional y por tanto el número de datos que recibe el algoritmo de ML para ofrecer posibles hojas de rutas es muy elevado. Para que el mando pueda disponer en tiempo y forma una solución al problema es imprescindible una utilización eficiente de los recursos. Por ejemplo, no tendría sentido entrar al máximo detalle de un escenario bélico, con un entrenamiento del sistema con millones de variables, si no fuese completamente necesario puesto que eso repercutiría en una ralentización del sistema y un aumento de consumo de recursos.

- **Escalabilidad de estructuras:** Los conflictos bélicos y los escenarios de batalla van evolucionando con nuevos actores, datos y estrategias, por lo que la parte no estructurada del algoritmo debería ser escalable, es decir, admitir grandes cantidades de información y nuevas categorías. El ML aplicado a un entorno militar debería estar preparado para nuevas variables y adaptarse así a los cambios imprevistos que pudieran surgir.

- **Integridad:** El algoritmo de ML debería estar preparado para defenderse de una posible manipulación de datos. El algoritmo debería ser capaz de distinguir entre la recepción de un paquete de datos coherentes, precisos y válidos de los que no lo son. También debería poder alertar si el proceso de entrenamiento o aprendizaje del sistema ha sufrido alguna alteración desde que se validó.

- **Velocidad de reacción:** El tiempo que tarda el algoritmo en ofrecer una respuesta válida al mando debería ser el menor posible. Un sistema en el que se aplique ML para supuestamente mejorarlo, pero la respuesta obtenida es dada fuera de tiempo, no mejora el sistema. Justamente, la aplicación de ML en entornos militares tiene cabida si mejora la velocidad de reacción del mando ante una amenaza.

### 3.2.3. Criterio/círculo amarillo: Valoración de áreas militares afectadas.

Al aplicar una técnica de ML a un sistema de defensa, es muy importante identificar qué áreas militares pueden verse afectadas. También es interesante descubrir nuevas aplicaciones de un artículo puesto que, en algunas ocasiones, se enfoca una referencia para mejorar una capacidad en concreto y los autores no se han percatado de que, realizando una pequeña modificación al algoritmo, o entrenándolo con otro enfoque, el mismo programa con otros datos podría mejorar más de un área. Las áreas militares que se han creído conveniente analizar, coloreadas en fondo amarillo en la Figura 19, son las siguientes:

*Figura 19. Valoración de áreas militares al aplicar ML en entornos tácticos militares.*

En la Figura 19 se representan las áreas militares que podrían verse afectadas al aplicar el ML. Es importante destacar que no siempre es necesario que exista una consecuencia directa sobre la misma, también es interesante identificar áreas potencialmente mejorables por la sinergia del estudio. Por ejemplo, el desarrollo de una nueva tecnología radar afectaría directamente a las áreas de “apoyo a las decisiones del mando”, “inteligencia militar” y “operaciones” e indirectamente a las “nuevas construcciones” debido a que sería conveniente plantear una mejora en la construcción de nuevas unidades para que no sean detectadas. Dicho lo anterior, a continuación, se explican cada uno de los conceptos representados en la Figura 19:

- **Ejército de referencia:** En el ámbito de Defensa, la mayoría de los proyectos novedosos son promovidos por la Dirección General de Armamento y Material (DGAM) de la Secretaría de Estado de Defensa del Ministerio de Defensa. El planeamiento de esta Secretaría de Estado busca satisfacer, tanto las necesidades que emanan del planeamiento militar, como aquellas otras que de igual forma contribuyen al cumplimiento de otros objetivos de la política de defensa. No obstante, por regla general, siempre suele haber un ejército de referencia que inicia y propone las necesidades de esas nuevas construcciones y el que marca unas directrices técnicas y operativas deseables que debieran de cumplir esos nuevos desarrollos.

- **Estrategias de guerra en conflictos armados:** Para analizar esta área es conveniente conocer el significado de estrategia de guerra y de conflicto armado. Por estrategia de guerra se entiende el planeamiento y la dirección de las campañas bélicas, así como del movimiento y disposición estratégica de las fuerzas militares, con el propósito de vencer al enemigo. Por conflicto armado, según el Derecho Internacional Humanitario (DIH), en sentido estricto, sería un enfrentamiento violento entre dos grupos humanos de tamaño masivo y que generalmente, tendrá como resultado muertes y destrucción material. Por tanto, en esta área se analizará, si las referencias seleccionadas que hacen uso de ML, al ser aplicadas a los sistemas militares propuestos, repercuten en una mejora de las estrategias de guerra.

- **Apoyo a las decisiones del mando:** La posibilidad de materialización de un conflicto armado obliga a que los estados integren la fuerza militar como un instrumento de poder nacional para el planeamiento y desarrollo de una ofensiva. Para que esta ofensiva sea efectiva, el mando que toma las decisiones debe disponer de una estructura de poder eficaz, segura y colaborativa, tanto para las relaciones horizontales como para las verticales. Toda información veraz, dispuesta en tiempo y forma, posibilita el asesoramiento o el apoyo oportuno y eficaz en la toma de decisiones.

- **Ciberseguridad - ciberataques y ciberdefensa:** En la cumbre OTAN de Varsovia de julio de 2016, se reconoció el ciberespacio como el quinto dominio de las operaciones militares. Entiéndase el dominio ciberespacial como el dominio global virtual compuesto tanto por las redes interconectadas como por las redes y sistemas aislados o independientes según [81]. El ciberespacio se extiende desde los sensores desplegados en los campos de batalla hasta las redes centrales de mando y control incluyendo sus infraestructuras de red como se indica en [82].

  Los antivirus y firewalls continúan siendo imprescindibles en la ciberseguridad pero las medidas preventivas han tenido que ir aumentándose y particularizándose según han ido evolucionando también las amenazas. La

protección de un sistema depende de la ejecución de procesos específicos como Intrusion Detection System (IDS), Intrusion Prevention System (IPS), Net Access Control (NAC), Data Loss Prevention (DLP), Mobile Device Management (MDM) y un largo etcétera. Cada uno de estos procesos debe ser nutrido periódicamente con las nuevas vulnerabilidades conocidas, listas negras de direcciones IP, dominios maliciosos, firmas de malware y patrones de ataque, entre otros según [83].

Dentro de la ciberseguridad, el ML podría ser aplicado en las siguientes áreas. Algunas de ellas ya tienen proyectos desarrollados como el de la autentificación de la identidad del combatiente según su zancada, detallado en [54].

- La identificación de usuarios.
- La detección y mitigación de vulnerabilidades.
- El desarrollo de software seguro.
- La detección de malware.
- La detección de ataques.
- La reacción ante ataques.
- La restauración de sistemas.
- La consciencia situacional.
- La toma de decisiones.

A partir de este concepto de Ciberseguridad, habría que tener en cuenta que los algoritmos de ML pueden estar orientados a la ciberdefensa, pero también orientados a realizar ciberataques. Otro punto de vista distinto es que los propios algoritmos propuestos en las referencias puedan sufrir ciberataques por su exposición al medio y que por tanto pierdan fiabilidad o validez.

- **Inteligencia Militar:** Las técnicas de análisis de Big Data y la visión por computadora se utilizan con fines militares para extraer información de objetivos muy valiosa de diferentes fuentes con conjuntos de datos muy grandes y diversos que incluyen datos estructurados, semiestructurados y no estructurados en diferentes tamaños, desde terabytes hasta zettabytes. El aprendizaje automático puede utilizarse para agrupar datos de mensajes, datos de identidad estatal, gráficos, hojas de cálculo, registros telefónicos, documentos dentro de una base de datos estatal, como informes policiales archivados, datos de red, sensores datos y video para encontrar los patrones relacionados con los objetivos militares y ayudar a la investigación militar. Una subárea podría ser la vigilancia aérea o espacial donde los sistemas inteligentes de identificación y monitoreo de objetivos utilizan la visión artificial para identificar y rastrear objetivos. Con una vigilancia espacial o aérea inteligente se podría categorizar e identificar de manera muy eficiente cualquier objetivo visible a los satélites en uso o vehículos no tripulados entre las enormes sumas de imágenes de vigilancia tomadas por estos dispositivos.

- **Mantenimiento unidades:** El mantenimiento también necesita ser más inteligente. Las tecnologías de Big Data combinadas con el ML pueden mejorar la eficiencia del mantenimiento de las unidades de la fuerza militar. Con una base de datos bien armonizada donde se disponga de los datos históricos de averías, mantenimientos preventivos y correctivos, y un sistema de gestión de apoyo logístico entrenado con un algoritmo de ML, se podrían predecir las averías de los sistemas y estar preparados para subsanación en el menor tiempo posible. Esto repercutiría en una planificación y adquisición temprana de los repuestos necesarios y en una mayor operatividad temporal de las unidades.

- **Nuevas construcciones:** Esta área se ha considerado objeto de estudio principalmente por dos factores. El primero es que la aplicación de ML en algunos sistemas junto a sus predicciones puede anticipar ganadores u objetivos en las batallas. Por tanto, en determinadas ocasiones y para evitar lo anterior, el uso de ML en algunos sistemas puede ser un incentivo de desarrollo de nuevas construcciones para las que los sistemas entrenados no están preparados y se pueda sorprender al oponente. En segundo lugar, algunos algoritmos de ML pueden ser de interés en las nuevas construcciones, mejorando los procesos de fabricación como podría ser la creación del gemelo digital.

- **Operaciones aéreas:** Suelen considerarse todas aquellas operaciones que se lleven a cabo en el medio aéreo y se caracterizan por tener unas unidades de fuerza mucho más móviles, rápidas y flexibles que el resto. Esta última característica permite especialmente utilizarlas en operaciones muy diversas, como pueden ser despliegues amenazantes o papeles disuasorios.

- **Operaciones terrestres:** Antes de nada, es conveniente ser conscientes de que en el medio terrestre es donde vive la población, en donde se producen los acontecimientos más relevantes, y en donde se encuentran los centros neurálgicos políticos, económicos y financieros. Por tanto, las operaciones terrestres es un área muy importante para este análisis de aplicación de ML. Como regla general, se podría decir que la finalidad de estas operaciones es obtener, mantener y explotar la iniciativa para ganar y conservar una posición de relativa ventaja en las operaciones terrestres sostenidas a través de simultáneas operaciones ofensivas, defensivas y de estabilización para evitar o disuadir el conflicto, predominar en la guerra y crear las condiciones favorables para la resolución del conflicto según autor [84].

- **Operaciones navales:** El medio en el que se desarrollan este tipo de operaciones es el acuático. Según referencia [85], la fuerza naval se caracteriza por su movilidad estratégica, por su alta disponibilidad, su versatilidad, su interoperabilidad y su autonomía logística. Por otra parte, según referencia [85], el planeamiento y la conducción de las operaciones navales, en cualquiera de

los niveles estratégico, operacional y táctico, tiene como principios operativos, entre otros, la flexibilidad, la definición del objetivo, el mantenimiento de la moral, la unidad de esfuerzo, la economía del esfuerzo, un enfoque integral, la seguridad, la sorpresa y la sencillez.

- **Logística:** El transporte de materiales, municiones, víveres, personal y mantenimiento de equipos son prioridades en el trabajo de logística militar. La integración del ML en esta área puede mejorar en gran medida la eficiencia del transporte, detectar anomalías en la flota, una mayor disponibilidad temporal de las unidades y un considerable ahorro económico por prever con suficiente antelación las necesidades o un mejor aprovechamiento de los recursos materiales y personales dedicados a la logística.

- **Entrenamiento unidades:** El entrenamiento de unidades militares, desarrollado en un entorno físico real, es muy costoso y arriesgado debido a que siempre hay riesgos de accidentes. El ML abre una puerta a la realidad virtual y a la realidad aumentada personalizada, brindando la oportunidad a realizar un sinfín de entrenamientos en los escenarios que se deseen. Por ejemplo, en base a la recolecta de datos que se hace de cada combatiente, el sistema de ML podría predecir las carencias de cada uno y centrar los entrenamientos justamente en sus puntos débiles.

Una vez explicadas las diferentes partes que componen las tablas de análisis, así como los factores que la componen, en los sucesivos subapartados, cada uno correspondiente a uno de los siete sistemas de defensa descritos en el estado del arte, se procederá al análisis de las referencias aplicables.

## 3.3. ML aplicado a los Sistemas de Información en entornos tácticos.

Existen diversas publicaciones cuya finalidad es mejorar los sistemas de información en los entornos tácticos militares haciendo uso del ML. Como se comentó anteriormente, en las siguientes tablas se mostrará un análisis de las publicaciones más relevantes con los conceptos vistos en el apartado anterior y se indicará a qué áreas militares podrían afectar.

| Sistemas de Información en entornos tácticos | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Datos | **Referencia** | [49] | [50] | [51] |
| | **Aplicación** | Arquitectura multiagente descentralizada para optimizar la comunicación de aplicaciones militares en redes tácticas DIL | Introducción de un clasificador de aprendizaje automático para determinar qué tipo de datos de | Mejorar la detección de espectro radioeléctrico libre, basada en aprendizaje automático, para |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | utilizando técnicas cross-layer (CL) optimizadas con ML. | dispositivos IoBT transmitir en el campo de batalla y en qué condiciones | aplicaciones de radio definidas por software |
| | **Trade off** | Refuerzo descentralizado basado en ML para mejorar la red donde cada nodo está optimizado por un agente CL que emplea aprendizaje por refuerzo para actuar en función de sus observaciones locales | Convertir datos en tiempo real de dispositivos C4ISR IoBT en datos seguros, fiables y útiles debido a que los dispositivos IoBT necesitan intercambiar datos y recibir comentarios de otros dispositivos, como tanques e infraestructura de comando y control en tiempo real. | Solventar la escasez de espectro al proporcionar un alto nivel de flexibilidad y configurabilidad a los sistemas de comunicación inalámbrica. |
| | **Conceptos novedosos** | Redes DIL (Desconectadas, Intermitentes y Limitadas); capas de servicios C2IS (Sistemas de Información de Comando y Control); Graph Neural Network architectures (GNN) | Dispositivos C4ISR (Comando, Control, Comunicaciones, Computadoras, Inteligencia, Vigilancia y Reconocimiento); Dispositivos IoBT (Internet of Battlefield Things); red blockchain JointField; | Software-defined radio (SDR); Cognitive Radio (CR) networks |
| | **Tipo de ML** | Aprendizaje por refuerzo en función de las observaciones del CL | Se comparan algoritmos Support Vector Machine, Bayes Point Match, Boosted Decision Trees, Decision Forests y Decision Jungles. | Se comparan 4 modelos de aprendizaje automático supervisado: Naïve Bayes classifier, Support Vector Machine, Gradient Boosting Machine y Distributed Random Forest. |
| | **Estado de base de datos para el entrenamiento** | Las acciones realizadas por agentes tácticos, las relaciones señal-ruido calculadas entre cada par de unidades y posiciones, se almacenan en la base de datos Tactical Replay | No encontrada base de datos específicamente militar. El estudio recomienda pruebas en entorno real | No encontrada base de datos específicamente militar |
| **Valoración de factores decisivos** | **Fusión de datos** | N/A | Si, los datos en los sistemas IoBT suelen ser masivos (tanques, vehículos, centro control…) | N/A |
| | **Inferencia escenario táctico** | La comunicación dependerá del entorno. Inferencia necesaria. | Si, necesita saber qué datos y dispositivos del campo de batalla tienen prioridad | Si, estudia la ocupación del espectro radioeléctrico |
| | **Elemento ayuda mando** | Si | Si | Si, busca espectro libre para transmitir información |
| | **Ofrecer hoja de rutas ante amenazas** | Si, al ofrecer una arquitectura descentralizada | No, puede priorizar mensajes como la detección de explosivos (IED) pero no ofrece una hoja de rutas ante eso. | Si, estudia la ocupación del espectro y propone zona libre |
| | **Interfaz ergonómica hombre-máquina** | N/A | N/A | N/A |
| | **Lenguaje universal con otros sistemas** | Si, necesita entenderse con los CL | Si, deben entenderse todos los dispositivos | Si, los 4 algoritmos son válidos en SDR |
| | **Reglas de guerra humana** | N/A | N/A | N/A |
| | **Disponibilidad** | La tasa de datos puede variar según la topología de enrutamiento o la calidad de las conexiones. | Decision Jungles produce los resultados más precisos y requiere la menor cantidad de recursos | El algoritmo Naïve Bayes es el más adecuado de los 4 estudiados. |
| | **Optimización de recursos** | Si, intenta emplear todos los recursos de la red para transmitir | Si, el clasificador basado en ML decide qué transmitir de los datos masivos | Si |
| | **Escalabilidad de estructuras** | Si, debe extenderse a los nodos | Si, debería aplicarse a todos los escenarios | Si |
| | **Integridad** | Podrían sufrir ataques los nodos | Estudiar ruta de transmisión teniendo en cuenta las amenazas dinámicas | Si |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Velocidad de reacción** | Dependerá de nodos y CL | Decision Jungles produce los resultados más precisos y requiere la menor cantidad de recursos | Bajo rendimiento para la detección de espectro ensanchado |
| **Valoración de áreas militares afectadas** | **Ejército de referencia** | Ejército de Tierra | Ejército de Tierra | Ejército de Tierra |
| | **Estrategias de guerra en conflictos armados** | ✓ | ✓ | N/A |
| | **Apoyo decisiones mando** | ✓ | ✓ | Si, es un sistema para transmitir en espectro libre |
| | **Ciberseguridad** | Habría que estudiar la posible manipulación de nodos y CL | El estudio recomienda aprovechar la teoría de juegos para compartir datos aparentemente confidenciales con los enemigos como método de engaño | Habría que estudiar la posible manipulación del espectro |
| | **Inteligencia Militar** | ✓ | ✓ | Si, es un sistema para transmitir en espectro libre |
| | **Mantenimiento unidades** | N/A | N/A | N/A |
| | **Nuevas construcciones** | N/A | N/A | N/A |
| | **Operaciones aéreas** | Podría aplicarse pero pocos nodos | N/A | Podría aplicarse |
| | **Operaciones terrestres** | ✓ | ✓ | Si |
| | **Operaciones navales** | Podría aplicarse pero pocos nodos | N/A | Podría aplicarse |
| | **Logística** | ✓ | ✓ | Podría aplicarse al cubrir una transmisión con menos equipos |
| | **Entrenamiento unidades** | ✓ | ✓ | Podría aplicarse |

