



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio del sistema de defensa de punto Sentinel RFG 25 en
buques de la Armada*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Manuel Ollero Medina

DIRECTORES: María Álvarez Hernández
Ramón Touza Gil

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio del sistema de defensa de punto Sentinel RFG 25 en
buques de la Armada*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_deVigo

RESUMEN

En la situación geoestratégica actual, el avance de las tecnologías militares ha adquirido una importancia trascendental en el mundo. La inversión en seguridad y defensa ha experimentado un crecimiento anual sostenido en el país, lo que subraya la necesidad de proporcionar a las unidades militares los sistemas de armas más avanzados disponibles. La presencia de los buques de la Armada en teatros de operaciones donde las amenazas se han vuelto cada vez más sofisticadas y dinámicas justifica más aún la necesidad de ser equipados con sistemas de armas de última tecnología.

En este contexto, el presente trabajo se centra en el análisis de un sistema de defensa antimisil desarrollado por la empresa española *Escribano M&E* que evalúa su potencial para ser instalado en los buques de la Armada, proporcionando así una capa adicional de protección contra las amenazas de misiles. El estudio implica la necesidad de transformar el sistema en un modelo, el cual ha sido generado con parámetros que se aproximan a los teóricos de funcionamiento proporcionados por el fabricante. Este enfoque permite evaluar cómo el sistema responde ante distintas condiciones operativas, proporcionando información crucial para entender su desempeño potencial para enfrentar amenazas.

PALABRAS CLAVE

Armada, defensa en profundidad, defensa de punto, efectividad, probabilidad.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera agradecer al CF Ramón Touza, por permitir la realización del presente trabajo. También por su labor ejemplar como docente en la Escuela Naval Militar, tratando a sus alumnos siempre con la exigencia que se espera en la formación de futuros Oficiales de la Armada.

Asimismo, agradecer a la Doctora María Álvarez, por su implicación como directora del trabajo, quien ha permitido que intuiciones iniciales sobre la resolución de distintos problemas planteados en el trabajo hayan sido transformadas en soluciones con gran rigor matemático.

Fuera de la realización del presente trabajo, agradezco a mis compañeros y amigos de promoción, los AA y AF: Delgado, Cornago, Garabito, Sánchez-Ferragut... entre muchos otros, quienes a lo largo de estos cinco años de formación han aliviado largas noches de trabajo y estudio con mucho sentido del humor.

Finalmente, quiero agradecer a mis padres Ernesto y Paz, y hermanos Felipe, Paz y María, que son un sostén fundamental en mi carrera personal y militar.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Motivación y justificación.	6
1.2 Antecedentes	8
1.2.1 Crecimiento de la amenaza. Ataques de Misil Antibuque en el siglo XX	8
1.2.3 Ataques de misil Antibuque actuales.....	10
1.3 Objetivos del TFG.....	12
1.4 Estructura de la memoria.	12
2 Estado del arte	14
2.1 Proyección de la Industria de Defensa.....	14
2.1.1 Armamento en el ámbito de Defensa.....	15
2.2 Misiles Antibuque	16
2.3 Situación actual de los sistemas de defensa de Punto.	17
2.3.1 Vulcan-Phalanx.....	18
2.3.2 Goalkeeper.....	18
2.3.3 Oerlikon Millennium Gun	19
2.4 Matemáticas como base de la solución. Investigación Militar Operativa.....	20
2.4.1 Uso del software MATLAB	21
3 Desarrollo del Estudio	23
3.1 Modelado. Parámetros utilizados en el análisis y simulación.....	23
3.2 Cálculos de probabilidades	25
3.2.1 Aproximación de los impactos a una distribución normal.	26
3.2.2 Probabilidad de impacto simple.....	29
3.2.3 Probabilidad de impacto acumulada: ‘al menos un impacto’	30
3.2.4 Probabilidad de impacto acumulada: ‘al menos 5 y 10 impactos’.	31
3.3 Simulación Montecarlo	33
4 Análisis de Resultados.....	35
4.1 Cálculo de probabilidades	35
4.1.1 Cálculo de Distribución Normal de los impactos.	35
4.1.2 Cálculo de probabilidad simple. RFG25	37
4.1.3 Cálculos probabilidad al menos un impacto.....	40