*Tabla 2. ML aplicado a los Sistemas de Información en entornos tácticos (1 de 3).*

| Sistemas de Información en entornos tácticos | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Datos generales** | **Referencia** | [52] | [53] | [54] |
| | **Aplicación** | Predicción de la ubicación del enemigo en combate naval mediante el aprendizaje profundo | Simulación de guerra para predecir el buque de guerra ganador usando Random Forest | Describe el marco TAK-ML para recopilar datos, construir modelos y ejecutar/emplear modelos en entornos tácticos próximos al soldado |
| | **Trade off** | Predecir ubicación y movimientos del enemigo naval en función de las posiciones conocidas | Predecir buque ganador a partir de 7 características (tamaño, velocidad, capacidad, número de tripulantes, ataque, ataque adicional y defensa) | Explotar información suministrada por sensores del campo de batalla para proporcionar servicios a otras aplicaciones (TAK-ML) |
| | **Conceptos novedosos** | Inferencia de intenciones adversarias | Bucle OODA (Observar, Orientar, Decidir y Actuar) | Every Soldier is a Sensor (ES2), ecosistemas Tactical Assault Kit (TAK), conciencia ambiental y situacional(SA) |
| | **Tipo de ML** | Se implementa una Red Neuronal Artificial (ANN) y Random Forest | Aprendizaje automático supervisado tipo Random Forest | TAK-ML armoniza, entre otros, bibliotecas de ML en servidores |
| | **Estado de base de datos para el entrenamiento** | Modelos entrenados y probados con datos de juego de World of Warship de exoficiales navales. | La referencia emplea 9660 conjuntos de datos de acorazados (7728 entrenamiento-1932 prueba) | Los servidores TAK recopilan, fusionan y analizan datos. TAK-ML armoniza sensores, bibliotecas de ML, hardware y aplicaciones para una batalla ES2. |
| **Valoración de** | **Fusión de datos** | Si, se propone un mapa predictivo de la ubicación del enemigo en tiempo real integrado en un sistema de realidad aumentada | Si, necesita saber las 7 características del acorazado | Si, permite a soldados y comandantes compartir marcadores de mapa, chat, video e imágenes en la batalla |
| | **Inferencia escenario táctico** | Si, para poder ubicar al enemigo | No, el estudio no contempla el escenario | Depende de la aplicación a la que TAK-ML proporcione servicio. |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Elemento ayuda mando** | Si, con solo 3 juegos tiene capacidad de predicción del 40% | Si, pero faltan factores a tener en cuenta en el enfrentamiento | Si, existen aplicaciones como reconocimiento de imágenes genérico |
| | **Ofrecer hoja de rutas ante amenazas** | No, solo predice posición del enemigo. Podría ser otro estudio | No, el estudio no contempla hojas de ruta | Si, existe aplicación de aprendizaje del terreno durante el descenso y evasión |
| | **Interfaz ergonómica hombre-máquina** | Si, se propone superponer mapa predictivo con realidad aumentada | Si, pero solo aporta si gana o pierde | Si, las aplicaciones suelen ser visuales |
| | **Lenguaje universal con otros sistemas** | N/A | N/A | Si, TAK-ML es el medio para aportar información a otras aplicaciones |
| | **Reglas de guerra humana** | Si, la referencia se basa en decisiones tomadas por exoficiales | Si, en base a las 7 características | Depende de la aplicación |
| | **Disponibilidad** | Si, ANN demostró ser superior | Si, algoritmo aparentemente sencillo | Principalmente depende de cobertura |
| | **Optimización de recursos** | Si, ANN demostró ser superior | Si, algoritmo aparentemente sencillo | Si, armoniza y centraliza todo |
| | **Escalabilidad de estructuras** | La referencia efectúa su estudio con 6 buques contra 6 buques. No determina ampliación de unidades | No, se plantea como trabajo futuro con más datos | Si, su función es armonizar datos, bibliotecas de ML… para dar servicio a todas las aplicaciones que se quiera |
| | **Integridad** | Habría que estudiar la interferencia de señales enemigas falsas | No, se estudian pocas características y el resultado puede no ser válido | Si, activada configuración TLS/SSL en TAK-ML |
| | **Velocidad de reacción** | ANN demostró ser superior | Si, algoritmo aparentemente sencillo | Dependerá de aplicación y cobertura |
| **Valoración de áreas militares afectadas** | **Ejército de referencia** | Armada | Armada | Tierra |
| | **Estrategias de guerra en conflictos armados** | ✓ | Si, aunque el estudio con Random Forest tiene 80% de precisión. | Si, dependerá de la aplicación |
| | **Apoyo decisiones mando** | ✓ | ✓ | Si, dependerá de la aplicación |
| | **Ciberseguridad** | Podría enviarse señales falsas de ubicaciones y engañar al sistema | N/A | Estudiar el envío de señales falsas al servidor o la manipulación de éste. Tiene activada TLS/SSL en TAK-ML |
| | **Inteligencia Militar** | Podría verificarse la predicción con imágenes satelitales o UAVs | ✓ | Si, dependerá de la aplicación |
| | **Mantenimiento unidades** | N/A | N/A | Si, podría desarrollarse aplicación de reparación en combate -gemelo digital |
| | **Nuevas construcciones** | Aliciente para la construcción de nuevas plataformas navales y sorprender al sistema entrenado | Aliciente para la construcción de nuevas plataformas navales y sorprender al sistema entrenado | Si, este marco armonizador abre una puerta a la construcción de nuevas aplicaciones |
| | **Operaciones aéreas** | Podría modificarse el algoritmo | Podría modificarse el algoritmo | No principalmente |
| | **Operaciones terrestres** | Podría modificarse el algoritmo | Podría modificarse el algoritmo | ✓ |
| | **Operaciones navales** | ✓ | ✓ | Si, podría usarse en guerra asimétrica |
| | **Logística** | ✓ | ✓ | Si, dependerá de la aplicación |
| | **Entrenamiento unidades** | ✓ | ✓ | Si, dependerá de la aplicación |

*Tabla 3. ML aplicado a los Sistemas de Información en entornos tácticos (2 de 3).*

| Sistemas de Información en entornos tácticos | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Datos generales** | **Referencia** | [55] | [56] | [57] |
| | **Aplicación** | Algoritmo LSTM-DQN y red profunda para resolver el problema de planificación de maniobras BVR | Sistema de toma de decisiones de defensa antimisiles en escenarios de información incompleta | ML en Superficies Inteligentes Reconfigurables (RIS) para mejorar capacidad y cobertura de la red |
| | **Trade off** | Evitar la amenaza del enemigo y reunir ventajas propias para | Enfrentarse a un ataque masivo de misiles durante un corto espacio de tiempo. | Maximizar ventajas de sistemas de comunicación inalámbrica cuando |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | amenazar al objetivo. Realizar un combate aéreo inteligente | | aumenta la cantidad de interacciones en la infraestructura. |
| | **Conceptos novedosos** | Combate aéreo más allá del alcance visual (BVR); toma de decisiones reactiva y toma de decisiones deductiva en combate aéreo | N/A | Superficies Inteligentes Reconfigurables (RIS) |
| | **Tipo de ML** | Red profunda Q mejorada (DQN) basado en la celda de memoria a corto plazo (LSTM) donde la capa de situación de percepción convierte el estado básico en una situación de percepción de alta dimensión. | Método híbrido que combina un modelo de hipótesis de probabilidad previa de ataque y un marco de aprendizaje de refuerzo | Aprendizaje supervisado, aprendizaje no supervisado, aprendizaje por refuerzo y aprendizaje federado |
| | **Estado de base de datos para el entrenamiento** | No se indica. | Faltaría agregar factores como el ángulo y aumentar los tipos y escalas de los misiles y activos | No se indica, pero realizado con proyecto de comunicación simple |
| **Valoración de factores decisivos** | **Fusión de datos** | Si, sobre todo en los modelos de movimiento de vuelo y relativo. | Si, debe fusionar capa de ataque con capa de misiles de defensa y activos | Si, la RIS debe retransmitir datos a otros sistemas o sensores |
| | **Inferencia escenario táctico** | Si, se crea un entorno de combate básico, que incluye principalmente un modelo de movimiento de vuelo, un modelo de movimiento relativo y un modelo de ataque con misiles | Se desconoce la distribución de misiles de ataque a diferentes tipos de activos | Deben abordarse los problemas de evaluación de Información del Estado del Canal (CSI) y de optimización del rendimiento de la red en condiciones deficientes de CSI. |
| | **Elemento ayuda mando** | Si, auxilia al piloto | Si, ofrece alternativas al ataque | Si, es una manera de extender una red inalámbrica en al campo de batalla |
| | **Ofrecer hoja de rutas ante amenazas** | Si, evade amenaza y puede ofrecer una posición garante | Si, optimiza la asignación de misiles de defensa y mantiene el máximo de activos protegidos | N/A |
| | **Interfaz ergonómica hombre-máquina** | No se determina, pero se sobreentiende que gráfica | No se determina, pero se sobreentiende que gráfica | N/A |
| | **Lenguaje universal con otros sistemas** | No se determina, pero se podría estudiar una alternativa automática | Si, podría entenderse directamente con el sistema de misiles de defensa | Si, debe entenderse con otros sistemas o sensores para poder reenviar la información a otros puntos |
| | **Reglas de guerra humana** | Si, se establecen los 3 modelos de movimiento y dentro del ataque con misiles una serie de envolventes | Si, debe existir una lista de activos a proteger | N/A |
| | **Disponibilidad** | Realmente el estudio se centra en el combate de corto alcance | El método híbrido supera al método heurístico y DQN. La velocidad de convergencia les supera en 20% | Se requiere información precisa y continua del estado del canal para una reflexión óptima en el RIS |
| | **Optimización de recursos** | N/A | Si, se emplea el armamento defensivo justo. | Logra mayor espectro y mejora eficiencia energética |
| | **Escalabilidad de estructuras** | N/A | No se determina. Debería adaptarse al número de misiles disponibles. | Si, la estructura es escalable según los elementos que compongan la RIS |
| | **Integridad** | Si, detecta datos del campo de batalla de los dos lados, calcula las mejores tácticas y proporciona a los pilotos una solución de planificación de maniobras | Baja, la distribución de misiles de ataque a cada tipo de activo es desconocida y está estrechamente relacionada con la estrategia de asignación de misiles de defensa. | Aumenta significativamente la calidad del enlace y minimiza la posibilidad de bloqueos. |
| | **Velocidad de reacción** | Lento si se emplea un método de toma de decisiones deductivo | Método híbrido posibilita despliegue en tiempo real | Para ser útil en sistemas militares debe ser en tiempo real |
| **Valoración** | **Ejército de referencia** | Aire y Espacio | Tierra | Tierra |
| | **Estrategias de guerra en conflictos armados** | Si, aporta una estrategia aérea para lance de misiles aire-aire y ataque efectivo de objetivos enemigos | Si, la estrategia puede basarse en priorizar activos a defender | Si, da la opción de crear una red inalámbrica en el campo de batalla para compartir información |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Apoyo decisiones mando** | Si, proporciona un plan de acción para las aeronaves | Si, auxilia en la asignación de misiles | Si, el mando podría enviar y recibir información real de la batalla |
| | **Ciberseguridad** | Pendiente estudiar interferencias de la parte de toma decisiones en línea | N/A | Habría que estudiar posibles interferencias inalámbricas |
| | **Inteligencia Militar** | N/A | Debería converger con la inteligencia militar y tener información del ataque | Si, puede desplegarse una RIS con UAV y obtener información |
| | **Mantenimiento unidades** | N/A | N/A | N/A |
| | **Nuevas construcciones** | N/A | N/A | N/A |
| | **Operaciones aéreas** | ✓ | ✓ | ✓ |
| | **Operaciones terrestres** | Podría modificarse el algoritmo | Podría modificarse el algoritmo | ✓ |
| | **Operaciones navales** | Podría modificarse el algoritmo | Podría modificarse el algoritmo | ✓ |
| | **Logística** | N/A | N/A | N/A |
| | **Entrenamiento unidades** | Si, el algoritmo podría adaptarse a simulaciones de entrenamiento | Si, el algoritmo podría adaptarse a simulaciones de entrenamiento | Si, debería entrenarse las capacidades de uso de la red en la batalla |

*Tabla 4. ML aplicado a los Sistemas de Información en entornos tácticos (3 de 3).*

## 3.4. ML aplicado a Sistemas de Guerra Electrónica.

Los sistemas de guerra electrónica son muy importantes en el campo de batalla. Como puede apreciarse en la referencia [86] estos sistemas permiten controlar, atacar o impedir acciones del enemigo relacionadas con el espectro electromagnético o energía dirigida. A continuación, se analizará una selección de referencias actuales sobre la aplicación de ML en la guerra electrónica.

| Sistemas de Guerra Electrónica | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Datos generales** | **Referencia** | [58] | [59] | [60] |
| | **Aplicación** | Sistema EW integrado asistido por ML que toma decisiones EW, navega automáticamente y evalúa amenaza | Programa espacial 3D Explorer para simular entornos CEW con atacante electrónico UAV y defensor estación de observación (ambos con radar) | Construcción de modelo reducido de formas de ondas electromagnéticas, para simulaciones radar y EW, mediante un morfismo aproximado |
| | **Trade off** | Detectar y combatir radares hostiles, aplicar ML para clasificar señales, sistema EW cognitivo que razona sobre escenario y elige contramedidas óptimas | Realizar un proceso autónomo de decisión de detección de amenazas, clasificación y selección de contramedidas. | Mejorar la eficiencia computacional de las simulaciones de radar y EW |
| | **Conceptos novedosos** | Sistemas de radar cognitivo y multimodo. | Guerra electrónica cognitiva (CEW), tareas CEW con algoritmo DRL | Acoplamiento entre representación y algoritmos que operan sobre la representación, orquestado por el morfismo aproximado. |
| | **Tipo de ML** | Generador automático de árboles de decisión para crear un protocolo de participación. Modelo de lógica difusa para cuantificar los niveles de amenaza. Red neuronal de memoria a corto plazo (LSTM) para predecir el siguiente conjunto de señales de radares multifunción | Método bayesiano variacional que aproxima el modelo de aprendizaje de refuerzo profundo (DRL) a una red de reconocimiento recurrente profunda de dos capas LSTM. | Aprendizaje automático supervisado y no supervisado |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Estado de base de datos para el entrenamiento** | El árbol de decisiones se genera automáticamente a partir de encuentros EW simulados y datos. | Algoritmo de gradiente de política determinista profunda (DDPG), basado en un modelo generativo y una estimación bayesiana variacional, que aprende el control óptimo en el espacio de estado potencial aprendido utilizando experiencias muestreadas | No se contempla. Se identificaron fuentes subyacentes de error en este marco y se propone para futuras investigaciones estudiar estas limitaciones. Formular el problema de aprendizaje de manera unificada para aumentar la eficiencia del resultado. |
| **Valoración de factores decisivos** | **Fusión de datos** | Si, los entornos EW son difíciles de analizar por la variabilidad de datos | Se necesita controlar la velocidad y la dirección de movimiento del UAV a la par que se verifica la integridad de la función del sistema CEW | Si, existe un acoplamiento representativo de la señal muestreada y del morfismo |
| | **Inferencia escenario táctico** | Si, los sistemas EW deben modelar con precisión su entorno para tomar decisiones y aumentar supervivencia | Para buscar la estación puede cuadricular el mapa de la misión + inferencia bayesiana o aplicar método de computación evolutiva | N/A |
| | **Elemento ayuda mando** | Si, el sistema EW cognitivo detecta objetivos, adquiere objetivos, sigue objetivos y orienta la plataforma | Si, para localizar estaciones terrestres que estén transmitiendo | N/A |
| | **Ofrecer hoja de rutas ante amenazas** | Si, el modelo de evaluación de EA (Electronic Attack) recomienda: no hacer nada, evitar, aplicar EA o aplicar EA a un radar y evitar otro. | No, no se contempla. | N/A |
| | **Interfaz ergonómica hombre-máquina** | Supuestamente la interfaz es visual, aunque no se especifica. | No, no se contempla | N/A |
| | **Lenguaje universal con otros sistemas** | Si, debe entenderse con otros sistemas radar y con contramedidas | Tanto el UAV como la estación terrestre usan sensor de observación tipo radar | Se busca formular el problema de aprendizaje de manera unificada para aumentar la eficiencia |
| | **Reglas de guerra humana** | Se determina nivel amenaza radar observado según distancia y modo | En este caso sí al ser una simulación tipo juego. | N/A |
| | **Disponibilidad** | El sistema EW desarrollado se probó en entorno simulado de SW contra múltiples radares multifunción y obtuvo resultados satisfactorios. | La falta de información previa, la observabilidad parcial del entorno y las restricciones físicas de maniobrabilidad del UAV dificultan la planificación continua de acciones | Dos problemas. La pérdida de información por morfismo y el error en las aproximaciones del algoritmo de aprendizaje supervisado a ejemplares de baja dimensión |
| | **Optimización de recursos** | Resultado mejor con red neuronal de memoria a corto plazo (LSTM) | No, no se contempla | Si, el morfismo evita cuello de botella computacional. |
| | **Escalabilidad de estructuras** | Si, enfoque permite actualizaciones automáticas en curso. | Los módulos de sensores de detección y las armas de contramedidas se pueden expandir | Debería formularse el problema de aprendizaje de forma unificada para aumentar la eficacia del resultado |
| | **Integridad** | Cada caso se simuló 100 veces y se registraron las misiones exitosas. | La interacción entre cada parte y el entorno tiene un modelo matemático claro | Empeora al ser más fidedignas las representaciones muestreadas que el morfismo |
| | **Velocidad de reacción** | Dependerá de la distancia a la que se suponga ubicación de la amenaza | El movimiento del UAV prioriza las restricciones físicas de movimiento ante el funcionamiento sistema CEW | Mejora con morfismo aproximado basado en características de un modelo reducido. |
| **Valoración de** | **Ejército de referencia** | Aire y Espacio | Aire y Espacio | Aire y Espacio |
| | **Estrategias de guerra en conflictos armados** | Si, es vital la captación y clasificación de señales electromagnéticas | Si, es vital la detección-interferencia de transmisión de estaciones tierra | N/A |
| | **Apoyo decisiones mando** | Si, un peligro inminente detectado anticipa decisiones | Si, un peligro inminente detectado anticipa decisiones | N/A |
| | **Ciberseguridad** | N/A | N/A | N/A |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Inteligencia Militar** | Si, aunque el algoritmo recopila datos en tiempo real existe una base de datos de señales | Si, localización de estaciones terrestres transmisoras | N/A |
| | **Mantenimiento unidades** | Si, existen estudios de pinturas absorbentes de radiación | N/A | N/A |
| | **Nuevas construcciones** | Si, nueva capacidad de UAVs e impulsa proyectos como NGJ-MB | Si, nueva capacidad de UAVs | Si, podría tenerse en cuenta en nuevos procesados de radar y EW |
| | **Operaciones aéreas** | ✓ | ✓ | Podría aplicarse en radar y EW |
| | **Operaciones terrestres** | Podría aplicarse | Podría aplicarse | Podría aplicarse en radar y EW |
| | **Operaciones navales** | Podría aplicarse | Podría aplicarse | Podría aplicarse en radar y EW |
| | **Logística** | N/A | N/A | N/A |
| | **Entrenamiento unidades** | Si, sería conveniente el entrenamiento del operador | Si, sería conveniente el entrenamiento del operador | N/A |

*Tabla 5. ML aplicado a Sistemas de Guerra Electrónica (1 de 2).*

| Sistemas de Guerra Electrónica | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Datos generales** | **Referencia** | [61] | [62] | [63] |
| | **Aplicación** | Método basado en CNN para clasificar la señal de interferencia del radar que actúa en el radar de compresión de pulsos. | Modelos GNSS basados en ML para mejorar robustez y rendimiento de señal de posición en entorno hostil | Dos métodos basados en aprendizaje profundo para predecir la técnica de interferencia adecuada para una señal de amenaza recibida |
| | **Trade off** | 1D-CNN está diseñado para clasificar señales de interferencia radar bajo la condición de suficientes muestras de entrenamiento | Ofrecer solución a bajo coste y alto rendimiento en parámetros como precisión, disponibilidad, continuidad e integridad. | Uso de una DNN sobre valores de características extraídos manualmente de la lista de PDW y uso de LSTM que toma la lista de PDW como entrada. |
| | **Conceptos novedosos** | Siamese-CNN (S-CNN) | Posicionamiento, Navegación y Temporización (PNT), Tiempo hasta la primera corrección (TTFF) | Pulse Description Word (PDW), Long Short-Term Memory (LSTM) |
| | **Tipo de ML** | Support Vector Machine (SVM), Decision Tree Classifiers, Logistic Regression and Random Forest (RF) | Referencia con 213 estudios de aplicación desde 2000 a 2021. Los más usados fueron Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), Artificial Neural Network (ANN) y Convolutional Neural Network (CNN) | Deep Neural Network (DNN) de diferentes estructuras y Long Short-Term Memory (LSTM) |
| | **Estado de base de datos para el entrenamiento** | Muestras entrenamiento limitadas. Se propone una red siamesa basada en CNN para la clasificación de señales de interferencia de radar. | | Datos de entrenamiento construidos a partir de la biblioteca, pero el modelo de ML entrenado se utiliza para predecir técnica de interferencia a aplicar sin utilizar la biblioteca. |
| **Valoración de factores decisivos** | **Fusión de datos** | La similitud entre muestras intraclase y la diferencia entre muestras interclase, hace que S-CNN realice la clasificación de diferentes señales de interferencia con muestras limitadas aprendiendo la similitud entre las dos entradas. | N/A | Si, se utilizan datos de entrenamiento consistentes en pares de señales de amenaza y sus correspondientes técnicas de interferencia para entrenar un modelo de ML que genere técnicas de interferencia para señales de amenaza de entrada. |
| | **Inferencia escenario táctico** | N/A | Si, GNSS tanto en entornos interiores como exteriores | N/A |
| | **Elemento ayuda mando** | Si, este método de clasificación de señales electromagnéticas puede dar información del enemigo | Si, la detección temprana de fallos y errores puede conducir a la corrección oportuna de estos fallos | Si, predice la técnica de interferencia adecuada ante una amenaza |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Ofrecer hoja de rutas ante amenazas** | N/A | N/A | Si, sugiere una técnica de interferencia antes una amenaza |
| | **Interfaz ergonómica hombre-máquina** | N/A | N/A | N/A |
| | **Lenguaje universal con otros sistemas** | N/A | N/A | N/A |
| | **Reglas de guerra humana** | N/A | N/A | N/A |
| | **Disponibilidad** | Si, resultado experimental 1D-CNN bajo condición de suficientes muestras entrenamiento. Resultado de S-CNN bajo condición de muestras entrenamiento limitadas. | Reducir esfuerzo de mantenimiento y tiempo de inactividad | El método de interferencia se puede predecir para señal radar desconocida con una precisión promedio de aproximadamente el 92 % y más. |
| | **Optimización de recursos** | N/A | Si, es el objetivo con ML | Si, se empleará primero el método de interferencia predicho. |
| | **Escalabilidad de estructuras** | N/A | N/A | N/A |
| | **Integridad** | 12 tipos típicos de señales de interferencia de radar (interferencia de supresión, de puntería, de bloqueo, de barrido, de engaño a distancia, densa de objetivos falsos, ruido inteligente, pasiva típica, chaff | Existen fuentes de errores para el posicionamiento basado en satélites como la ionosfera y la troposfera, trayectos múltiples, desviación del reloj, ruido del receptor, interferencia y sesgos del hardware | La precisión de predicción del modelo LSTM fue mayor |
| | **Velocidad de reacción** | N/A | Depende, la velocidad de SVM no cumple requisito de estar en tiempo real para monitoreo interferencias | El método basado en DNN es más rápido que el método LSTM |
| **Valoración de áreas militares afectadas** | **Ejército de referencia** | Tierra | Tierra | TIerra |
| | **Estrategias de guerra en conflictos armados** | Si, la clasificación de señales da información del enemigo | Si, puede provocar interferencias en señal GPS de unidades | Si, puede provocar interferencia en radar o EW enemigo |
| | **Apoyo decisiones mando** | Si | Si, es necesario una señal precisa | Si, prepara sistema de interferencias como puede ser tipo lanzachaff |
| | **Ciberseguridad** | N/A | N/A | N/A |
| | **Inteligencia Militar** | Si, la clasificación de señales da información del enemigo | Si, identifica posiciones de unidades | Si, podría asociarse librería con ejército y con sistema interferencia |
| | **Mantenimiento unidades** | N/A | Si, el ML reduce mantenimiento | N/A |
| | **Nuevas construcciones** | N/A | N/A | N/A |
| | **Operaciones aéreas** | ✓ | ✓ | ✓ |
| | **Operaciones terrestres** | ✓ | ✓ | ✓ |
| | **Operaciones navales** | ✓ | ✓ | ✓ |
| | **Logística** | N/A | N/A | Si, puede prever qué sistemas de interferencias tener armados |
| | **Entrenamiento unidades** | N/A | N/A | Si, debería entrenarse su uso |

*Tabla 6. ML aplicado a Sistemas de Guerra Electrónica (2 de 2).*

## 3.5. ML aplicado a Sistemas Radar.

Los sistemas radar han evolucionado mucho en los últimos años. La referencia [87] muestra una sinopsis de los enfoques de la IA que podrían ser útiles para respaldar varias tareas en el procesamiento de datos de radar y posiblemente puedan refinar aún más los enfoques existentes o incluso servir como una poderosa alternativa a las técnicas convencionales. Por ejemplo, enfoca cómo identificar perturbaciones en el control del tráfico aéreo para distinguir los objetivos de ecos parásitos (como clima y aves) y cómo hacerlo en un entorno marino para distinguir el clutter de tierra, de mar en calma, de mar agitado y clutter compuesto.

No obstante, independientemente a la información anterior, en las siguientes tablas se analizarán las referencias encontradas más relevantes sobre el ML.

| Sistemas Radar | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Datos generales | **Referencia** | [64] | [65] | [66] |
| | **Aplicación** | Red Neuronal Convolucional (CNN) aplicada al análisis de datos de Radar de Apertura Sintética (SAR) para ofrecer imágenes HD de día y noche independiente del clima | Redes Neuronales Convolucionales en algoritmos de gestión de recursos de radar (RRM) para mejorar el rendimiento. | Detector CNN multiclase que reemplaza el algoritmo CFAR en la detección de objetivos aéreos en un radar ATC real y clasifica objetivos como aviones de ala fija o giratoria |
| | **Trade off** | Reconocimiento automático de objetivos, clasificación del uso de la tierra y tipo de superficie, estimación de parámetros, eliminación de ruido de imagen, segmentación de imágenes, detección cambios, detección objeto | Mejorar tiempos de reacción e integridad de los radares cuando están sobrecargados con objetivos. También, administrar recursos radar para implementar ESM, EA y comunicaciones inalámbricas. | Aprovechar las características micro-Doppler de las aeronaves en los retornos radar y utilizarlas para clasificar los objetivos detectados como aeronaves de ala fija o giratoria |
| | **Conceptos novedosos** | SAR, sensor de imágenes activo con dirección de iluminación radar que ofrece imágenes en alta resolución; Dominio de Detección Remota (RS); Codificador Automático Apilado (SAE); reconocimiento de objetivos móviles y estacionarios (MSTAR); CNN de eliminación de ruido rápida y flexible (FFDNet); reconocimiento automático de objetivos (ATR) | Radares multifuncionales (MFR), Sistema de radiofrecuencia multifuncional (MFRFS), radar adaptativo multifunción escaneado electrónicamente (MESAR), banco de pruebas de sistema integrado de tecnología de radar avanzada de seguimiento (ARTIST), Radar de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO), | Sistema de detección de objetivos basado en CNN de dos etapas: la primera, se usa para filtrar los patrones ruidosos eliminando un 30% de ruido; y la segunda, utiliza ambos ejes de datos radar (eje de tiempo rápido y de tiempo lento), para lograr una mejor precisión de detección. |
| | **Tipo de ML** | Depende del trade off: CNN, RNN, AE, DBN, FCN (red totalmente convencional), U-Net, Faster RCNN | Redes Neuronales Convolucionales | Redes Neuronales Convolucionales |
| | **Estado de base de datos para el entrenamiento** | Depende del trade off. Para SAR-ATR y MSTRAR se propuso una CNN como técnica para aumentar datos. | Datos de entrenamiento limitados debido a situaciones excepcionales | 83.740 imágenes Doppler con más de 100.000 objetivos de ala fija y 21.000 de ala giratoria. Los datos se dividen en datos de entrenamiento, validación y prueba en una proporción de 14:3:3. |
| Valoració | **Fusión de datos** | Estudiar la viabilidad de transferir el aprendizaje de arquitecturas CNN conocidas en el dominio de la visión artificial al dominio SAR. | Si, los radares MIMO | Si, radar bidimensional que emiten un solo pulso a lo largo de un eje (tiempo rápido) y otra serie de pulsos similares a lo largo de otro eje (tiempo lento) |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Inferencia escenario táctico** | No, pero podría ayudar a un mejor resultado | Si, ayudarse en ML cuando los radares están sobrecargados | N/A |
| | **Elemento ayuda mando** | Si, aporta información visual muy útil para el mando | Si, el radar es un sistema de exploración y se propone también emplearlo para ESM, EA y comunicaciones | Si, es un sistema más preciso e identifica tipo de aeronave. |
| | **Ofrecer hoja de rutas ante amenazas** | Podría ser una continuación de desarrollo de los usos | N/A | N/A |
| | **Interfaz ergonómica hombre-máquina** | N/A | N/A | Si, la doble etapa elimina más ruido y facilita |
| | **Lenguaje universal con otros sistemas** | Si, los tipos de redes neuronales son compatibles con otros sistemas | Si, debería si hace funciones de ESM, EA y comunicaciones. | N/A |
| | **Reglas de guerra humana** | N/A | Si, en caso de EA | N/A |
| | **Disponibilidad** | Gracias a la disponibilidad de datos de imágenes ópticas a gran escala, las CNN se han desarrollado rápidamente en los últimos años | Baja, no se ha encontrado literatura sobre desarrollo y pruebas físicas | Mayor ya que elimina algunas etapas de filtrado con el ML |
| | **Optimización de recursos** | Viabilidad de transferir aprendizaje de arquitecturas CNN conocidas en visión artificial al dominio SAR. | Si, el mismo radar tendría más funciones | Si, elimina la necesidad de procesamiento CFAR y algoritmos de detección de picos |
| | **Escalabilidad de estructuras** | Podría estudiarse su aplicación a videos | N/A | N/A |
| | **Integridad** | Necesario pruebas y validaciones de nuevos algoritmos DL para confirmar aplicabilidad y eficacia | Si, el ML la mejora | Si, la primera etapa tiene una fiabilidad del 96% en acierto de blanco y 85% en ruido. |
| | **Velocidad de reacción** | N/A | N/A | Mayor, este enfoque descarta directamente el 30% de datos entrantes, que eran puramente ruido |
| **Valoración de áreas militares afectadas** | **Ejército de referencia** | Aire y Espacio | Aire y Espacio | Aire y Espacio |
| | **Estrategias de guerra en conflictos armados** | Si, dependen de las imágenes. | Si, ESM y EA | Si, la presencia de muchos enemigos de ala rotatoria (incluso UAV) modifica la estrategia del mando |
| | **Apoyo decisiones mando** | Si, decisiones fundadas en imágenes | Si, exploración y comunicación | Si, diferentes formas de atacar blancos de ala fija a rotatoria |
| | **Ciberseguridad** | Dependerá de la ubicación del procesador de datos | N/A | N/A |
| | **Inteligencia Militar** | Si, segmentación de imágenes, análisis de cambios, análisis terrenos | Si, base de datos | Si, identifica el tipo de aeronave |
| | **Mantenimiento unidades** | Si, aplicar el reconocimiento de imagen para identificar deterioros | N/A | N/A |
| | **Nuevas construcciones** | N/A | N/A | Si, implica nuevos desarrollos para evitar esa clasificación |
| | **Operaciones aéreas** | ✓ | ✓ | ✓ |
| | **Operaciones terrestres** | ✓ | ✓ | ✓ |
| | **Operaciones navales** | ✓ | ✓ | ✓ |
| | **Logística** | N/A | N/A | N/A |
| | **Entrenamiento unidades** | Si, debería entrenarse su uso | Si, debería entrenarse su uso | Si, debería entrenarse su uso |

*Tabla 7. ML aplicado a Sistemas Radar (1 de 2).*

| Sistemas Radar | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Datos generales | **Referencia** | [67] | [68] | [69] |
| | **Aplicación** | Agrupación de datos similares en escaneo radar, según densidad, para reducir el tamaño del conjunto | Diseño de forma de onda unimodular rápida y excelente con buena autocorrelación y correlación cruzada para el radar MIMO | RadCNN para reemplazar los detectores CFAR estándar por un radar Doppler pulsado típico |
| | **Trade off** | Reducir la complejidad computacional, superar los problemas causados por la alta dimensionalidad, manejar conjuntos de datos esféricos heterogéneos y resistir al ruido y los valores atípicos | Diseñar forma de onda para mejorar en los radares MIMO la precisión de localización, la compatibilidad con el sistema de comunicación, la capacidad de mitigación de ecos parásitos y ambigüedad de retardo doppler del objetivo potencial | Mejorar el rendimiento de CFAR para SNR bajo, con 4 órdenes de magnitud menos de complejidad computacional |
| | **Conceptos novedosos** | Algoritmo de agrupamiento por escaneo radar basado en la densidad (DBRS) | Función objetivo integral (COF) | Detector basado en Red Neural Convolucional (RadCNN) |
| | **Tipo de ML** | Aprendizaje automático no supervisado | Modelo de DL, red de optimización integral (CON) basada en la red residual profunda (RN) | Red Neuronal Convolucional (CNN) |
| | **Estado de base de datos para el entrenamiento** | Conjunto de datos reales de un repositorio de ML | En lugar de muestras de entrenamiento, usa algoritmo Adam para optimizar sin supervisión el COF, que se construye a partir de secuencia de fase diseñada | 182.000 archivos donde se incluyen objetivo ausente y objetivo presente en tres SNR diferentes. Se dividen en conjuntos de entrenamiento, validación y prueba en 70-15-15%, |
| Valoración de factores decisivos | **Fusión de datos** | La función densidad de probabilidad (PDF) proyecta el conjunto de datos en un espacio unidimensional, con mínima pérdida de información y ahorrando consumo de tiempo | Es la intención de los radares MIMO que con la forma de onda diseñada facilitaría su implementación | N/A |
| | **Inferencia escenario táctico** | Determina el número de clústeres de forma adaptativa. Localiza rápidamente un centro, determina el radio correspondiente y luego extrae el grupo (proceso recursivo) | N/A | Si, afecta a los resultados del detector |
| | **Elemento ayuda mando** | Si, posibilita extraer información de un núcleo denso de objetivos | Si, al mejorar la forma de onda el radar MIMO tiene más capacidades | Si, respuesta en tiempo real |
| | **Ofrecer hoja de rutas ante amenazas** | N/A | N/A | N/A |
| | **Interfaz ergonómica hombre-máquina** | N/A | N/A | Mejora al poder aplicarse en tiempo real y mejor filtrado de ruido |
| | **Lenguaje universal con otros sistemas** | N/A | Si, debe entenderse con sistemas de comunicación, entre otros | N/A |
| | **Reglas de guerra humana** | N/A | N/A | N/A |
| | **Disponibilidad** | Mayor debido a la reducción del tiempo computacional | Tiene un rendimiento superior y un tiempo de optimización aceptable en comparación con otros | Mejora el rendimiento con respecto a las técnicas CFAR. |
| | **Optimización de recursos** | Determina los parámetros críticos de los radios del algoritmo de desplazamiento medio rápido y los radios de los grupos | Resuelve eficazmente el problema del diseño integral de formas de onda para una secuencia larga | RadCNN tiene 4 órdenes de magnitud menos de complejidad computacional |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Escalabilidad de estructuras** | N/A | No se plantea, pero podría emplearse en la guerra electrónica | N/A |
| | **Integridad** | El escaneo radar basado en la densidad es eficiente y preciso | Si, es una consecuencia de la forma de onda | Si, RadCNN es una alternativa viable y superior al estado del arte similar |
| | **Velocidad de reacción** | Se utiliza un algoritmo de cambio medio-rápido con radio adaptativo y subconjuntos activos para ubicar los centros de manera efectiva, lo que reduce el tiempo computacional | Garantiza la complejidad computacional dentro de un rango aceptable | Al tener 4 órdenes de magnitud menos de complejidad computacional, es realizable en tiempo real |
| **Valoración de áreas militares afectadas** | **Ejército de referencia** | Aire y Espacio | Aire y Espacio | Aire y Espacio |
| | **Estrategias de guerra en conflictos armados** | N/A | Si, puede aportar comunicación en la batalla y mayor precisión | N/A |
| | **Apoyo decisiones mando** | Si, identifica blancos en área densa | Si, mayor seguridad en la decisión | Si, información en tiempo real |
| | **Ciberseguridad** | N/A | N/A | N/A |
| | **Inteligencia Militar** | N/A | Si, información más exacta | Si, más información disponible con menos relación SNR |
| | **Mantenimiento unidades** | N/A | Requiere menos componentes a mantener | N/A |
| | **Nuevas construcciones** | N/A | N/A | N/A |
| | **Operaciones aéreas** | ✓ | ✓ | ✓ |
| | **Operaciones terrestres** | ✓ | ✓ | ✓ |
| | **Operaciones navales** | ✓ | ✓ | ✓ |
| | **Logística** | N/A | N/A | N/A |
| | **Entrenamiento unidades** | Si, podría entrenarse la forma de engañar al algoritmo | Si, podría entrenarse la forma de engañar al algoritmo | Si, podría entrenarse la forma de engañar al algoritmo |

*Tabla 8. ML aplicado a Sistemas Radar (2 de 2).*

## 3.6. ML aplicado a Sistemas de Dirección de Tiro y Armas.

Los sistemas de dirección de tiro y armas son principalmente los que marcan la diferencia entre unidades militares y unidades civiles. Un buque de guerra y un barco pesquero, o un avión de guerra y una aeronave de pasajeros, se componen prácticamente de los mismos sistemas, pero la instalación de una dirección de tiro, armas y guerra electrónica, a grandes rasgos, son los que tienen una influencia decisiva en la distinción de concepto. A continuación, se analizan una serie de referencias que podrían aplicarse en entornos tácticos militares. Destacar que la literatura sobre esta aplicación es muy escasa, por lo que se ha realizado directamente una propuesta.