4.1.4 Cálculos probabilidad al menos 5 y 10 impactos.	42
4.2 Simulación mediante método Montecarlo	45
4.3 Dimensionamiento de cargadores	47
5 Conclusiones y líneas futuras	51
5.1 Líneas futuras	52
6 Bibliografía.....	53
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	56
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	58
Anexo III: Uso de la distribución normal.....	59
Anexo IV: Uso de la distribución Poisson	62
Anexo V: Munición perforante.	63
Anexo VI: Códigos de programación.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Defensa en profundidad en la Armada. Perfil de vuelo de un misil antibuque	7
Figura 1-2. CIWS Sentinel 25 RFG	8
Figura 1-3 'Secuelas del Elnath'	8
Figura 1-4 Misil <i>Exocet AM39</i> en un avión de caza <i>Super Etendar</i> de la Armada Argentina.....	9
Figura 1-5. Fragata Lanzamisiles <i>USS Stark</i> tras impacto de misil	10
Figura 1-6 Izquierda: Crucero <i>Moskva</i> tras el ataque de dos misiles <i>Neptune</i> , el 13 abril de 2022. Derecha: Lanzamiento misil <i>Neptune</i>	10
Figura 1-7 Incendio en buque ruso ‘ <i>Sergei Kotov</i> ’ a causa de un ataque con drones <i>Magura V5</i> ..	11
Figura 1-8 Riesgos en el estrecho de Bab el-Mandeb	12
Figura 2-1 Portada <i>EID 2023</i>	14
Figura 2-2 Portada <i>ETID</i> . Escudo <i>EMA</i>	15
Figura 2-3 Clasificación según velocidad	16
Figura 2-4 Lanzamiento misil antibuque de corto alcance.....	17
Figura 2-5 Ataque misil antibuque largo alcance, perfil <i>sea-skimming</i>	17
Figura 2-6 <i>Vulcan-Phalanx Block-IB</i> . Desarrollado por <i>Raytheon Technologies</i> y <i>General Dynamics</i>	18
Figura 2-7 <i>Goalkeeper</i> , desarrollado por <i>Thales Group</i>	19
Figura 2-8 <i>Oerlikon Millennium Gun</i>	19
Figura 2-9 Munición <i>AHEAD</i> . (Fuente: <i>Rheinmetall</i>)	20
Figura 2-10 Mejora de la precisión en bombardeos de la <i>RAF</i> en Segunda Guerra Mundial	21
Figura 2-11 Logotipo <i>Matlab</i>	22
Figura 3-1 Representación de Distancias de alcance.	24
Figura 3-2 Dispersión del <i>RFG25</i> , datos <i>General Dynamics</i>	24
Figura 3-3 Datos Blancos utilizados	25
Figura 3-4 Cono de dispersión de un cañón de artillería.....	26
Figura 3-5 Izquierda: Distribución de los impactos en deriva y elevación. Derecha: Representación 3D como función bivariable.....	27
Figura 3-6 Sistema <i>RFG</i> abriendo fuego a una distancia dada.	28
Figura 3-7 Calculo del ángulo de dispersión.....	28
Figura 3-8 Modelado del blanco	29
Figura 3-9 Representación de impacto en Blanco.....	30
Figura 3-10 Teorema de <i>Le Cam</i> aplicado la probabilidad de impacto	32
Figura 3-11 Modelado <i>USV Magura V5</i>	33
Figura 3-12 Representación simulación <i>Montecarlo</i> . Diagrama de flujo resumen.....	34
Figura 4-1 Calculo del ángulo de dispersión.....	36