| Sistemas de Dirección de Tiro y Armas | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Datos generales | **Referencia** | [70] | [71] | No encontrada |
| | **Aplicación** | Predecir con éxito la respuesta dinámica de los materiales a los impactos balísticos | Predicción precisa de la potencia óptica de un enlace FSO en un entorno marítimo | Entrenamiento de dirección de tiro con ML para suprimir sensor radárico |
| | **Trade off** | Caracterizar el comportamiento del material en una gama de tasas de carga y escenarios de impacto | Emplear algoritmo de predicción de potencia óptica de enlace para calcular la potencia óptica necesaria de un arma láser de alta energía | No depender del sensor radárico entrenando los sensores IR, TV y telémetro láser |
| | **Conceptos novedosos** | Velocidad límite balística (BLV) | Potencia necesaria de un arma láser | ML en dirección de tiro |
| | **Tipo de ML** | Redes generativas condicionales (cGAN) | Estudiados 5 algoritmos: KNN, árboles de decisión (DT), regresión aumento de gradiente (GBR), bosque aleatorio (RF) y red neuronal artificial (ANN) | Se propone Deep Learning |
| | **Estado de base de datos para el entrenamiento** | Entrenados 5 modelos cGAN con 50.000 iteraciones. Cada modelo se entrenó formato multiclase con 10 clases de datos balísticos etiquetados con valor de 0 a 9 | Datos de entrenamiento obtenidos durante un periodo de 12 meses a partir de un sistema FSO comercial y una estación meteorológica. | No encontrada, es una propuesta |
| Valoración de factores decisivos | **Fusión de datos** | No se indica, no es necesario. | Si, podría fusionarse con imágenes tipo melt-pool para comprobar el tamaño de perforación in-situ | Si, debe fusionarse los datos de todos los sensores (radárico, IR, TV y telémetro láser) para posteriormente eliminar el radárico |
| | **Inferencia escenario táctico** | No se indica, no es necesario. | Si, interfieren 7 parámetros atmosféricos: velocidad viento, presión, temperatura, humedad, punto de rocío, flujo solar y diferencia de temperatura entre el aire y el mar | Puede afectar estado climatológico como nubes y calima |
| | **Elemento ayuda mando** | Si al generar muestras balísticas representativas y adicionales para clases no entrenadas | Si, para saber el nivel de daño a provocar | Si porque en caso de pérdida de seguimiento radárico o avería estaría el sistema entrenado |
| | **Ofrecer hoja de rutas ante amenazas** | Indirectamente sí al poder adivinar el impacto balístico de un proyectil | Indirectamente si al poder seleccionar potencia de ataque/defensa | Indirectamente si ya que la dirección de tiro mostraría la futura posición del blanco |
| | **Interfaz ergonómica hombre-máquina** | N/A | No se indica ya que es una propuesta, pero debería ser ergonómica | El operador no debería notar la diferencia en consola |
| | **Lenguaje universal con otros sistemas** | Recomendable en caso de querer enlazarlo con un sistema de armas | Recomendable para poder enlazarlo con el sistema de armas | Si, debe entenderse con todos los sistemas de armas |
| | **Reglas de guerra humana** | N/A | N/A | N/A |
| | **Disponibilidad** | Inmediata | Se comprueba que la temperatura ambiente es el factor más influyente | Mejora la disponibilidad de apuntamiento |
| | **Optimización de recursos** | Si, al determinar el acierto balístico | Si, el objetivo es hacer uso solo de la potencia necesaria | Si, podría llegar a eliminarse el coste del sensor radar |
| | **Escalabilidad de estructuras** | N/A | Podría emplearse el algoritmo para armas electromagnéticas | Si, podría emplearse en otros sistemas que no tengan radar y mejorar el apuntamiento |
| | **Integridad** | N/A | La distribución de muestras del algoritmo ANN han sido 70% | Mejora porque podría ser un método para evadir los ataques de guerra electrónica o interferencias |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | entrenamiento, 15% evaluación y 15% validación con 94,86% acierto. | |
| | **Velocidad de reacción** | No se indica, no es necesario. | Algoritmo ANN tiene un coste de tiempo computacional muy alto (3h) Algoritmo Random Forest período de entrenamiento relativamente corto. | No afecta |
| **Valoración de áreas militares afectadas** | **Ejército de referencia** | Tierra | Tierra | Armada |
| | **Estrategias de guerra en conflictos armados** | Si, conociendo la respuesta balística de los materiales empleados del enemigo y los nuestros, la estrategia de ataque y defensa cambian | Si porque al consumir solo la energía necesaria la unidad podría estar más tiempo desplegada | Si, podría ser empleado como contra contramedida electrónica (ECCM) o como medida de protección electrónica (EPM) |
| | **Apoyo decisiones mando** | Si, ayuda al mando a seleccionar el arma o tipo de munición (explosiva, perforadora, proximidad, …) | Si, ayuda a determinar la efectividad del arma pues depende de varios factores como la temperatura | Si, como alternativa al seguimiento radárico |
| | **Ciberseguridad** | N/A | N/A | N/A |
| | **Inteligencia Militar** | Si, aporta información sobre las construcciones del oponente | N/A | N/A |
| | **Mantenimiento unidades** | N/A | Si, la potencia láser estaría más regulada | Disminuirían los mantenimientos si se llegase a eliminar el sensor radar |
| | **Nuevas construcciones** | Si, se puede emplear como herramienta de ensayo de material | N/A | N/A |
| | **Operaciones aéreas** | ✓ | ✓ | ✓ |
| | **Operaciones terrestres** | ✓ | ✓ | ✓ |
| | **Operaciones navales** | ✓ | ✓ | ✓ |
| | **Logística** | Si, podría realizarse un análisis del escenario de batalla y seleccionar el tipo de arma y munición a embarcar | Si porque afectaría al consumo de energía de la unidad | Si se llegase a eliminar el sensor radárico disminuirían los repuestos y equipos a bordo |
| | **Entrenamiento unidades** | Si, conociendo la respuesta balística de un material podría entrenarse formas de combate efectivas | Debería entrenarse el uso como elemento disuasorio sin llegar a causar daños directos | N/A |

*Tabla 9. ML aplicado a Sistemas de Dirección de Tiro y Armas.*

## 3.7. ML aplicado a Sistemas No Tripulados.

Según referencia [88], los sistemas no tripulados han experimentado un enorme crecimiento en todo el mundo. Existen usos positivos con potencial de salvar vidas, aumentar la seguridad y permitir investigaciones científicas o de ingeniería, pero también existen usos negativos sujetos a amenazas derivadas de la creciente dependencia de las tecnologías informáticas y de la comunicación, que ponen en peligro la seguridad pública, la seguridad nacional y la privacidad de las personas. A raíz de lo anterior, nuevas técnicas de aprendizaje automático están siendo aplicadas en este sector y por tanto serán objeto de análisis, pero siempre desde un punto de vista militar.

| Sistemas No Tripulados | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Datos generales | **Referencia** | [72] | [73] | [74] |
| | **Aplicación** | Superar los desafíos de movilidad, comunicación, gestión de recursos y seguridad al que se enfrenta los UAV | Clasificación de drones utilizando señales de radiofrecuencia (RF) | Diseño arquitectónico para la generación de comportamiento automático de AV |
| | **Trade off** | ML centrado en satisfacer requisitos de red, teniendo en cuenta las funciones, la colaboración, la cooperación y los contextos cambiantes de la red de los UAV | Uso de señales RF para la detección de drones pues la comunicación con drones requiere el uso de señales RF con rangos de frecuencia específicos | Marco de toma de decisiones generalizador y escalable, que utiliza bloque de comportamiento modular para componer comportamientos más complejos en un enfoque ascendente |
| | **Conceptos novedosos** | Estudiar comunicaciones aire-aire (A2A), aire-tierra (A2G) y tierra-aire (G2A) para garantizar QoS y QoE. | Modelo híbrido con red de fusión de características (HMFFNet) | Comportamientos tácticos y estratégicos en la conducción automatizada |
| | **Tipo de ML** | Se analizan algoritmos tipo ANN, CNN, DNN, SVM, DQN, RandF, KNN,.. dependiendo del tipo de comunicación A2A, A2G y G2A. | Extracción de características basada en CNN seguida de fusión de características y clasificación basada en SVM | Esquema de arbitraje jerárquico basado en el comportamiento |
| | **Estado de base de datos para el entrenamiento** | No se determina ya que es un análisis y recopilación de distintas investigaciones | Las características se capturaron con una red VGG19 de Deep Learning y la clasificación se realiza con SVM | Base de datos que contiene una representación fusionada y abstracta de los datos de sensores disponibles |
| Valoración de factores decisivos | **Fusión de datos** | Se estudian alternativas de redes voladores ad hoc, almacenamiento caché o procesamiento con UAVs | Si, las características de las 3 etapas se fusionan en varias combinaciones para mejor propiedad discriminativa | Fusiona información de todos los sensores disponibles |
| | **Inferencia escenario táctico** | Necesaria conciencia de los cambios de contexto y la adaptabilidad a los requisitos de los servicios actuales | N/A | Contiene representación fusionada, rastreada y filtrada del mundo |
| | **Elemento ayuda mando** | Si, superando los 4 desafíos ya descritos | Si, es otra forma de clasificación distinta sonido, imagen o radar | Si porque AV sería autónomo |
| | **Ofrecer hoja de rutas ante amenazas** | Comunicaciones A2A: Utiliza UAVs para fijar un umbral de participación según energía, capacidad, movilidad Comunicaciones A2G: Es crítica la gestión de interferencias y la asignación de espectro. Un UAV predice si procesar datos, descargar a otro UAV o servidor MEC terrestre | N/A | Se introduce un esquema de arbitraje basado en costos que es útil cuando se aplican múltiples opciones de comportamiento, pero no tienen una prioridad clara y consistente entre sí |
| | **Interfaz ergonómica hombre-máquina** | N/A | No se especifica pero debería | N/A |
| | **Lenguaje universal con otros sistemas** | Si, debe entenderse la red de UAV y las estaciones base | Si en caso de querer automatizar proceso de defensa | Mismo lenguaje entre todos los sensores y sistema autónomo |
| | **Reglas de guerra humana** | N/A | N/A | Contiene comportamientos de estacionamiento y emergencia, y previene estados indefinidos. |
| | **Disponibilidad** | ML es una solución adecuada para un entorno denso y dinámico | Alta | Sistema modular robusto y eficiente |
| | **Optimización de recursos** | Si, ML es la herramienta adecuada para la predicción de los cambios de contexto y la optimización | Si, no es necesario sensores de audio, imagen o radar | No serían necesarios recursos humanos |
| | **Escalabilidad de estructuras** | Si, debería adaptarse al número de UAVs, a la movilidad, comunicación, gestión de recursos y seguridad | N/A | Estructura pensada para coches en urbes y carreteras, pero podría extenderse su aplicación a vehículos militares en zonas de operaciones |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Integridad** | Dependerá del rendimiento, los retrasos de sus comunicaciones y la eficiencia de la gestión de recursos | Podría ser alterado con guerra electrónica y suponer falso dron | Es compatible con diferentes enfoques de planificación |
| | **Velocidad de reacción** | Dependerá de las funciones y misiones encomendadas | Rápida | Inmediato para evitar accidente |
| **Valoración de áreas militares afectadas** | **Ejército de referencia** | Tierra o Aire y Espacio | Tierra | Tierra |
| | **Estrategias de guerra en conflictos armados** | Si, podría ser una red de UAVs conectados localizando objetivos en tiempo real | Si, podría analizarse el espectro radioeléctrico para averiguar cuantos drones hay en la batalla | Si, disponer de vehículos autónomos brinda nuevas estrategias |
| | **Apoyo decisiones mando** | Si, dependerá del uso de los UAVs | Si, es una forma de clasificación | N/A |
| | **Ciberseguridad** | Necesaria existencia de sistema de defensa autónomo que garantice la integridad, la confidencialidad y la disponibilidad de los datos. | Estudiar posible interferencia | N/A |
| | **Inteligencia Militar** | Si, si se aplica a labores de reconocimiento | Si en caso de poder analizar el espectro y determinar nº drones | Si, podrían emplearse en labores de reconocimiento |
| | **Mantenimiento unidades** | N/A | N/A | Importante mantenimientos SW |
| | **Nuevas construcciones** | Si, el estudio de redes de UAVs puede ser aliciente para nuevas construcciones | Si, aliciente para trabajar con otras formas de comunicación vistas anteriormente como RIS | Si, están surgiendo los primeros desarrollos de vehículos 100% autónomos |
| | **Operaciones aéreas** | ✓ | N/A | ✓ |
| | **Operaciones terrestres** | ✓ | N/A | ✓ |
| | **Operaciones navales** | ✓ | N/A | ✓ |
| | **Logística** | El transporte de datos de información afecta a esta área | N/A | ✓ |
| | **Entrenamiento unidades** | Si, es necesario entrenar el uso de estas redes. También su defensa | Si, podría entrenarse formas de engañar a la clasificación RF | Si, es necesario el entrenamiento junto a vehículos autónomos |

*Tabla 10. ML aplicado a Sistemas No Tripulados.*

## 3.8. ML aplicado a Sistemas de Vigilancia por Imágenes.

Hoy en día, en el mundo comercial, existen sistemas de vigilancia instalados en empresas o gobiernos con técnicas de ML. Por ejemplo, hay circuitos cerrados de televisión (CCTV) donde la unidad de proceso y control aplica métodos de reconocimiento facial, de huella dactilar, de identificación automática de comportamientos humanos agresivos o robos para solicitud directa de presencia de fuerzas y cuerpos de seguridad del estado en la zona, y muchos más.

Sin embargo, en la literatura consultada, casi no se han encontrado referencias específicas de sistemas de defensa, por lo que se han seleccionado los tres estudios más relevantes a juicio del tutorando y que serían de gran utilidad disponer de ellos en ciertos entornos militares.

| Sistemas de Vigilancia por Imágenes | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Datos generales | **Referencia** | [75] | [76] | [77] |
| | **Aplicación** | Detector automático de armas en tiempo real en vídeos CCTV | Mejorar las imágenes láser codificadas por radar recogidas por un sistema submarino | Fusión de imágenes infrarrojas y espectro visible con ML |
| | **Trade off** | Aplicación de algoritmos de DL de código abierto de última generación para detectar armas dañinas | Mejorar la resolución de imágenes 3D obtenidas por sensores láser en entornos submarinos degradadas por la dispersión de aguas turbias | Generar una imagen informativa que conserve los detalles de la textura e infrarrojos de los objetivos |
| | **Conceptos novedosos** | Algoritmos de detección de objetos con ROI (Región de interés) | Aplicar autoencoder de eliminación de ruido en base a imágenes recogidas de un tanque de pruebas de laboratorio | Red de filtro guiado de doble flujo (DSG-Fusion) |
| | **Tipo de ML** | Algoritmos como VGG16, Inception-V3, Inception-ResnetV2, SSDMobileNetV1, Faster-RCNN Inception-ResnetV2 (FRIRv2), YOLOv3 y YOLOv4 | Arquitectura de red superficial y profunda | Redes neuronales espléndidas (VGG), redes generativas adversariales (GAN) |
| | **Estado de base de datos para el entrenamiento** | Elaborada base de datos propia con fotos de armas, imágenes de Internet, datos de videos de YouTube, Internet Movies y otros | La base de datos se obtiene de la recogida de muestras de un tanque de laboratorio | No se especifica |
| Valoración de factores decisivos | **Fusión de datos** | Sería recomendable imágenes de distintos ángulos/cámaras | En principio la única entrada de datos son las imágenes laser | Si, se fusiona imágenes infrarrojas e imágenes visibles |
| | **Inferencia escenario táctico** | El bloqueo u oclusión del arma es un problema que surge con frecuencia | La red superficial es mejor para suprimir la dispersión frontal y la red profunda para la retrodispersión | Las condiciones atmosféricas del escenario podrían influir |
| | **Elemento ayuda mando** | Sería conveniente estudiar la aplicación de esta tecnología en sistemas de defensa | Si, al obtener una imagen más clara de un elemento submarino | Si, la imagen es más nítida y conserva la presentación de radiación térmica. Favorece la identificación objetivos |
| | **Ofrecer hoja de rutas ante amenazas** | Avisar al operador o punto designado ante amenaza | N/A | N/A |
| | **Interfaz ergonómica hombre-máquina** | No se indica pero debería ser ergonómica | No se indica pero debería ser ergonómica y visual | Buena, es visual y mejora la imagen individual de los sensores |
| | **Lenguaje universal con otros sistemas** | En zona perimetral podría asociarse a un sistema de alumbrado o armas | Podría estudiar su compatibilidad o entendimiento con sonar | Estudiar aplicar esta técnica a sistemas de dirección de tiro y CCTV |
| | **Reglas de guerra humana** | N/A | N/A | N/A |
| | **Disponibilidad** | En tiempo real | El autoencoder mejora un 25 % la calidad de imagen | En tiempo real |
| | **Optimización de recursos** | N/A | Suprimir la retrodispersión permite a la DNN ampliar la distancia de detección en zona turbia | N/A |
| | **Escalabilidad de estructuras** | Debería aumentarse la cantidad de clases de armas u objetos | N/A | Si, podría escalarse a todo un CCTV |
| | **Integridad** | Puntuación de confianza sobre 99 % en cualquier imagen o video | No indica el comportamiento del sistema ante posible perturbación | El estudio no contempla engaños al sistema con fuentes de calor, bengalas |
| | **Velocidad de reacción** | Debería mejorarse aún más la precisión y la recuperación | No se indica | No se indica pero se entiende que la latencia es mínima |
| Val | **Ejército de referencia** | Tierra | Armada | Tierra |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Estrategias de guerra en conflictos armados** | Si, con acceso a una red CCTV podría identificarse al personal armado | N/A | N/A |
| | **Apoyo decisiones mando** | Si, es una ayuda a la decisión de actuación si se confirma un arma | Si, podría capturar imágenes de objetivos con mayor resolución | Si, la imagen obtenida conserva intensidad y textura. El fondo y los detalles son más claros. |
| | **Ciberseguridad** | Depende de la red CCTV | N/A | N/A |
| | **Inteligencia Militar** | Si, por ejemplo, desplegando una red CCTV con UAVs en zona hostil | Si al mejorar la captura de imágenes | Si, se obtiene otra perspectiva del escenario o de los objetivos |
| | **Mantenimiento unidades** | N/A | N/A | Si, emplear como técnica predictiva de mantenimiento electricidad y motores |
| | **Nuevas construcciones** | Podría implementar esta aplicación en nuevas construcciones militares | N/A | N/A |
| | **Operaciones aéreas** | ✓ | N/A | ✓ |
| | **Operaciones terrestres** | ✓ | N/A | ✓ |
| | **Operaciones navales** | ✓ | ✓ | ✓ |
| | **Logística** | N/A | N/A | N/A |
| | **Entrenamiento unidades** | Si, podría entrenarse su uso | Si, podría entrenarse para minas | Si, debería entrenarse su uso |

*Tabla 11. ML aplicado a Sistemas de Vigilancia por Imágenes.*

## 3.9. ML aplicado a Sistemas de Gestión de Mantenimiento de Unidades y Logística.

El mantenimiento de las unidades y la logística son dos ramas muy importantes en el ejército. No realizar un mantenimiento adecuado y una trazabilidad de este puede desencadenar en una avería muy costosa, tanto desde un punto de vista económico como operativo. Si persiste la necesidad de desplegar una unidad habría que seleccionar a otra de otro ámbito geográfico o realizar intercambios de componentes de equipos con otras unidades similares. Por otra parte, desde un punto de vista logístico, habría que destacar que sin los repuestos necesarios para realizar los mantenimientos o sin un abastecimiento correcto de combustibles o víveres, las unidades no podrían cumplir sus objetivos en las zonas de operaciones. Es por ello por lo que es necesario disponer de un sistema de gestión de ambas ramas y que si estuvieran apoyados por técnicas de aprendizaje automático sería mucho mejor.

A continuación, se analizan 3 referencias que se han considerado muy relevantes en este apartado. No obstante, previamente, también se ha creído conveniente, al menos, comentar estas otras, aunque no se analicen:

- Referencia [89]. Se presenta la técnica de habilitar imágenes XR-RF (realidad extendida por radio frecuencia), definidas por ML, que podrían emplearse para auxiliar en la ejecución de mantenimientos en tiempo real desde un lugar remoto. Podría ser una opción de atender averías de unidades destacadas de misión.

- Referencia [90].- Se desarrolla un sistema de razonamiento basado en casos (CBR) con una nueva medida de similitud de alta precisión para el diagnóstico de fallos en motores de aviación mediante la recuperación de casos de fallos similares.