Figura 4-2 Distribuciones Normales para un ángulo de dispersión del GAU-12/U.	37
Figura 4-3 Probabilidad simple de impacto en <i>Yakhont</i>	38
Figura 4-4 Probabilidad simple de impacto en <i>Moskit</i>	38
Figura 4-5 Probabilidad simple de impacto en <i>C-802</i>	39
Figura 4-6 Probabilidades acumuladas, ‘al menos un impacto’	41
Figura 4-7 Probabilidad al menos 5 impactos en misiles.	43
Figura 4-8 Probabilidad al menos 10 impactos en misiles	44
Figura 4-9 Probabilidad de producir 10 impactos en <i>USV 'Maruga 5V'</i>	45
Figura 4-10 Diagrama de flujo simulación utilizando método Montecarlo	46
Figura 4-11 Izquierda: Comparación probabilidad acumulada ‘al menos un impacto’ 4000 dpm, 2 mrad, misil C-802. Derecha: Error producido en aproximaciones	47
Figura 4-12 Derecha: Comparación aproximación de <i>Le cam</i> ‘al menos 10 impactos’ 4000 dpm, 2 mrad. Maruga V. Izquierda: Comparación aproximación de <i>Le cam</i> ‘al menos 5 impactos’ 4000 dpm, 1.5 mrad, misil C-802.	47
Figura 4-13 Posibles dimensiones de cargadores para RFG25	50
Figura A1-0-1 Precio unitario de misiles interceptores.....	57
Figura A1-0-2 Precio de munición MK244	57
Figura A3-0-1 Función de densidad.....	59
Figura A3-0-2 Campana de Gauss. Teorema Chevychev	60
Figura A3-0-3 Calculo probabilidad en la distribución normal estándar	61
Figura A4-0-1 Distribución de Poisson para distintos valores de λ	62
Figura A5-0-1 Esquema munición Perforante.....	63
Figura A5-0-2. De izquierda a derecha, MK244, MK149, M50.....	64
Figura A5-0-3. Comparación entre munición APDS y convencional.....	64
Figura A5-0-4. Comparación entre MK149 y MK244.....	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1 Consumo de munición. Misil C-802.....	48
Tabla 4-2 Consumo de munición. Misil Moskit.....	48
Tabla 4-3 Consumo de munición. Misil Yakhont	49
Tabla 4-4 Consumo de munición. 5 impactos misil C-802.....	49
Tabla 4-5 Consumo de munición. 5 impactos misil Moskit.....	49
Tabla 4-6 Consumo de munición. 5 impactos misil Yakhont	49

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación y justificación

España vuelve a ocupar un lugar en el mundo. Resurge en el escenario mundial con la presencia destacada de su Armada, como lo ha sido constantemente a lo largo de su historia. Los buques y las unidades de Infantería de Marina se encuentran una vez más desplegadas en escenarios de gran complejidad, donde defienden los intereses nacionales. Esta mayor implicación en el panorama estratégico internacional, así como su participación en organizaciones internacionales, sitúan a España frente a amenazas compartidas por el país y el mundo occidental.

La Estrategia de Seguridad Nacional (*ESN*) señala los conflictos armados y el terrorismo como principales amenazas o riesgos para el país. En lo que respecta a la Armada y el ámbito marítimo, para el cumplimiento de su misión, la defensa de sus buques continúa en algún caso siendo una tarea incompleta. La defensa antimisil de un buque (*Anti ship missile defense: ASMD*) ha tomado en las últimas décadas un papel muy importante para los estados mayores en el diseño de la flota. La situación internacional sitúa a los buques en zonas de operaciones donde los ataques frecuentes se han convertido en una realidad que debe abordarse con urgencia [1]. En la actualidad, alrededor de setenta países cuentan con misiles antibuque en sus arsenales. Además, la situación geopolítica inestable en Oriente Medio ha facilitado que grupos terroristas adquieran este tipo de armamento [2].

El problema militar por tratar está en asegurar la seguridad de las fuerzas navales. Realizar sistemas de defensa antimisil fiables, continúa llevando al límite a la tecnología y a la ingeniería. Los sistemas *ASMD* de un buque son complejos debido al poco tiempo de reacción del que se dispone y de la rápida evolución en la tecnología de los misiles. Tácticamente, lo óptimo sería destruir la plataforma lanzadora antes de que esta pueda actuar, sin embargo, por lo general esto queda lejos de la realidad, si lo que se pretende es mantener el *statu quo*. Esto hace que nuestros buques lleven a cabo una defensa en profundidad ante los posibles ataques, que consiste en detectar el misil a la mayor distancia posible, poniéndole tantas barreras como sea factible (Figura 1-1), utilizando distintas técnicas de *hardkill*¹ y *softkill*² en sus distintas etapas de vuelo para neutralizarlo, destruirlo o seducirlo hacia un blanco ficticio.