- Referencia [91].- Se expone el papel de la tecnología Blockchain en la industria de la aviación. La tecnología Blockchain puede emplear contratos inteligentes, fragmentos de código autoejecutables que establecen la confianza entre las organizaciones participantes, para mantener de forma eficiente los registros de mantenimiento de los aviones.

| Sistemas de Gestión de Mantenimiento de Unidades y Logística | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Datos generales | **Referencia** | [78] | [79] | [80] |
| | **Aplicación** | Sistema de pronóstico de demanda de repuestos de misiles antiaéreos | Predecir la disponibilidad y el posible nivel de reabastecimiento de la logística militar | Mantenimiento predictivo de motores y máquinas basado en ML |
| | **Trade off** | Mejorar la falta de precisión en el pronóstico de demanda | Predicción inteligente para precisar la disponibilidad de pedidos y el posible nivel de pedidos logísticos | Mejorar la fiabilidad del sistema y pérdidas económicas evitando fallos inesperados de motores y máquinas |
| | **Conceptos novedosos** | Cantidad económica de pedido -EOQ | N/A | Supervisión inteligente de equipos para evitar futuros fallos. Mantenimiento predictivo (PdM) |
| | **Tipo de ML** | Algoritmos SVM, Random Forest, Logistic Regression, Decision Tree, MLP y XGBoost (más preciso). | ANN con cierto de 85,57 %, KNN 74,98 %, RF 72,81 % y NB 74,85%. | Supervisada: información sobre fallos está presente en datos de modelado. No supervisada: información logística y/o de procesos disponible, pero no existen datos de mantenimiento. Basado en el enfoque Random Forest |
| | **Estado de base de datos para el entrenamiento** | Empleados 10.000 datos de misiles de la Guerra de Vietnam con registros como: nombre de unidad, NSN, fecha de operación, unidad de emisión, unidad agotada, número de consumo, número de trabajador… | Se utilizó un conjunto de datos sobre el precio de los productos petrolíferos para comprobar la precisión del algoritmo propuesto | Datos recogidos por varios sensores, PLCs de máquinas y protocolos de comunicación y puestos a disposición de la Herramienta de Análisis de Datos en la arquitectura Azure Cloud. |
| Valoración de factores decisivos | **Fusión de datos** | Fusiona la demanda de repuestos según mantenimientos, estadísticas de fallo de los componentes y los planes de mantenimiento previstos | Si, necesita conocer numerosos campos de cada ítem como nombre, NSN, unidad, cantidad… | 3 fuentes esenciales de datos: historial de fallos, historial de reparaciones/ mantenimientos y estado actual |
| | **Inferencia escenario táctico** | El estudio no tiene en cuenta las condiciones geográficas | Si, la predicción variaría si se está desplegado en zona de operaciones | No detalla, pero existen fallos si los acelerómetros están instalados en unidad aérea, marítima o terrestre |
| | **Elemento ayuda mando** | Si, no tener un repuesto en tiempo afecta a la operatividad de unidades | Si, formula de forma precisa la política de precios, estima el presupuesto adecuado de la unidad, aporta información con datos realistas e inteligentes | Si, PdM se centra en mejorar la eficiencia energética y reducir tiempos de inactividad no programados. |
| | **Ofrecer hoja de rutas ante amenazas** | Indirectamente si, podría solicitar la adquisición de material si necesidad | Indirectamente si, podría solicitar la adquisición de material si necesidad | N/A |
| | **Interfaz ergonómica hombre-máquina** | No determina, pero debería ser visual y ergonómica | No determina, pero debería ser visual y ergonómica | No determina, pero debería ser visual y ergonómica |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | **Lenguaje universal con otros sistemas** | Si, en caso de querer lanzar pedidos de forma automática | Si, en caso de querer lanzar pedidos de forma automática | El sistema de monitorización de estado y el de mantenimiento predictivo deben entenderse |
| | **Reglas de guerra humana** | N/A | N/A | N/A |
| | **Disponibilidad** | NAR aporta mejor precisión para la predicción corta y SVM brinda la mejor precisión garantizada | El algoritmo acepta, analiza, adapta, ajusta y predice los artículos y precios de los productos militares | Evita pérdidas económicas derivadas de fallos inesperados y mejora la fiabilidad del sistema. |
| | **Optimización de recursos** | Si, realiza pronósticos de venta o demanda, reduce coste de logística (excedentes) y coste de oportunidad (por escasez de productos) | Mejora la predicción de artículos y precios para una gestión logística y de almacenamiento militar eficaz | Evita la sustitución innecesaria de piezas, reduce tiempo de inactividad y encuentra la causa raíz del fallo |
| | **Escalabilidad de estructuras** | Si, el estudio podría extenderse a los repuestos de otro sector | Si, los datos de estudio son del petróleo, pero podría extenderse | Si, aplicable a otros sistemas y opción a aumentar número de sensores |
| | **Integridad** | El algoritmo XGBoost obtuvo una precisión del 98% | Si, identifica suministros críticos para el ejército | Difícil alteración del sistema salvo interferencia de movimiento externa |
| | **Velocidad de reacción** | No se determina | No se determina | No se determina pero debería ser casi en tiempo real |
| **Valoración de áreas militares afectadas** | **Ejército de referencia** | Todos | Todos | Todos |
| | **Estrategias de guerra en conflictos armados** | Si, puede afectar a la defensa aérea y tener que modificar estrategia | Si, en caso de identificar suministros críticos para el ejército | Si, puede limitar el despliegue de alguna unidad estratégica por avería |
| | **Apoyo decisiones mando** | Si, el mando debería conocer las limitaciones de sus unidades | Si, porque podría haber unidades no aprovisionadas o falta de armas | Si, una predicción de fallo de un motor puede alterar una decisión del mando |
| | **Ciberseguridad** | N/A | N/A | Depende del medio de transmisión de datos. Podrían subirse a la nube |
| | **Inteligencia Militar** | N/A | N/A | N/A |
| | **Mantenimiento unidades** | Si, si se extiende estudio a repuestos de otras unidades | Si, si se extiende el estudio a disponibilidad de repuestos | Afecta directamente por todo lo comentado |
| | **Nuevas construcciones** | Conveniente extender estudio a repuestos de nuevas unidades | Desencadena nueva investigación sobre tecnologías emergentes | Si, fomenta la construcción de gemelos digitales |
| | **Operaciones aéreas** | ✓ | ✓ | ✓ |
| | **Operaciones terrestres** | ✓ | ✓ | ✓ |
| | **Operaciones navales** | ✓ | ✓ | ✓ |
| | **Logística** | Afecta a operatividad de unidades y costes de repuestos | Afecta a operatividad de unidades, costes de repuestos y almacenaje | No se sustituyen piezas por horas de uso sino por necesidad real |
| | **Entrenamiento unidades** | N/A | N/A | Si, existen unidades específicamente entrenadas en PdM |

*Tabla 12. ML aplicado a Sistemas de Gestión de Mantenimiento de Unidades y Logística.*

# 4. Productos derivados del análisis

A raíz de todo el trabajo anterior, han surgido unos resultados del análisis y tres productos derivados del mismo. Es información muy útil y relevante para futuros proyectos y, por tanto, es conveniente reflejarlo en este TFM.

*Figura 20. Productos derivados del análisis*

En la Figura 20, se aprecia como los tres productos derivados del análisis deben estar engranados para que los nuevos proyectos de ML, en los sistemas de defensa, tengan éxito. A continuación, se explicará cada uno de ellos, pero previamente se expondrán las cifras de los resultados obtenidos en el proceso de búsqueda, para ofrecer una idea del estado actual de la aplicación de ML en defensa.

## 4.1. Resultados del análisis.

Durante los últimos cinco años se ha incremento exponencialmente el número de publicaciones sobre la aplicación de ML en sistemas comerciales. Sin embargo, referencias exclusivas del sector militar o de los sistemas de defensa, no son fáciles de localizar o no existe un gran número al respecto, aunque también es posible que sean confidenciales y no puedan ser consultadas en la red pública.

A continuación, se presenta la Figura 21, donde se expone el procedimiento que se ha llevado a cabo especificando el número de referencias consultadas en las diferentes webs más formales. Se realizó una primera búsqueda de artículos y, sobre esa, posteriormente, se fueron excluyendo aquellos que no tenían una relación directa con los sistemas del estado del arte, hasta concluir en los analizados en este TFM.

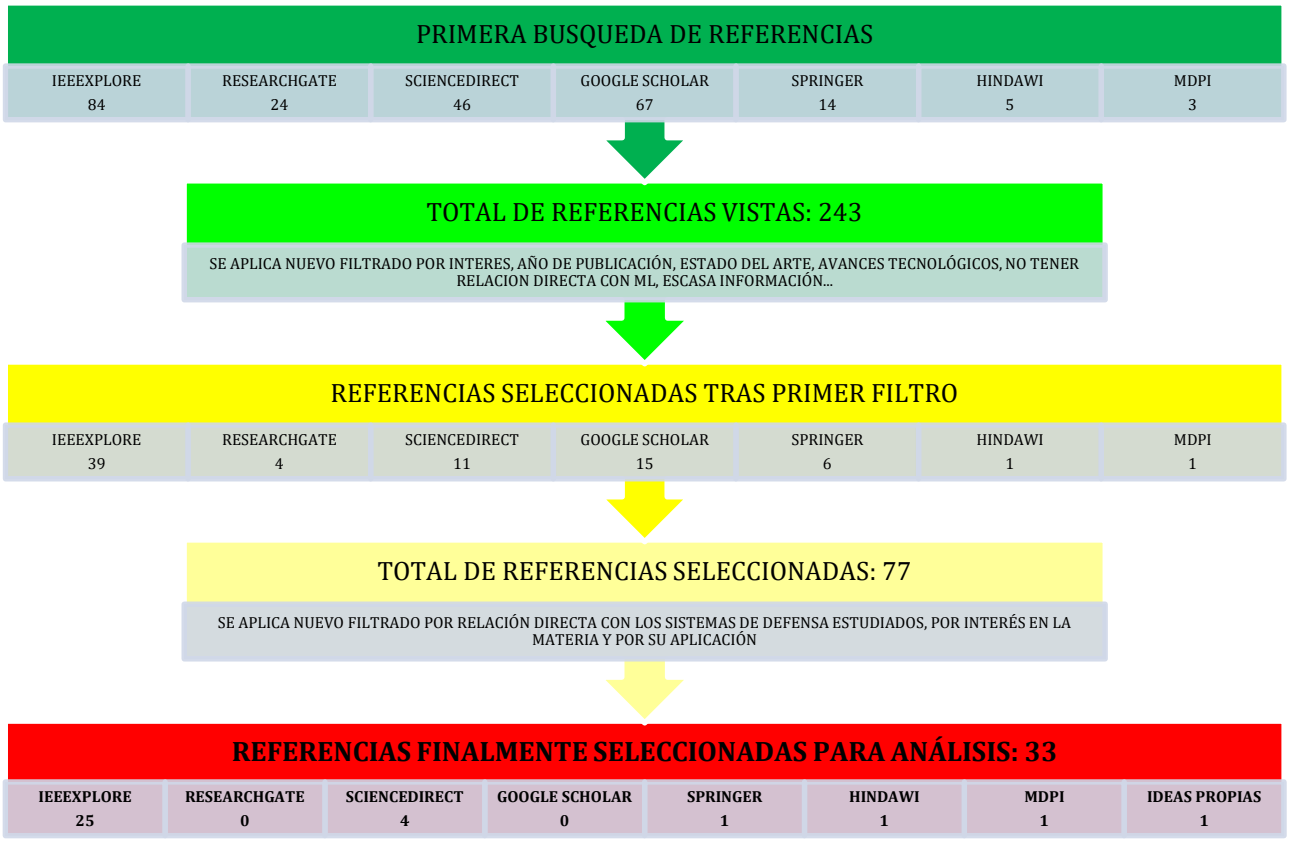



*Figura 21. Proceso de análisis de la literatura*

Aun así, después de esta selección, muchos de ellos no presentan una relación de uso bélico directa pero que, a ojos del tutorando, podrían adaptarse perfectamente a los sistemas militares y ser de gran ayuda, aportando nuevas ventajas y nuevas herramientas de trabajo en los entornos tácticos.

A continuación, se muestra la Figura 22 en la que se han separado los 7 sistemas objeto de estudio y en donde, para cada uno de ellos, se indican las referencias totales que se han analizado. Posteriormente, también se informa de cuántas de ellas tenían una relación militar directa y cuántas, a la vista de lo expuesto en la referencia, se propone aprovechar los desarrollos ya realizados para particularizarlas e implementarlas en los sistemas de defensa.

*Figura 22. Sistemas de defensa y referencias analizadas*

De las 33 referencias analizadas, 19 de ellas fueron pensadas desde un inicio para su uso militar y las otras 14 serían de gran ayuda adaptarlas al ejército. Como problema generalizado, destacar que la gran mayoría de referencias notifican que los datos de entrenamiento, ensayo y validación de los algoritmos de ML están muy limitados, debido a que no hay datos de situaciones bélicas reales o a que los dispuestos son de escenarios ideales.

Por otra parte, no hay que olvidar el marco legal, el impacto ético y el impacto económico que ha supuesto la aparición de ML. Las máquinas o sistemas no pueden ser juzgados en caso de cometer algún delito puesto que, según su definición, un delito es una acción típica, antijurídica, culpable y punible, y las máquinas o sistemas, por su razón de ser, no pueden ser ni culpables ni punibles.

Con respecto al impacto ético que se puede llegar a desencadenar como resultado de aplicar ML en máquinas o sistemas, es destacable que ninguno de ellos nunca se verá afectado por un castigo moral ni tendrá el sentimiento de responsabilidad por las decisiones tomadas. Tampoco realizará un juicio moral previo antes de ejecutar una acción.

Por último, destacar el impacto económico que ha supuesto la aparición de esta tecnología y los recursos económicos que los distintos gobiernos están invirtiendo en esta materia. España y la Unión Europea están a “años luz” de los 2 grandes referentes mundiales, EE.UU. y China, pero es apreciable el interés por la materia y el incremento de proyectos en investigación y desarrollo por los que están apostando.

## 4.2. Desafíos identificados tras analizar las referencias seleccionadas de ML en defensa.

El ML tiene un gran futuro en las aplicaciones relacionadas con los entornos militares, pero sin embargo continúa siendo necesario recurrir a sistemas de simulación, a la ingeniería del conocimiento y a la ingeniería de datos, según referencia [29], para crear productos fiables.

Gracias al análisis efectuado, en la Figura 23 se presentan las desventajas que se han encontrado al aplicar ML en los distintos sistemas de defensa, los principales desafíos que habría que conseguir paliar para que la técnica sea válida y efectiva, y por último, las ventajas que se lograrían.

Es importante destacar que, si la solución llevada a cabo para acometer los desafíos no es suficiente, o simplemente no se encuentra una solución, el algoritmo aplicado seguramente no aportaría ventajas al sistema, es más, podría suponer un problema si el comandante al mando diera la herramienta como válida cuando realmente la predicción no es fiable. No obstante, estos desafíos tienen una repercusión mayor en los sistemas de información, principalmente por la escasez de datos reales y la complejidad de modelados. El resto de los sistemas no presentan tantos retos.

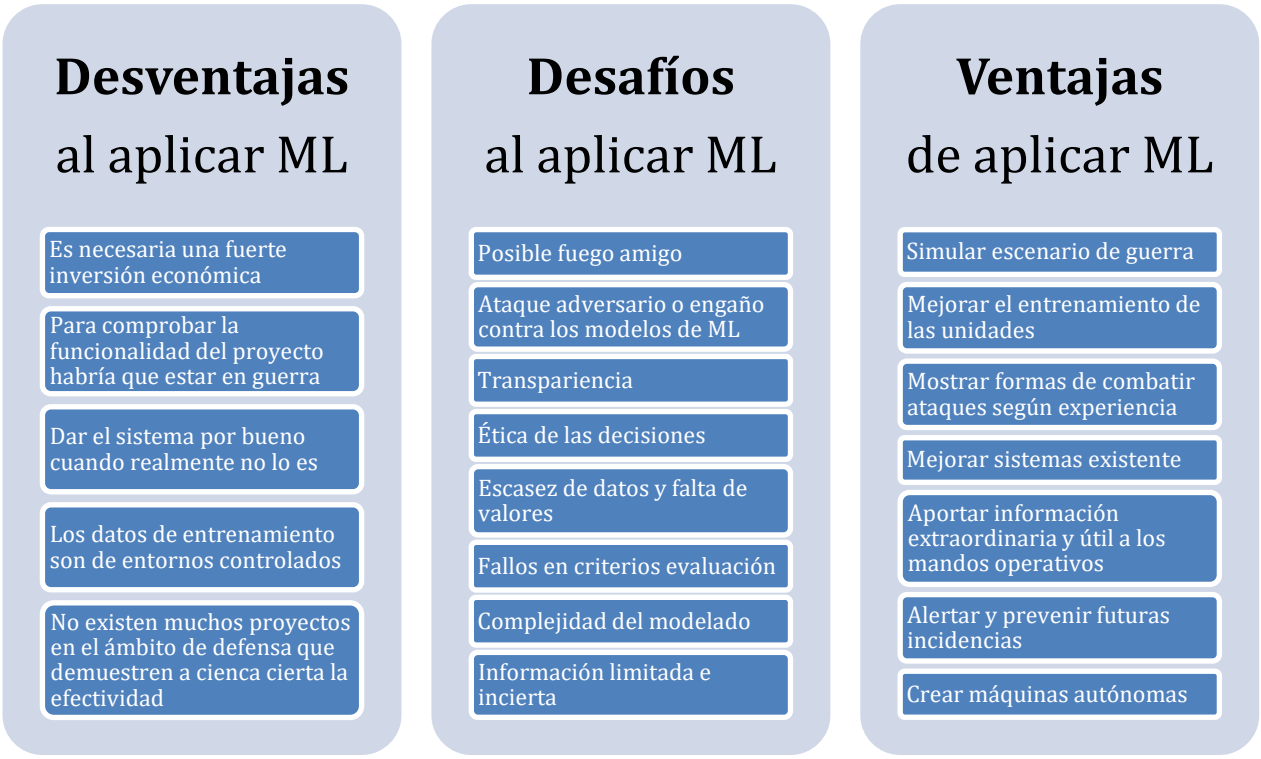



*Figura 23. Desventajas, desafíos y ventajas de aplicar ML en entornos militares*

En la Figura 23 se muestra un resumen de las desventajas, desafíos y ventajas de aplicar ML. Acto seguido, como lo más trascendental y lo que requiere cierta aclaración son los desafíos, se explicará cada uno de ellos:

- **Posible fuego amigo:** Existe la posibilidad de que haya un fuego entre unidades del mismo bando debido a una identificación errónea de activos, una confusión entre aliados y unidades hostiles, unos errores al comunicar la naturaleza de los activos identificados o una contextualización insuficiente durante el desarrollo del objetivo. La automatización de tareas lleva asociada la falta de paciencia táctica o, incluso, una meditación previa al acto, que puede materializarse en daños colaterales no evaluados.

- **Ataques adversarios contra modelos de ML:** Con el paso de los años y el uso tan extendido de esta tecnología, surge la aparición de métodos de ataques o interferencias a estos sistemas (ataques de evasión adversarial) y, por ende, la necesidad de estudiar la confiabilidad, la privacidad y la seguridad de estos algoritmos. Por ejemplo, en sistemas de imágenes, se podría insertar un ruido imperceptible al ojo humano de tal forma que se indujera a un error confiable de clasificación durante la interferencia. Cabe destacar el tipo de ataque de "caja blanca" que tiene lugar cuando el enemigo conoce el funcionamiento del algoritmo (de la red neuronal profunda) y el ataque de "caja negra" que se produce cuando el adversario conoce tan solo el tipo de entrada y salida del sistema. Investigadores de la Universidad de Stony Brook (Nueva York) e IBM, han desarrollado el marco evaluador ARES, basado en aprendizaje por refuerzo para ML adversarial, que permite a los investigadores explorar estrategias de ataque/defensa a nivel de sistema y reexaminar las estrategias de defensa de objetivos en conjunto según [92]**.**

- **Transparencia:** Al igual que en los sistemas críticos de seguridad, este tipo de aplicaciones requiere una gran transparencia, una gran seguridad y generar confianza en el usuario. Cuando se habla de transparencia, el desafío consiste en mejorar la confianza que suscite en el usuario las recomendaciones dadas por el sistema, conocer las relaciones causales previamente desconocidas que pueden probarse con otros métodos, conocer los límites del rendimiento del sistema, garantizar una equidad para evitar sesgos sistemáticos que puedan resultar en un trato desigual para algunos casos y mejorar la interoperabilidad de los modelos, es decir, que los usuarios puedan predecir las recomendaciones del sistema, comprender los parámetros del modelo y comprender el algoritmo de entrenamiento.

- **La ética en las decisiones tomadas por máquinas:** Existe una degradación de la "humanización" en las decisiones tomadas. Una máquina no se plantea la muerte de civiles como daño colateral o simplemente la moralidad de aniquilar la vida de un combatiente enemigo, incluso mostrando su rendición. Así que es un desafío importante que la máquina aprenda y contemple en su algoritmo de decisión ese

criterio. No obstante, al final de este TFM se dedicará un capítulo al asunto de la ética.

- **La escasez de datos y la falta de valores:** El rendimiento del algoritmo de ML depende principalmente de la calidad de las muestras, pudiendo disponer de grandes cantidades de ellas o multitud de datos, pero no ser óptimas ni significativas para el ejercicio. Por ejemplo, el caso del ejército americano, que es una gran potencia con muchísima experiencia en combate y con un elevadísimo número de datos registrados, puede considerar que el número de muestras para el empleo del ML es insuficiente en caso de querer aplicarlo en una confrontación real, fuerte e inminente. Por un lado, hay una gran cantidad de datos sobre el adversario que son desconocidos y por otro, la dificultad de obtención de datos en tiempo real en un combate por la imposibilidad del cómputo y del procesado de la información extraída. Si la base de datos existente tiene origen en ejercicios, seguramente estará limitada a ciertos niveles de seguridad y ciertos costes, por lo que distará mucho de una batalla real. Como solución, se plantea rellenar ese vacío de datos con un trabajo de campo muy arduo, que consiste en tomar todos los valores reales posibles para posteriormente identificarlos, etiquetarlos y crear una base de datos con etiquetados en función de las necesidades que se plantean en el algoritmo del ML. Otra opción, consistiría en la toma de muestras haciendo uso de juegos de estrategia en tiempo real, donde el mando puede desempeñar diversos roles en distintos escenarios y acumular así la experiencia en forma de datos.

- **Los fallos en los criterios de evaluación:** La finalidad última en el desarrollo de algoritmos de ML es la creación de un sistema que ayude a la toma de decisiones, en base a la experiencia acumulada y a la experiencia adquirida en nuevos escenarios. No obstante, el principal desafío es saber hasta qué punto ese algoritmo es válido y fiable para tomar decisiones y hacerlo extensible a otros escenarios. Por tanto, el proceso de toma de decisiones del sistema creado requiere de una gran cantidad de experimentos y simulaciones para probar su efectividad.

- **La complejidad del modelado del entorno táctico:** Existe mucha información en el campo de batalla donde es de relativa importancia el estado de las unidades de combate y las armas presentes. La situación es compleja debido a la dificulta para controlar el comportamiento de las unidades, modelar el entorno del campo de batalla, intuir los mecanismos de acción e identificar los criterios de evaluación. A todo esto, hay que sumarle la determinación de factores como la eficiencia y el coste de la guerra, la valoración de los daños producidos y la necesidad de sostener los recursos desplegados, o la necesidad de hacerse con el espacio aéreo, terrestre o marítimo.

  Por otro lado, también está el factor político y económico, puesto que los objetivos militares muchas veces no dejan de ser la materialización de decisiones políticas. Por tanto, en algunas ocasiones, independientemente del resultado de la

batalla bélica, si se logra una contención política y económica, las consecuencias podrían ser positivas y válidas como estrategia del entorno táctico. Todo esto dificulta la construcción de las capas superiores del sistema de modelado.

- **La información limitada e incierta:** Durante una batalla, la información que se recibe puede estar incompleta y la fuente de procedencia puede ser no segura. Por tanto, tomar decisiones con esas objeciones no garantiza el beneficio. Debido a ello, es imprescindible estudiar cómo discretizar el tiempo y la acción, crear ventanas de ventaja temporales y aprovechar la iniciativa para hacerse con objetivos militares o estratégicos. El personal al mando que tome decisiones según rutinas o protocolos prestablecidos estará tácticamente en desventaja. Lo idóneo sería prestar atención a las contingencias e innovar en sus tácticas según sea necesario.

  No obstante, la transferencia del conocimiento histórico de hechos y reglas, por parte de expertos militares, es una premisa indiscutible para comenzar el desarrollo de un algoritmo de ML a aplicar en entornos tácticos. Como base, el sistema debe saber que se entiende por dominio militar, cuál es el rendimiento de las armas empleadas, cuáles son los modelos de guerra (asimétrica, simétrica, híbrida, destructiva, nuclear…), cuáles son los modelos de decisión (política, económica, aseguramiento de civiles, conquista de territorio…), cuáles son las reglas en los conflictos armados y cuáles son las reglas de operación entre combatientes o entre aliados.

### Ejemplo de desafío sobre training data

A raíz de la información anterior, se expondrá como ejemplo los desafíos a los que debiera enfrentarse la referencia [53] sobre la simulación de guerra para predecir el buque de guerra ganador usando Random Forest. Se realizará el estudio de ejemplo en la Tabla 13 con los conceptos vistos.

| **Referencia** | [53] |
|---|---|
| **Complejidad del modelado del entorno táctico** | El estudio no contempla el escenario donde se produciría la batalla ni el estado inicial de las unidades de combate. Tan solo se basa en el tamaño, velocidad, capacidad, número de tripulantes, ataque, ataque adicional y defensa de los buques. |
| **Información limitada e incierta** | El estudio solo ofrece un ganador final. Es necesario discretizar el tiempo y la acción por si hubiera, por ejemplo, un fallo de fuego o una limitación de armas. Esto cambiaría la situación. |
| **Escasez de datos y la falta de valores** | La referencia emplea 9660 conjuntos de datos de acorazados, pero hay datos confidenciales como posibles armas secretas o sistemas de defensa novedosos que no se contemplen. |
| **Fallos en los criterios** | Sin datos del campo de batalla y con la limitación de datos |

| | |
|---|---|
| **de evaluación** | de entrenamiento, no se podría asegurar si el algoritmo es válido y fiable en un escenario real. |
| **Transparencia** | Para que el mando pueda confiar completamente en la predicción del algoritmo, debería ser conocedor de todas las fuentes y limitaciones. En este caso, la información parece transparente pero también es muy simple. |
| **Ética en las decisiones tomadas por máquinas** | En este caso no aplica puesto que el algoritmo no toma decisiones, solo predice ganador. |
| **Posible fuego amigo** | En este caso no aplica puesto que el algoritmo no tiene que identificar unidades amigas o enemigas, solo predice ganador. |
| **Ataques adversarios** | El enemigo podría similar la disposición de armas falsas. Habría que comprobar si esto puede afectar a los datos de entrenamiento y al resultado final. |

*Tabla 13. Ejemplo de desafío sobre training data*

## 4.3. Brainstorming o guía para el desarrollo de nuevos proyectos de ML en entornos militares.

En la literatura consultada no se ha encontrado una guía para el desarrollo de nuevos proyectos de ML en los sistemas de defensa. Por tanto, a raíz de lo presentado en el estado del arte, del análisis de las referencias de ML en los sistemas de defensa y los desafíos identificados para una correcta aplicación, se ha realizado una guía específica de ML, para proyectos bélicos, que arroje algo de luz a aquellos investigadores que quieran desarrollar productos en este ámbito.

Como primera aproximación, se presenta la Figura 24 con los algoritmos empleados hasta la fecha en las diferentes propuestas de ML en defensa y el número de veces que se han usado. Señalar que en algunas referencias no se especifica la técnica empleada y en otras se usan varios algoritmos y se comparan los resultados.

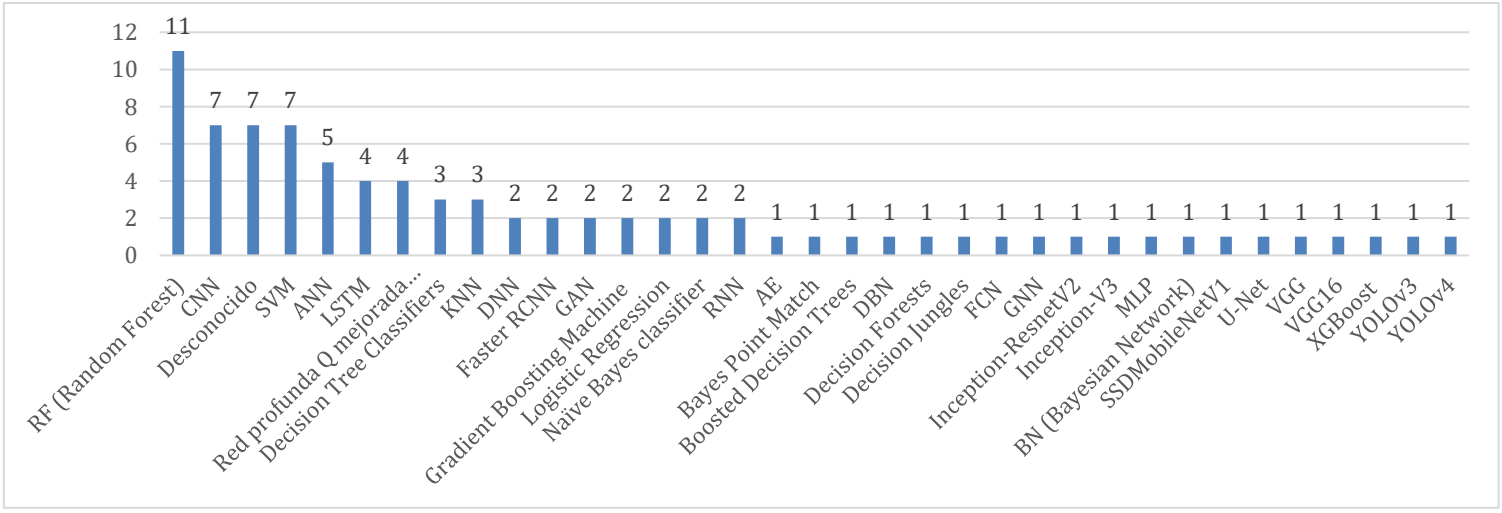



*Figura 24. Técnicas de ML empleadas en las referencias.*

En la Figura 24 se muestra como las técnicas más empleadas son RF, CNN y SVM. Notar también que hay siete referencias que no han especificado en el artículo qué algoritmo es el que se ha empleado.

A continuación, se presenta la Figura 25 donde se resume la multitud de factores que habría que tener en cuenta al aplicar ML en los sistemas de defensa.

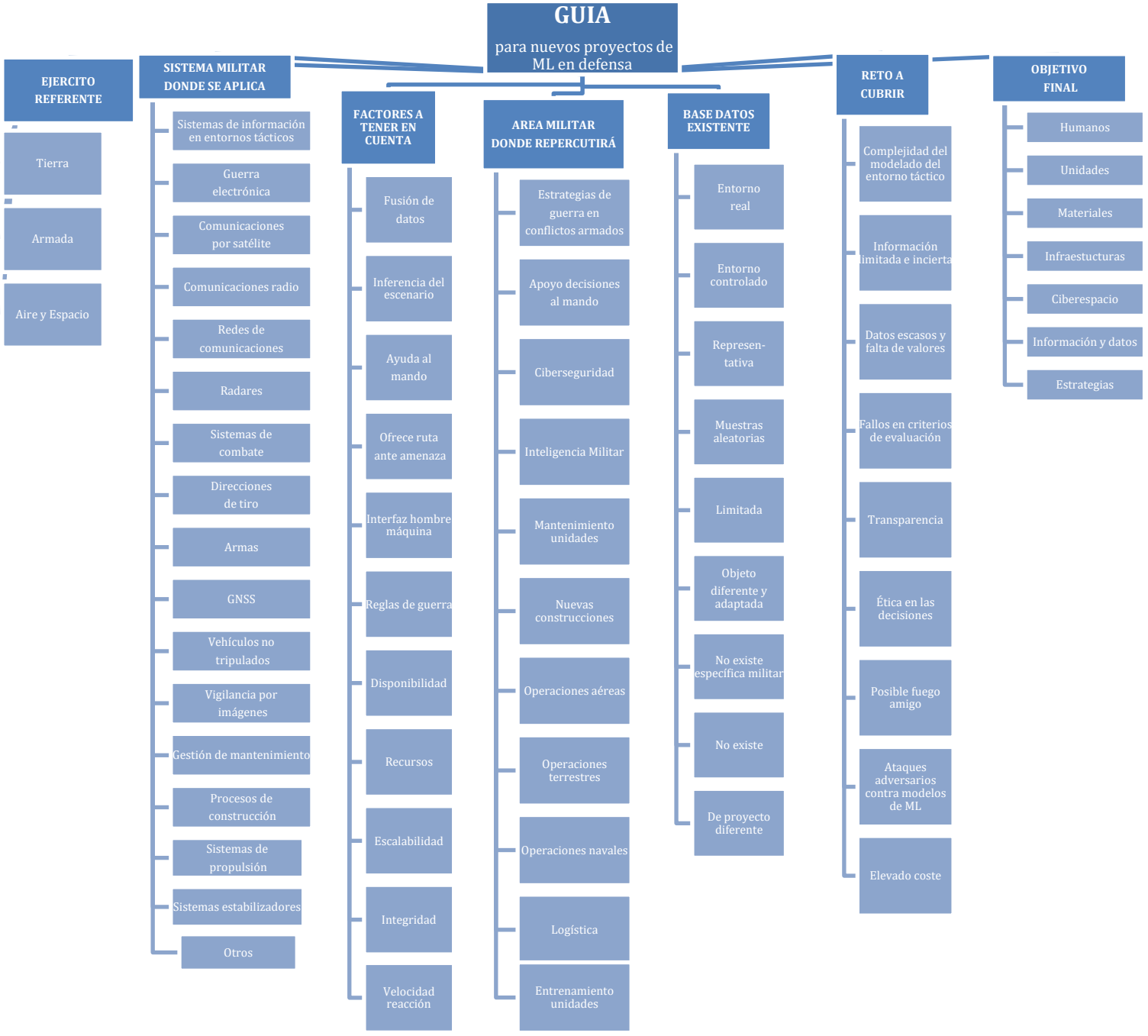



*Figura 25. Guía para nuevos proyectos de ML en sistemas de defensa*

En la Figura 25 se expone la guía, en formato árbol, con todos los términos que se han ido trabajando a lo largo de este TFM donde se especifican muchos criterios de diseño. Es una reseña visual muy útil para nuevos proyectos. En el siguiente apartado se expondrá un ejemplo de aplicación.

**Ejemplo de la guía de aplicación de ML en sistemas de defensa**

Supóngase que se quiera implementar una técnica de ML en un radar marítimo con el objetivo de localizar barcos nodriza, como los que usan los "piratas somalíes", para alertar de su presencia a los buques de la Armada. En base a la guía, se irían seleccionando todos los aspectos relevantes que aportarían una primera idea a la investigación y claridad al asunto. Como ejemplo, la Tabla 14 muestra cómo se aplicaría esta guía y el resultado.

| **Propuesta** | ***Localización de barcos nodriza tipo "piratas somalíes"*** |
|---|---|
| **Ejército** | Armada |
| **Sistema militar** | Radar de navegación |
| **Factores a tener en cuenta** | Fusión de datos (AIS y comunicación vía radio), la inferencia del escenario, la ayuda al mando, la interfaz hombre-máquina, la disponibilidad, la escalabilidad, la integridad y la velocidad de reacción. |
| **Área militar** | Inteligencia militar y operaciones navales |
| **Base de datos** | Podría desarrollarse en un entorno real o con muestras representativas. Importante las cualidades de las embarcaciones como eslora, manga, velocidad, rumbo, sin sistema de identificación tipo AIS, no respuesta a preguntas vía radio y proximidad a buques mercantes. |
| **Reto** | El modelado del entorno táctico y los criterios de evaluación. |
| **Objetivo final** | Unidades tipo barcos nodriza |

*Tabla 14. Ejemplo de aplicación de la guía ML*

## 4.4. Impacto del machine learning en defensa.

Como viene mostrando la historia, primero surgen las nuevas tecnologías y, con el paso de los años y a medida que la población hace uso de ellas, aparece la intervención jurídico-política marcando una regulación legal y en determinadas ocasiones unas recomendaciones que podrían llamarse recomendaciones éticas, sanitarias o sociales. El caso del aprendizaje automático de las máquinas no es diferente al resto de avances de la ciencia, pero ha sido en estos últimos años cuando ha comenzado a plantearse su regulación porque es principalmente cuando se está materializando algo que hasta entonces era pura literatura.

### 4.4.1. Marco Legal

El primer documento importante a nivel europeo sobre la regulación legal de la Inteligencia Artificial fue el “Libro Blanco”, publicado en Bruselas por la Comisión Europea en febrero de 2020. Básicamente el objetivo es aprovechar los puntos fuertes de los mercados industriales y profesionales, así como el enorme volumen de datos digitales producidos en el mundo, para crear un ecosistema de excelencia que pueda respaldar el desarrollo y la adopción de la Inteligencia Artificial en el conjunto de la economía y de la administración pública de la UE.

Para la Comisión Europea, según un comunicado oficial, debían cumplirse siete requisitos esenciales en la legislación de la IA:

- Acción y supervisión humanas.
- Solidez técnica y seguridad.
- Gestión de la privacidad y de los datos.
- Transparencia.
- Diversidad, no discriminación y equidad.
- Bienestar social y medioambiental.
- Rendición de cuentas.

Igualmente, se mostró especial preocupación en la protección de los derechos fundamentales como la protección de los datos personales, la privacidad y la no discriminación. También se manifestó inquietud por la responsabilidad civil y penal de las acciones ejecutadas por los sistemas o máquinas autónomas debido al uso en ellas del machine learning.

En base a lo anterior, el Gobierno de España y la Comisión Europea presentaron en junio de este año un proyecto piloto regulador sobre la Inteligencia Artificial denominado “sandbox”. El objetivo de este sandbox es servir de herramienta para llevar a cabo una primera aproximación de reglamento, asentada en la experiencia de las autoridades legislativas y las empresas que desarrollan IA, para concretar e identificar las mejores prácticas de implementación de esta tecnología. Este proyecto piloto presumiblemente será el principio del Reglamento Europeo en materia de IA y se prevé que esté implementado en dos años.

Por último, hay que destacar que en la disposición adicional centésima trigésima del Boletín Oficial del Estado del 29 de diciembre de 2021 se autoriza al Gobierno a impulsar la creación de la Agencia Española de Supervisión de Inteligencia Artificial, configurada como Agencia Estatal dotada de personalidad jurídica pública, patrimonio propio y autonomía en su gestión, con potestad administrativa. La Agencia se encontrará adscrita a la Secretaría de Estado de Digitalización e Inteligencia Artificial, dentro del Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital.