La *ASMD* determina que existe una última barrera de defensa ante un ataque inminente. La única solución de fuego para destruir o neutralizar un misil en su última etapa de ataque está en manos de la artillería, especialmente en los sistemas de defensa de punto (*Close in Weapon System: CIWS*). Los *CIWS* son montajes de pequeño calibre con cadencias de fuego muy altas, que buscan el impacto y la

¹ Acción militar que implica la destrucción física directa de un objetivo enemigo mediante armas u otros medios.

² Acciones militares que incapacitan o engañan al enemigo sin destrucción física.

destrucción del misil. La Armada actualmente no cuenta con *CIWS* en ninguno de sus buques lo cual limita sus capacidades *ASMD*.

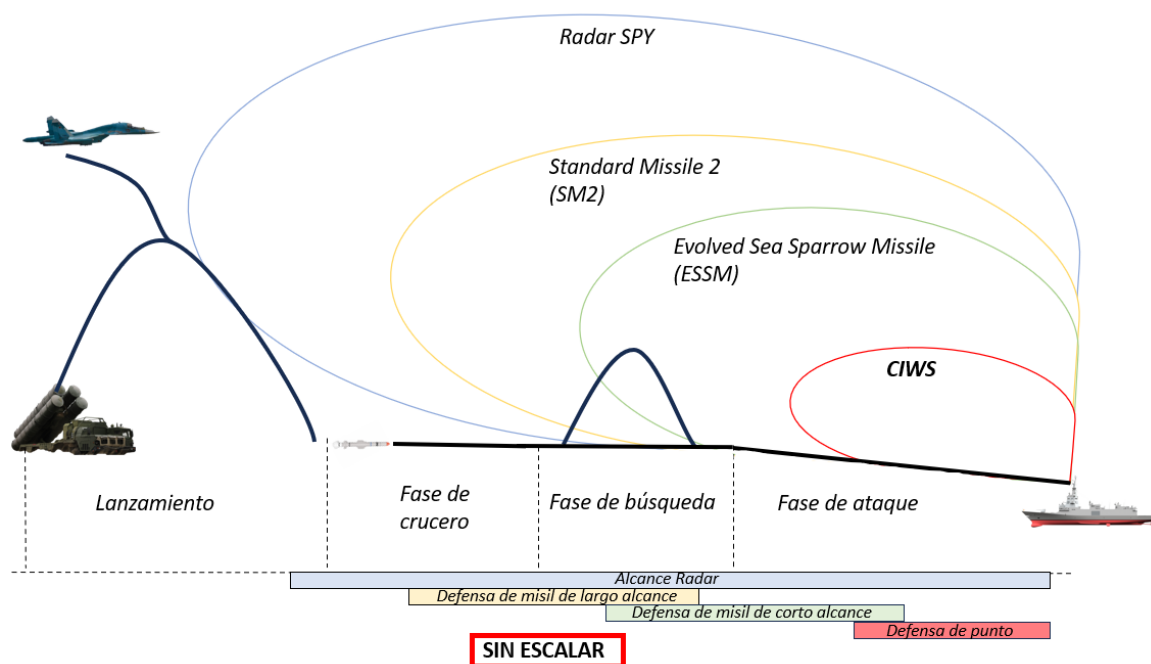


Figura 1-1 Defensa en profundidad en la Armada. Perfil de vuelo de un misil antibuque

Además de su misión *ASMD*, los *CIWS* aumentan las capacidades de enfrentamiento frente a amenazas asimétricas gracias a su volumen de fuego y a la incorporación de múltiples sensores independientes del sistema de combate. Aumentar estas capacidades también es un reto tecnológico para el país, que busca asegurar a las unidades en operaciones militares.

El pasado 2022 el Ministerio de Defensa acordó con la empresa española *Escribano M&E* el desarrollo de un *CIWS* nacional, al que han llamado (*Rapid Fire Gun 25: RFG 25*). (Figura 1-2) Este trabajo pretende estudiar el sistema como un modelo matemático cuantitativo. Realizar numerosas pruebas teóricas sobre el sistema, calcular las probabilidades de impacto del cañón en los distintos escenarios en los que se pueda encontrar y hallar la cantidad de munición necesaria para cada enfrentamiento con el fin de dimensionar el tamaño de los cargadores del sistema. También se buscará evaluar los beneficios que puede tener el sistema para las capacidades *ASMD* de la Armada (Figura 1-2).



Figura 1-2. CIWS Sentinel 25 RFG (Fuente: Escribano M&E)

1.2 Antecedentes

El primer misil fabricado en la historia fue obra de la potente industria alemana para la Luftwaffe durante la Segunda Guerra Mundial, los famosos misiles V1. Los misiles eran lanzados desde Francia y Holanda con un plan de vuelo preprogramado. Esto les daba la capacidad de atacar Londres sin necesidad de tenerlo bajo alcance visual. En el ámbito naval, Alemania fabricó unas bombas para atacar a los buques aliados llamadas *Henschel HS 293*. Las *Henschel*, eran autopropulsadas haciendo uso de un motor cohete y guiadas por radio control desde la plataforma lanzadora, considerándose por ello, misiles antibuque. Las bombas tuvieron éxito en el mediterráneo dañando gravemente o hundiendo a más de una decena de buques aliados durante la guerra [3].

1.2.1 Crecimiento de la amenaza. Ataques de Misil Antibuque en el siglo XX

Tras la Segunda Guerra Mundial la Unión soviética (URSS) y Estados Unidos (EE. UU.) elevaron la tecnología de los misiles y de los sistemas de defensa, hasta que en 1967 el Destructor israelí *INS Eilat* fue hundido por tres misiles *Styx* de origen soviético lanzados desde dos lanchas misileras egipcias de la clase *Komar* (Figura 1-3).

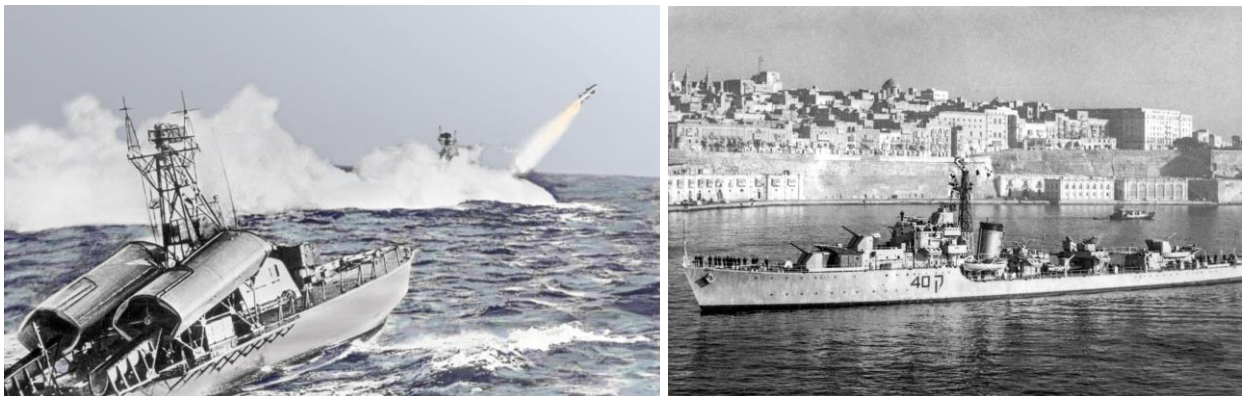


Figura 1-3 'Secuelas del Elnath' (Fuente: US Naval Institute photo archive)

El *Eilat* se encontraba de patrulla de combate, altamente adiestrado y bien equipado para la época. La dotación israelí, alertada de un posible ataque detectó los misiles a algo más de seis millas náuticas. Tuvo tiempo de poner rumbo *ASMD* y abrir fuego con su artillería antiaérea, sin embargo la defensa antiaérea del buque fue inefectiva ante un blanco tan rápido [4] y la evolución de la amenaza había dejado obsoletos los sistemas de defensa que portaba el buque. El incidente ocasionó una revolución en la táctica *ASMD* de la marina israelí. Tanto fue así, que en 1973 durante la guerra del *Yom Kippur*, la marina israelí volvió a ser atacada con misiles *Styx* lanzados desde lanchas egipcias y sirias, pero esta vez, los israelíes neutralizaron los más de 50 misiles lanzados, además de hundir nueve lanchas enemigas con los entonces nuevos misiles israelíes *Gabriel* [5].