### 4.4.2. Ético

Un claro ejemplo, relativamente reciente y de trascendencia internacional, de los problemas éticos que puede suponer el uso del machine learning en entornos tácitos militares es la no renovación de Google en el Proyecto Maven con el Pentágono de los Estados Unidos. Esta fue una decisión muy polémica en las que más de 3.000 empleados de la compañía pidieron la cancelación del proyecto, en principio, sugerida por una falta de confianza en el uso de ese sistema por el gobierno.

Es indiscutible que el empleo de los sistemas de guerra debe hacerse dentro del Derecho Internacional Humanitario (DIH), donde se establece un conjunto de normas destinadas a limitar, por razones humanitarias, los efectos de los conflictos armados (Derecho de La Haya). Para ello, en función de la situación táctica, es imprescindible que las acciones de guerra estén lideradas y supervisadas por humanos quienes serán responsables de establecer un nivel adecuado de discriminación y precaución de tal forma que los riesgos de los no combatientes sean proporcionales a la importancia de los objetivos militares. No obstante, se está hablando de una situación bélica donde el enemigo podría estar haciendo uso de sistemas de armas autónomas y letales, y que, por tanto, aquellos niveles adecuados nombrados anteriormente, que debieran establecerse casi de manera semiautomática, pudieran no ser compatibles con la protección de las unidades activadas en el campo de batalla y con el éxito de la misión.

El uso de la inteligencia artificial militar puede ser adecuada por su velocidad, determinación y exactitud, pero también puede ser preocupante por sus decisiones sin templanza ni meditación, sin estar adaptadas a los diversos laberintos bélicos. Factores como la determinación de los combatientes, identificación de la población pacífica, aliados civiles y militares, ataques con intensidad desmedida, amenazas, fallos del sistema, suplantaciones de identidad, sistema desplegado no experimentado suficientemente… podrían promover una escalada en la situación de guerra y ocasionar mayor riesgo en vez de ventajas. Es muy difícil que una máquina de forma automática atienda y evalúe los principios de distinción y proporcionalidad. Distinción entre un civil aterrado y un combatiente peligroso en un escenario urbano, y proporcionalidad porque requiere una evaluación cuantitativa, cualitativa y ética para aplicar la fuerza de defensa justa ante la agresión.

Otros aspectos importantes son la responsabilidad y la dignidad humana. La responsabilidad sirve como elemento disuasorio para no llevar a cabo acciones desmedidas, como garante de la aplicación de la ley y como castigo moral. La dignidad humana porque desde un punto de moral, una muerte humana elegida por un algoritmo completamente autónomo conlleva a entender la vida humana como un objeto. La decisión de eliminar una vida debería acarrear al menos un juicio moral previo.

Por último, es importante destacar que, en el año 2015, la Open Roboethics Institute (ORI) realizó una encuesta internacional en la que recibió contestación de más

de 1.000 personas de 54 países diferentes. Entre otros aspectos, en ésta se preguntaba la opinión por el uso de sistemas de armas letales autónomos (SALAS). Los resultados fueron los siguiente:

- Según el 67% de los encuestados, todos los tipos de SALAS deberían estar prohibidos internacionalmente.
- Según el 56% de los encuestados, debería estar prohibido la utilización y desarrollo de los SALAS.
- Según el 85% de los encuestados, los SALAS no deben ser usados para propósitos ofensivos.
- Según el 71% de los encuestados, se deberían utilizar sistemas de armas operados remotamente en lugar de SALAS.
- Según el 60% de los encuestados, preferirían ser atacados por sistemas operados remotamente antes que por SALAS.

Como primera impresión, parece que el desarrollo y uso de los SALAS no ha tenido una gran acogida entre los encuestados. Quizás los factores morales y éticos hayan prevalecido frente a las estrategias de guerra y al éxito de las operaciones.

### 4.4.3. Impacto económico.

La Inteligencia Artificial y la aplicación del machine learning en sistemas y en entornos tácticos militares está siendo fuertemente impulsada por los departamentos de Defensa de los estados, particularmente los gobiernos de Estados Unidos y China son quienes mayor inversión están efectuando. Ya en unas declaraciones del año 2017 realizadas por la Teniente General de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, VeraLinn Jamieson, estimaba que el gasto en IA de China era de 12 mil millones de dólares en el año 2017 y que ascendería a 70 mil millones en 2020. Por otra parte, reconocía que el gasto de Estados Unidos en IA en el año 2017 fue de 2,4 mil millones de dólares y que esperaba que en el año 2020 al menos se igualara al de China.

Con respecto al presente, EE.UU. ha aprobado un presupuesto militar de unos 840 mil millones de dólares, de los cuales presumiblemente, aunque es muy difícil facilitar cifras exactas, un 20% vayan a destinarlo a proyectos relacionados con la Inteligencia Artificial que de una forma u otra tendrán relación con el machine learning. Por tanto, la inversión en esta tecnología podría ascender a unos 160 mil millones de dólares donde, entre otros, habría que destacar sus proyectos “GIDE”, “In the moment” (ITM), “ATLAS” o “MAVEN”. Por otra parte, aunque cada vez los datos actuales son más difíciles de conseguir, el gigante asiático espera dedicar una partida de aproximadamente 126 mil millones de dólares a la IA.

Referente a la Unión Europea, decir que están muy lejos de esas cantidades económicas nombradas anteriormente. Para hacerse una idea, la Unión Europea invirtió en 2019-2020 unos 500 millones de euros en el European Defence Industrial

Development Programme (EDIDP) de los cuales tan solo destinó a la inteligencia artificial unos 7,1 millones (AI4DEF) aunque para los próximos años se prevé una fuerte inversión. Por ejemplo, el Fondo Europeo de la Defensa (EDF) está presupuestado en 9.000 millones de euros para el período 2021-2027 y de esos, para el año 2022, plantea invertir 25,5 millones en IA.

También existen otros programas europeos de defensa que financian proyectos de IA pero ya sería objeto de otro estudio determinar con exactitud su aportación al machine learning o deep learning. Estos programas serían:

- Fondo Europeo de Defensa (2021 –2027), ya comentado anteriormente.
- European Defence Industrial Development Programme (EDIDP)
- Acción Preparatoria de Investigación en Defensa (PADR).
- Proyectos de la Agencia Europea de Defensa.
- Proyectos PESCO.
- Otros proyectos multilaterales (FCAS, ESSOR, ...).

En el caso de España, el gasto en defensa ha pasado de 9,8 mil millones de euros en 2017 a 13,3 mil millones de euros en 2021, con la expectativa de que en los próximos 5 años aumente hasta 18,3 mil millones de euros. De esa cuantía, se presupone que la partida dedicada a adquisiciones aumentará de 3,2 mil millones a 4,3 mil millones en 2026, pero es muy difícil saber cuánto se ha invertido o invertirá en proyectos de IA o ML. No obstante, según los BOE de 24 de diciembre de 2021, de 4 de enero de 2021, de 10 de febrero de 2020 y de 21 de diciembre de 2018, se podría estimar la relación de proyectos seleccionados como de interés para la Defensa, en el ámbito del Programa de Cooperación en Investigación Científica y Desarrollo en Tecnologías Estratégicas (Programa Coincidente) relacionados con IA o ML. Realizando esa investigación, se estima que los proyectos relacionados con la tecnología expuesta en este TFM y la cuantía con la que se han financiado esos proyectos es la detallada en la Tabla 15:

| PROYECTO | ADJUDICACION ECONÓMICA |
|---|---|
| DIEDRO<br>Detección remota de artefactos explosivos improvisados combinando Robots terrestres y aéreos (con IA y DL) | Información no disponible.<br>Propuesta DIC21.<br>Fundación Instituto Tecnológico de Galicia (ITG) |
| URBAN<br>Mini UGV autónomo para la superioridad de la información en entornos urbanos | 600.000,00 €<br>Propuesta DIC21.<br>Tecnologías, Servicios Telemáticos y Sistemas, S.A. (TST). |
| ALANO<br>Asistente Logístico Autónomo a Núcleo Operativo | Información no disponible.<br>Propuesta DIC21<br>Equipos Industriales de Manutención S.A. (EINSA). |
| UGV RECO<br>Diseño y fabricación de un vehículo autónomo de exploración y reconocimiento | Información no disponible.<br>Propuesta DIC21.<br>Comercial Hernando Moreno S.L.U.(COHEMO), |
| ART-CRAM<br>Desarrollo de un demostrador tecnológico de radar persistente 3D C-RAM (Counter Rockets, Artillery and Mortar) | 534.000,00 €<br>Propuesta ENE21.<br>Advanced Radar Technologies S.A. (ART) |
| SEDIM<br>Sistema Electroóptico de Detección Infrarroja Multibanda. | 619.834,71 €<br>Propuesta ENE21.<br>Escribano Mechanical & Engineering S.L. |

| | |
|---|---|
| GUDEX<br>Exoesqueleto de combate semiactivo, modular y ligero. | 395.214,19 €<br>Propuesta ENE21.<br>Gogoa Mobility Robots, S.L. |
| COLCE SATGE<br>Diseño, fabricación y suministro de un sistema autónomo de transporte para materiales y de armas de gran envergadura. | 950.000,00 €<br>Propuesta ENE21.<br>Sonovision Ingenieros España SAU |
| ART-SAR<br>Desarrollo de un demostrador tecnológico de un radar de apertura sintética compacto para RPAS de Clase I | 400.000 €<br>Propuesta FEB20<br>Advanced Radar Technologies, S.A. |
| PROTON<br>Procedimientos y receptor para las medidas en tierra y soporte a la calibración de sistemas TACAN mediante el uso de dron. | 90.000,00 €<br>Propuesta FEB20<br>Canard Drones, S.L.U. |
| SET A-FOX<br>Integración de armamento guiado en RPAS de clase I. | 400.000 €<br>Propuesta FEB20<br>AERTEC Solutions, S.L. |
| COBRA.<br>Cibermaniobras adaptativas y personalizables de simulación hiperrealista de APTs y entrenamiento en ciberdefensa usando gamificación. | 400.000 €<br>Propuesta FEB20<br>Universidad de Murcia (UMU) |
| SIMUR.<br>Simulador interactivo en realidad virtual multiusuario para el entrenamiento y formación de personal del C. Militar Sanidad. | 400.000 €<br>Propuesta FEB20<br>Virtualware 2007, S.A. |
| SIMBAAD.<br>Sistema Integrado de Monitorización y Búsqueda de Amenazas Acuáticas para Defensa. | 400.000 €<br>Propuesta DIC18<br>Universitat Jaume I (UJI). |
| FAVENTAN.<br>Funciones avanzadas para vehículos no tripulados en el ámbito naval. | 471.000 €<br>Propuesta DIC18<br>Navantia S.A. |
| MANPREDIC<br>Mantenimiento predictivo para plataformas terrestres. | 383.165,59 €<br>Propuesta DIC18<br>Universidad de Córdoba. |
| ARCO<br>Aplicación robótica a un convoy operativo. | 450.000,00 €<br>Propuesta DIC18<br>Centro de Automática y Robótica (UPM) |
| SEDA<br>Satellite Data AI | 358.182,00 €<br>Propuesta DIC18<br>HI Iberia Ingeniería y Proyectos S.l. |
| PLICA<br>Plataforma integrada de conciencia cibersituacional | 399.707,21 €<br>Propuesta DIC18<br>Universidad Politécnica de Madrid (UPM) |
| SIAAMETOC-OM<br>Sistema integrado de apoyo automático meteo-oceanográfico para operaciones marítimas | 306.727,20 €<br>Propuesta DIC18<br>Fundación Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria |
| CUSTODES<br>Sistemas inteligentes para el procesamiento de imágenes y la detección de amenazas en escenarios de conflicto | 388.114,22 €<br>Propuesta DIC18<br>Universidad de Jaén |
| SOPRENE<br>Utilización de red neuronal como método de mantenimiento basado en la condición en los buques de la Armada | 714.049,58 €<br>Propuesta DIC18<br>INDRA SISTEMAS, S.A. |

*Tabla 15. Impacto económico ML en defensa (proyecto vs adjudicación económica)*

Tras el análisis anterior, donde es imprescindible remarcar que las cantidades económicas son orientativas ya que ha dependido de los datos publicados en las que en algunas se incluía el IVA o, en otras muy recientes, no tienen ni adjudicación, la inversión que ha realizado el Estado Español en proyectos militares relacionados con la IA, ML o DL en los últimos 3 años es algo superior a los 9 millones de euros, cantidad muy alejadas de EEUU o China. También es importante destacar que al ser proyectos actuales de I+D+i, la información que hay de ellos en internet es muy escasa o nula y, por tanto, podría haberse omitido en la tabla anterior algún proyecto con la tecnología analizada por falta de información.

# 4. Conclusiones y trabajos futuros

Una vez concluido el TFM, las principales conclusiones que se obtienen son las siguientes:

- Existe bastante literatura de ML pero no exclusiva sobre la aplicación de esta técnica en los sistemas de defensa.

- No es hasta el año 2018 cuando países como España comienzan a apostar por esta herramienta. Otros referentes como EE.UU. o China comenzaron mucho antes y han dedicado grandes recursos en investigaciones.

- Hay muchas referencias de trabajos en el ámbito civil que podrían adaptarse para incluir esos algoritmos en los sistemas militares.

- Se ha visto necesaria la elaboración de un modelo de tabla de análisis debido a que hay muchos factores decisivos en el desarrollo y muchas áreas militares que pueden verse afectadas. Quizás, en la mayoría de las ocasiones, el investigador elabora un producto desde su punto de vista técnico y se olvida, tal vez por desconocimiento, de la influencia que puede tener esa herramienta en las áreas militares, incluso en otras para las que no fue pensada originalmente. Lo mismo ocurre con los factores decisivos, el ingeniero elabora un producto, pero si éste no cumple con unos criterios como el de integridad, velocidad, disponibilidad, entre otros, criterios militares necesarios, el proyecto no sería válido para sistemas de defensa.

- Se han superado los objetivos propuestos debido a que, de la idea origen del análisis, han surgido tres productos derivados como son los desafíos encontrados, la guía de aplicación para nuevos proyectos y el impacto ético, económico y legal que ha supuesto la aplicación de esta tecnología en el ejército.

- La planificación que se había propuesto originalmente hubo que modificarla debido a la escasez de referencias específicas. También por la aparición y oportunidad de reflejar los tres productos derivados comentados anteriormente.

- Destacar del impacto ético el hecho de abandonar la decisión de acabar con una vida humana en máquinas autónomas y automáticas que, por medio del aprendizaje automático, se les ha podido “facultar” para ello sin juicio moral alguno. No obstante, es uno de los casos ya que, por regla general, el ML se suele emplear como herramienta de predicción o de mejora de un sistema.

Con respecto a las líneas de trabajo futuras, habría que destacar las que se indican en los guiones adjuntos:

- Continuar con la búsqueda de referencias del ámbito civil que pudieran implementarse en sistemas militares.

- Mejorar las referencias militares analizadas ya que, gracias a las tablas de análisis, se han identificado muchas carencias en caso de querer emplearlas en un escenario real.

- Adaptar para defensa las referencias civiles analizadas que se han propuesto implementar en su correspondiente sistema militar.

- Investigar cómo mitigar los desafíos encontrados.

- Desarrollar la referencia propuesta en la dirección de tiro para eliminar el sensor radárico o mejorar el seguimiento con sensores CCD, IR y telémetro láser entrenados. Lo mismo podría hacerse con la propuesta de identificación de embarcaciones nodrizas por medio del radar de navegación.

- Aplicar la guía elaborada para nuevos proyectos de ML en defensa, mejorarla y comprobar su valía en un caso real que comience desde cero.

# 5. Glosario

| | |
|---|---|
| A2A | Aire-aire |
| A2G | Aire-tierra |
| AEC | Árbol de Elementos Configurados |
| AESA | Active Electronically Scanned Array |
| AMDR | Air and Missile Defense Radar |
| ANN | Artificial Neural Network |
| APTs | Amenazas Persistente Avanzadas |
| ATAVIA | Automatización de Tareas de Vigilancia y Análisis |
| ATLAS | Advanced Targeting and Lethality Automated System |
| ATR | Reconocimiento automático de objetivos |
| BLV | Velocidad límite balística |
| BVR | Combate aéreo más allá del alcance visual |
| C2IS | Sistemas de Información de Comando y Control |
| C4ISR | Comando, Control, Comunicaciones, Computadoras, Inteligencia, Vigilancia y Reconocimiento |
| CESADAR | Centro de Supervisión y Análisis de datos de la Armada |
| CEW | Guerra electrónica cognitiva |
| CL | Cross-Layer |
| CNN | Convolutional Neural Network |
| CR | Cognitive Radio |
| DIL | Desconectadas, Intermitentes y Limitadas |
| DL | Deep Learning |
| DNN | Deep Neural Network |
| DORNA | Dirección de Tiro Optrónica y Radárica Naval |
| EA | Electronic Attack |
| ECM | Electronic Counter Measures |
| EPM | Electronic Protective Measures |
| ES2 | Every Soldier is a Sensor |
| ESM | Electronic Support Measures |
| EW | Electronic Warfare |
| G2A | Tierra-aire |
| GALIA | Gestión del Apoyo Logístico Integrado de la Armada |
| GAN | Redes generativas adversariales |
| GEOINT | GEOspatial INTelligence |
| GIDE | Global Information Dominance Experiment |
| GNN | Graph Neural Network architectures |
| HCA | Análisis jerárquico de conglomerados |
| IA | Inteligencia Artificial |
| ICMP | Plan de Mantenimiento Integrado de la Clase |
| IoBT | Internet of Battlefield Things |
| IoT | Internet of Things |
| LSTM | Long Short-Term Memory |

| | |
|---|---|
| MAPRE | Mantenimiento Predictivo Embarcado |
| MCCE | Mando Conjunto del Ciber Espacio |
| MESAR | Radar adaptativo multifunción escaneado electrónicamente |
| MFR | Radares multifuncionales |
| MFRFS | Sistema de radiofrecuencia multifuncional |
| ML | Machine Learning |
| MSTAR | Reconocimiento de objetivos móviles y estacionarios |
| N/A | No aplica |
| OODA | Observar, Orientar, Decidir y Actuar |
| PCA | Análisis de componentes principales |
| PdM | Mantenimiento predictivo |
| PDW | Pulse Description Word |
| PNT | Posicionamiento, Navegación y Temporización |
| RF | Random Forest |
| RIS | Superficies Inteligentes Reconfigurables |
| RMA | Radar Modular Assemble |
| SA | Conciencia ambiental y situacional |
| SAR | Radar de Apertura Sintética |
| SDR | Software-defined radio |
| SEDA | SatEllite Data Ai |
| SICP | Sistema Integrado de Control de Plataforma |
| SMBC | Sistema de Mantenimiento Basado en la Condición |
| SOPRENE | Sostenimiento Predictivo basado en Redes Neuronales |
| SVM | Support Vector Machine |
| TAK | Ecosistemas Tactical Assault Kit |
| TTFF | Tiempo hasta la primera corrección |
| UAS | Unmanned Air System |
| UAV | Unmanned Aerial Vehicle |
| UGV | Unmanned Ground Vehicle |
| USV | Unmanned Surface Vehicle |
| VGG | Redes neuronales espléndidas |

# 6. Bibliografía

[1] "Boletín Oficial del Estado," 21 12 2018. [Online]. Available: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2018-17560.

[2] "Web Ejército de Tierra, medios tácticos y materiales," diciembre 2022. [Online]. Available: https://ejercito.defensa.gob.es/materiales/index.html.

[3] A. Martínez, "incibe-cert," 28 05 2014. [Online]. Available: https://www.incibe-cert.es/blog/osint-la-informacion-es-poder.

[4] "grupo OESIA," Tecnobit, [Online]. Available: https://grupooesia.com/casos-de-exito/instalacion-linpro-armada-holandesa/.

[5] "af," 22 julio 2021. [Online]. Available: https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/2703548/norad-usnorthcom-lead-3rd-global-information-dominance-experiment/.

[6] "SYSCOM," 18 noviembre 2021. [Online]. Available: https://www.syscomblog.com/2021/11/quien-invento-el-primer-sistema-de-cctv.html.

[7] Raquel Elias, "Interempresas," 19 06 2019. [Online]. Available: https://www.interempresas.net/Seguridad/Articulos/247951-Sistemas-de-CCTV-mas-alla-de-la-seguridad.html.

[8] "Caught On Camera," [Online]. Available: https://www.caughtoncamera.net/news/different-types-of-cctv/.

[9] Stutzer, Alois; Zehnder, Michael;, "ResearchGate," enero 2010. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/46450318_Camera_Surveillance_as_a_Measure_of_Counterterrorism.

[10] Regimiento de Guerra Electronica 31, "Ministerio de Defensa, Ejército de Tierra," [Online]. Available: https://ejercito.defensa.gob.es/ca/unidades/Madrid/rew31/Organizacion/index.html.

[11] J. M. Navarro García, "El sistema de guerra electrónica de la fragata F-110," 17 septiembre 2018. [Online]. Available: https://www.defensa.com/espana/sistema-guerra-electronica-fragata-f-110.

[12] de Canales Martínez, Manuel González;, "Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar," 2020. [Online]. Available: http://calderon.cud.uvigo.es/bitstream/handle/123456789/355/Gonz%C3%A1lez%20de%20Canales%20Mart%C3%ADnez%2C%20Manuel%20-%20Memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

[13] "RIGEL ES and EA Systems," [Online]. Available: https://www.indracompany.com/sites/default/files/rigel_es_and_ea_systems_0.pdf.

[14] La Rivera Rentería, Juan Miguel;, "ACAPOMIL," Srta. Cinthya Lepin Rueda, octubre 2017. [Online]. Available: https://www.acapomil.cl/postgrado/extension/pdf/6_LIBRO%20INTRODUCTORIO%20A%20RADARES_.pdf.

[15] Parker Sanfuentes, Jorge;, "Revista de Marina," 2000. [Online]. Available: https://revistamarina.cl/revistas/2000/1/jparkers.pdf.

[16] Wolff, Christian;, "Radar Tutorial," [Online]. Available: https://www.radartutorial.eu/02.basics/rp10.es.html.

[17] "Lockheed Martin," 2022. [Online]. Available: https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/spy-7.html.

[18] "Wikipedia," octubre 2022. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/AN/SPY-6.

[19] J. A. Gómez Vizcaíno, "Asociación de Fortalezas y Castillos de Cartagena," octubre 2006. [Online]. Available: https://aforca.org/antigua/jornadas/pon06_06.pdf.

[20] P. Guerrero L, "Blog Naval," diciembre 2018. [Online]. Available: https://blognaval.es/armando-el-bam/.

[21] "Navantia," 2021. [Online]. Available: https://www.navantia.es/es/lineas-de-negocio/sistemas/dorna/.

[22] "SRMconsulting," 26 05 2021. [Online]. Available: https://srmconsulting.es/blog/uav-uas-rpa-dron-como-llamarlos.html.

[23] CUERNO REJADO, CRISTINA; GARCIA HERNANDEZ, LUIS; SANCHEZ CARMONA, ALEJANDRO; CARRIO FERNANDEZ, ADRIAN; SANCHEZ LOPEZ, JOSE LUIS; CAMPOY CERVERA, PASCUAL;, "Universidad Politécnica de Madrid," junio 2016. [Online]. Available: https://oa.upm.es/40803/1/INVE_MEM_2015_203893.pdf.

[24] "FLIR," [Online]. Available: https://www.flir.es/products/black-hornet-prs/.

[25] Ben Aissa, Sana; Ben Letaifa, Asma;, "SpringerLink," 03 agosto 2021. [Online]. Available: https://link.springer.com/article/10.1007/s13369-021-05932-w.

[26] J. M. Macías Gaya, "Revista General de Marina," febrero 2019. [Online]. Available: https://armada.defensa.gob.es/archivo/rgm/2019/01/Regmcap6.pdf.

[27] Blanco Galdo, Miguel;, "Revista General de Marina," marzo 2012. [Online]. Available: https://publicaciones.defensa.gob.es/media/downloadable/files/links/r/g/rgm_262_2_marzo_2012.pdf.

[28] F. Lamas López, "Revista General de Marina," Julio 2022. [Online]. Available: https://armada.defensa.gob.es/archivo/rgm/2022/07/rgmjul2022cap08.pdf.

[29] W. W. H. L. W. L. Y. Chen., "IEEE," 17 julio 2020. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9143084.

[30] E. e. d. AlphaStar, "Deepmind," 24 enero 2019. [Online]. Available: https://www.deepmind.com/blog/alphastar-mastering-the-real-time-strategy-game-starcraft-ii.

[31] J. A. Redondo Martín, "IMF, blog de tecnología. Artículo Google Imágenes y el machine learning que todo lo ve," junio 2017. [Online]. Available: https://blogs.imf-formacion.com/blog/tecnologia/google-imagenes-cerebro-electronico-lo-ve-201706/#%C2%BFY_todo_esto_como_lo_uso_Llega_Google_Lens.

[32] G. Gamarra, "Profesional Review - Artículo las 5 Mejores aplicaciones de reconocimiento de voz," agosto 2016. [Online]. Available: https://www.profesionalreview.com/2016/08/17/5-mejores-aplicaciones-reconocimiento-voz/.

[33] Ajitesh Kumar, "Data Analytics: Data, Data Science, Machine Learning, AI," 17 noviembre 2021. [Online]. Available: https://vitalflux.com/deep-neural-network-examples-from-real-life/.

[34] "Barcelona Supercomputing Center," 16 junio 2022. [Online]. Available: https://www.bsc.es/news/bsc-news/marenostrum5-new-eurohpc-world-class-supercomputer-spain.

[35] J. A. Pascual Estapé, "Computer hoy. Artículo IBM Summit: así es el superordenador más potente del mundo," 02 05 2020. [Online]. Available: https://computerhoy.com/reportajes/tecnologia/ibm-summit-superordenador-mas-potente-del-mundo-627963.

[36] N. Hemsoth, "NextPlatform. Artículo CHINA YA HA ALCANZADO LA EXAESCALA, EN DOS SISTEMAS SEPARADOS," 26 octubre 2021. [Online]. Available: https://www.nextplatform.com/2021/10/26/china-has-already-reached-exascale-on-two-separate-systems/.

[37] A. Geron, Hands-on machine learning with Scikit-learn, Keras, and TensorFlow : concepts, tools, and techniques to build intelligent systems (Second edition), USA: O'Reilly Media, 2019.

[38] J. Bobadilla, Machine Learning y Deep Learning usando Python, Scikit y Keras, Bogotá: Ediciones de la U, 2020.

[39] "Ministerio de Defensa," mayo 2022. [Online]. Available: https://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es/es-es/Presentacion/ImasD/Paginas/Coincidente.aspx.

[40] Desconocido, "El Mundo," agosto 2021. [Online]. Available: https://www.elmundo.es/tecnologia/2021/08/06/610b8a5ae4d4d86d2e8b45c1.html.

[41] J. A. R.-V. P. N. Felix Gomez Marmol, "Researchgate," enero 2021. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/352267463_COBRA_Cibermaniobras_adaptativas_y_personalizables_de_simulacion_hiperrealista_de_APTs_y_entrenamiento_en_ciberdefensa_usando_gamificacion.

[42] "Hi-iberia," [Online]. Available: https://www.hi-iberia.es/artificial-intelligence/seda.

[43] "You Tube," 02 diciembre 2021. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=SusHtIIZ9SA.

[44] J. Diaz del Rio Durán, "Revista General de Marina," noviembre 2021. [Online]. Available: https://armada.defensa.gob.es/archivo/rgm/2021/11/RGMNoviembre2021cap07.pdf.

[45] D. Vázquez, "Business Insider," agosto 2021. [Online]. Available: https://www.businessinsider.es/pentagono-desarrolla-ia-anticipar-problemas-909385.

[46] B. TINGLEY, "TheDrive," 30 julio 2021. [Online]. Available: https://www.thedrive.com/the-war-zone/41771/the-pentagon-is-experimenting-with-using-artificial-intelligence-to-see-days-in-advance.

[47] "Govtribe," febrero 2019. [Online]. Available: https://govtribe.com/opportunity/federal-contract-opportunity/industry-day-for-the-advanced-targeting-and-lethality-automated-system-atlas-program-w909my19rc004.

[48] N. Strout, "C4isrnet," octubre 2020. [Online]. Available: https://www.c4isrnet.com/artificial-intelligence/2020/10/29/how-the-army-plans-to-revolutionize-tanks-with-artificial-intelligence/.

[49] M. Thies, J. Norman and R. Wiam, "IEEEXplore," julio 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9486411.

[50] K. Hassan and R. Danda B, "IEEEXplore," enero 2022. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9659886.

[51] A. Shirin, H. Christophe, E.-R. N. Nathan and R. Nadège, "IEEEXplore: Machine-learning-based spectrum sensing enhancement for software-defined radio applications," septiembre 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9527294.

[52] F. Morgan, M. Kent, N. Adinda, T. Oliver, A. Stephen, B. Peter A. and H. Roy, "IEEEXplore," julio 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9483759.

[53] S. I. Naili, Y. H. Ario and J. Wisnu, "IEEEXplore," septiembre 2019. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8844049.

[54] C. Peter, D. Emily, D. Cody, K. Brandon, L. David, L. Nathan, L. Edward and M. Devon, "IEEEXplore," diciembre 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9652909.

[55] H. Dongyuan, Y. Rennong, Z. Jialiang, Z. Ze, W. Jun and W. Ying, "IEEEXplore," febrero 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9358136.

[56] Q. Tianci, X. Gang, D. Xisong, L. Wei, T. Hao, Y. Jun, S. Zhen and W. Fei-Yue, "IEEEXplore," octubre 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9551574.

[57] F. KM and c. wooyeol, "IEEEXplore," marzo 2022. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9729826.

[58] Tanner, McWhorter; Marcin, Morys; Stacie, Severyn; Sean, Stevens; Louis, Chan; Chi-Hao, Cheng, "IEEEXplore," junio 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9468669.

[59] Shixun, You; Ming, Diao; Lipeng, Gao;, "IEEEXplore," marzo 2019. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/8668391.

[60] D. E. Jarvis, "IEEEXplore," septiembre 2020. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9185448.

[61] S. Guangqing, c. yushi and W. Yinsheng, "IEEEXplore," abril 2020. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9079547.

[62] S. Akpojoto, S. Kannan, k. heidi, V. Petri and M. S. Elmusrati, "IEEEXplore," noviembre 2022. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9937069.

[63] H. L. Gyeong and J. Jeil, "Hindawi," enero 2020. [Online]. Available: https://www.hindawi.com/journals/scn/2020/2151570/.

[64] H. O. Amir, G. Elisa, G. Selenia and M. Marco, "A Survey on the Applications of Convolutional Neural Networks for Synthetic Aperture Radar: Recent Advances," diciembre 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9656541.

[65] K. Joseph, D. William, W. William and B. James, "Multifunction Maritime Radar and RF Systems—Technology Challenges and Areas of Development," diciembre 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9656619.

[66] R. S M Danish, A. Shahzor, K. Khurram, H. Azhar and M. Ammar, "Deep Learning Approach for Fixed and Rotary-Wing Target Detection and Classification in Radars," enero 2022. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9669015.

[67] M. Lin, Z. Yi, L. Víctor, L. Shuangzhe and M. Tiefeng, "A new clustering algorithm based on a radar scanning strategy with applications to machine learning data," abril 2022. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417421014706.

[68] J. Hu, W. Zhiyong, L. Yuzhi, L. Huiyong and W. Jie, "Designing Unimodular Waveform(s) for MIMO Radar by Deep Learning Method," noviembre 2020. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9257002.

[69] Y. Faruk, "IEEEXplore," diciembre 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9616316.

[70] T. S., Teixeira-Dias and aM.PaulinobA.Hamiltonc, "Predictions on multi-class terminal ballistics datasets using conditional Generative Adversarial Networks," octubre 2022. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0893608022002994.

[71] L. Antonios, P. Konstantinos, N. Hector E, T. Andreas, C. Keith and Z. Athanassios, "Using Machine Learning Algorithms for Accurate Received Optical Power Prediction of an FSO Link over a Maritime Environment," junio 2021. [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2304-6732/8/6/212.

[72] B. A. Sana and B. L. Asma, "UAV Communications with Machine Learning: Challenges, Applications and Open Issues," agosto 2021. [Online]. Available: https://link.springer.com/article/10.1007/s13369-021-05932-w.

[73] K. Nida, R. Kılıç and A. O. Emin, "Comparison of spectrogram, persistence spectrum and percentile spectrum based image representation performances in drone detection and classification using novel HMFFNet: Hybrid Model with Feature Fusion Network," noviembre 2022. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417422009575.

[74] O. Piotr F., B. Christoph and L. Martin, "Decision-Making for Automated Vehicles Using a Hierarchical Behavior-Based Arbitration Scheme," noviembre 2020. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9304723.

[75] T. B. Muhammad, G. K. Muhammad, A. Masood and J. F. Muhammad, "Weapon Detection in Real-Time CCTV Videos Using Deep Learning," febrero 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9353483.

[76] I. David W., K. Keenan X. and M. Linda J, "Machine Learning Applied to the Underwater Radar-Encoded Laser System," abril 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9389092.

[77] Y. Xin, H. Hongtao, L. Jing, L. Chang, L. Zhao and C. Xun, "DSG-Fusion: Infrared and visible image fusion via generative adversarial networks and guided filter," agosto 2022. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417422003426.

[78] Nikita, Pawar; Bhavana, Tiple;, "IEEEXplore," julio 2019. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9002411.

[79] O. A. Simeón, I. N. Cosmas, L. Jae-Min and K. Dong-Seong, "IEEEXplore," diciembre 2020. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9289286.

[80] P. Marina, R. Luca, F. Andrea, M. Adriano, F. Emanuele and L. Jelena, "Machine Learning approach for Predictive Maintenance in Industry 4.0," agosto 2018. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/8449150.

[81] C. C. A. S. Sande, "Ponencia Operaciones en el ciberespacio," enero 2020. [Online]. Available: https://www.ccn-cert.cni.es/pdf/documentos-publicos/xiii-jornadas-stic-ccn-cert/ponencias/4390-s16-11-02-planeamiento-operaciones-en-el-ciberespacio/file.html.

[82] Z. YuLong, D. ZiJie, Z. LongFei, W. ZhengYi, C. Li and Z. YuZhen, "IEEEXplore," abril 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9384519.

[83] C. Á. G. d. Ágreda, "Ministerio de Defensa," julio 2020. [Online]. Available: https://emad.defensa.gob.es/Galerias/CCDC/files/USOS_MILITARES_DE_LA_INTELIGENCIA_ARTIFICIALx_LA_AUTOMATIZACION_Y_LA_ROBOTICA_xIAAxRx.-_VV.AA.pdf.

[84] C. B. Benson, "Army University Pressl," junio 2012. [Online]. Available: https://www.armyupress.army.mil/Portals/7/military-review/Archives/Spanish/MilitaryReview_20120630_art005SPA.pdf.

[85] J. Muñoz-Delgado Díaz del Río, "IEEE," enero 2015. [Online]. Available: https://www.ieee.es/Galerias/fichero/OtrasPublicaciones/Nacional/2015/ArmadaEspanola_COPNAV.pdf.

[86] S. Purabi, S. Kandarpa Kumar and M. Nikos E., "IEEEXplore," diciembre 2020. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9292960.

[87] W. Andrea, G. Roland and B. Tobias, "A Survey of Artificial Intelligence Approaches for Target Surveillance With Radar Sensors," julio 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9475914.

[88] W. Jian, L. Yongxin and S. Houbing, "Counter-Unmanned Aircraft System(s) (C-UAS): State of the Art, Challenges, and Future Trends," marzo 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9374654.

[89] L. Christos, T. Ageliki, G. Konstantinos, M. Ioannis, I. Sotiris and S. Iosif, "IEEEXplore," noviembre 2022. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9940297.

[90] C. Mengqi, Q. Rong and F. Weiguo, "Case-based reasoning system for fault diagnosis of aero-engines," septiembre 2022. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417422007047.

[91] W. A. Raja, S. Khaled, J. Raja, H. Haya R., Y. Ibrar and O. Mohammed, "The Role of Blockchain Technology in Aviation Industry," marzo 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9374036.

[92] Farhan, Ahmed; Pratik, Vaishnavi; Kevin, Eykholt; Amir, Rahmati;, "IEEEXplore," julio 2022. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9833895.

[93] P. Scharre, ARMY OF NONE, Autonomous Weapons andthe Future of War, New York: W. W. Norton & Company, 2018.

[94] "Indra Company," [Online]. Available: https://www.indracompany.com/sites/default/files/rigel_es_and_ea_systems_0.pdf.

[95] G. José Javier, L. Antonio and C. Ramón Alberto, "Researchgate," abril 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/360162218_Military_Applications_of_Machine_Learning_A_Bibliometric_Perspective.

[96] M. W.C., "IEEEXplore," noviembre 1968. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/1687275.

[97] Shan, Li; Yuning, Wang; Chao, Wu; Zhaoyu, Chen;, "IEEEXplore," abril 2019. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/8691248.

[98] S. Peter, L. Linus, N. Mattias and S. Johan, "Researchgate," mayo 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/326774966_Possibilities_and_Challenges_for_Artificial_Intelligence_in_Military_Applications.

[99] J. Maestre Vidal, "Researchgate," abril 2019. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/335209814_Desafios_de_la_aplicacion_de_tecnicas_de_aprendizaje_automatico_soporte_a_la_fijacion_de_objetivos.

[100] E. R. García, "elespanol.com," 04 septiembre 2017. [Online]. Available: https://www.elespanol.com/omicrono/tecnologia/20170904/putin-domine-inteligencia-artificial-dominara-mundo/244226579_0.html.

[101] R. Marla and M. Mark, "Sparkcognition," junio 2017. [Online]. Available: https://www.sparkcognition.com/petya-ransomware-caught-by-sparkcognitions-deeparmor/.

[102] H. Asmaa, G. Teddy Surya, H. Mohamed Hadi, H. Murad and K. Mira, "IEEEXplore," febrero 2022. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9712274.

[103] S. Aisha, T. H. Ibrahim Abaker, Y. Ibrar and M. Mohsen, "Researchgate," abril 2016. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/301084434_A_Survey_of_Big_Data_Management_Taxonomy_and_State-of-the-Art.

[104] W. Hanchao, T. Hongyao, H. Jianye, H. Xiaotian, F. Yue and M. Yi, "IEEEXplore," enero 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9313387.

[105] D. Joao P. A., M. Marcos R. O. A., C. Andre N., G. Diego and Y. Takashi, "IEEEXplore," agosto 2022. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9853232.

[106] S. Weijian, W. Chenxia and D. Zhian, "Deep multilayer network for automatic targeting system of gun turret," julio 2021. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/9490254.