En el año 1982 durante la guerra de las Malvinas, los misiles antibuque volvieron a tener gran protagonismo. La Royal Navy salió a la mar con la flota más grande desplegada desde la Segunda Guerra Mundial. Al inicio del conflicto, los pilotos argentinos atacaron a la flota inglesa con misiles *Exocet AM39* (Figura 1-4). Uno de ellos impactó en el destructor HMS *Sheffield*, causando un incendio de grandes proporciones, que terminó por hundir el buque.



Figura 1-4 Misil *Exocet AM39* en un avión de caza *Super Etendard* de la Armada Argentina (Fuente: Revista general de Marina)

Lo cierto es que el *Sheffield* era un buque diseñado para ofrecer defensa antiaérea a la fuerza como también lo era el *HMS Glasgow* quien detectó e informó al *Sheffield* del inminente ataque de misil. Los oficiales del *Sheffield* avistaron el misil por primera vez en visual, durante la fase de ataque, al mismo tiempo que su equipo de guerra electrónica detectaba el *lock-on* [6]. Sin embargo, no hubo defensa ni reacción *ASMD* ante el ataque. Más allá de la posible falta de adiestramiento o de disciplina que no hicieron posible una defensa a mayor profundidad, el buque tampoco contaba con sistemas de defensa de punto que pudieran reaccionar en esa última etapa de vuelo. A lo largo del conflicto se hundieron 6 buques británicos a causa de ataques aéreos en vuelo rasante con bombas convencionales o con misiles [7]. Tras la guerra, la Organización del Tratado del Atlántico Norte (*OTAN*) realizó un profundo estudio sobre sus técnicas y procedimientos *ASMD*, concluyendo en la importancia de su potenciación.

En esa misma década, la US Navy sufría en 1987 su primer ataque de misil contra la fragata *USS Stark*. Dos misiles de los ya mencionados *Exocet AM39* fueron lanzados desde aviones de caza iraquíes. Los aviones fueron detectados a 70 millas náuticas de la fragata [8], no obstante, una secuencia de errores en la reacción *ASMD* entre los que se encuentra el no tener su *CIWS* en funcionamiento hicieron que los misiles impactaran causando 37 bajas en la dotación (Figura 1-5).



Figura 1-5. Fragata Lanzamisiles *USS Stark* tras impacto de misil (Fuente: Museo nacional US Navy)

1.2.3 Ataques de misil Antibuque actuales

En los últimos años los ataques de misil han continuado con cierta frecuencia contra buques donde la tecnología y las capacidades tanto de detección (sensores) como de reacción (armamento y contramedidas) son altamente superiores. Los resultados en cambio no siempre han sido los esperados.

En 2006 la moderna corbeta israelí *INS Hanit* fue alcanzada por dos misiles antibuque C-802 de origen chino lanzados por el grupo terrorista Hezbollah [9]. El buque no tenía alistado su sistema de defensa *ASMD*, ya que la marina israelí tenía informes de inteligencia que negaban la capacidad de ataque con misil por parte del grupo terrorista.

El pasado 2022 tras la invasión rusa al estado de Ucrania, la guerra volvió a Europa tras más de 25 años de paz. Desde entonces el mundo mantiene los ojos puestos en este conflicto, que está sirviendo como referencia mundial para analizar capacidades militares actuales. El mar negro es una de las zonas de operaciones donde la marina rusa ataca posiciones ucranianas con misiles crucero, zona donde en abril de ese mismo año el buque insignia de la Flota del mar Negro, el crucero lanzamisiles *Movska*, fue hundido [10]. Aunque el gobierno ruso lo desmiente, Ucrania afirma que el buque ruso sufrió el impacto de dos misiles antibuque *Neptune*, misil ucraniano con características similares a los misiles vistos anteriormente (Figura 1-6).



Figura 1-6 Izquierda: Crucero *Moskva* tras el ataque de dos misiles *Neptune*, el 13 abril de 2022. Derecha: Lanzamiento misil *Neptune* (Fuente: Ministerio de Defensa Ruso, Instituto Español de Estudios Estratégicos)

Además de este ataque, el Ministerio de Defensa de Ucrania afirma haber hundido varios buques de guerra durante el conflicto mediante el uso de ataques de drones de superficie (*Unmanned Surface vehicle: USV*) (Figura 1-7). Los drones, atacan a gran velocidad los buques rusos, no siendo detectados

hasta distancias muy cercanas donde la reacción con las armas de pequeño calibre está demostrando no ser efectiva. [11] [12]



Figura 1-7 Incendio del buque ruso ‘Sergei Kotov’ a causa de un ataque con drones Magura V5 (fuente: Ministerio de Defensa Ucrainiano)

Otros incidentes, de especial interés para nuestro país y para la Armada por la zona en la que han ocurrido, son los ataques realizados por rebeldes Hutíes en el estrecho de Bab al-mandeb. La Armada tiene al menos un buque navegando permanentemente en la zona desde el inicio de la Operación Atalanta en 2008. Los rebeldes, apoyados por Irán, realizan ataques con misiles antibuque y drones contra buques civiles y militares (Figura 1-8). Estados Unidos y el Reino Unido mantienen una coalición compuesta por dos destructores americanos de la clase *Arleigh Burke* y un destructor británico *Type 45* por el peligro que estos ataques suponen para occidente. El pasado enero, un misil crucero lanzado por los hutíes en el Mar Rojo estuvo a menos de una milla de un destructor estadounidense antes de ser derribado. En el pasado, estos misiles han sido interceptados por destructores estadounidenses en la zona a una distancia de ocho millas o más [13], sin embargo, en marzo de este año un destructor americano, el USS Gravelly, tuvo que usar su *CIWS* por primera vez desde que Estados Unidos comenzó a interceptar los misiles Hutíes.

La Unión Europea también mantiene su presencia en el mar rojo apoyándose en la resolución 2722 del Consejo de Seguridad de Naciones Unidas de 10 de enero que condena los ataques hutíes y reconoce el derecho de los Estados miembros a defender sus buques frente ataques o para impedir su libertad de navegación [13]. La fuerza aeronaval de la UE protegerá los buques europeos que transiten por el Golfo de Adén y el mar Rojo. Para desarrollar estas capacidades, se estima que se requerirá un mínimo de tres buques (destructores o fragatas) equipados con sistemas de defensa avanzados contra drones y misiles, así como con recursos de inteligencia, reconocimiento y vigilancia aéreos (drones, aviones de patrulla y helicópteros) [14].



Figura 1-8 Riesgos en el estrecho de Bab el-Mandeb (Fuente: Instituto Español de Estudios Estratégicos)

1.3 Objetivos del TFG

Los sistemas de defensa de punto nunca han sido probados en situaciones de combate de alta intensidad por lo que no se tienen datos sobre su efectividad. Este trabajo trata de estudiar el sistema como modelo matemático para comprobar su efectividad teórica, planteando los siguientes objetivos:

- Realizar una modelación matemática del sistema de artillería. Encontrar una función de distribución que modele el comportamiento de los disparos del *RFG25*, sobre la que se puedan hacer estudios estadísticos con el fin de realizar cálculos de probabilidad.
- Realizar un estudio del consumo de munición del sistema en escenarios de alta intensidad con el fin de estimar la munición necesaria que deba portar el sistema en el tambor de municionamiento.
- Estudiar la relación entre los parámetros del sistema y la probabilidad de derribo en enfrentamientos. Encontrar el funcionamiento óptimo del sistema artillero, teniendo en cuenta las posibles limitaciones tecnológicas del montaje.

1.4 Estructura de la memoria

El presente trabajo comienza con una explicación detallada sobre el problema que existe para un buque de guerra cuando trata de enfrentar misiles en su última etapa de vuelo. El resto de la memoria se estructura en cuatro grandes bloques que se exponen a continuación en modo resumen.

1. **Estado del Arte:** en este capítulo se presentan los conceptos relevantes sobre los sistemas de defensa de punto, así como el estado actual del armamento y la industria de defensa nacional. Esta sección proporciona el contexto necesario para comprender el propósito del trabajo académico desarrollado posteriormente
2. **Desarrollo del estudio:** en esta sección se detalla el proceso de selección de parámetros durante la modelación del sistema. Se exponen los teoremas y razonamientos seguidos que buscan proporcionar una base sólida para la presentación y análisis de resultados en el siguiente capítulo.
3. **Análisis de Resultados:** se presentan los resultados obtenidos del estudio, con un análisis detallado de cómo los diferentes parámetros afectan la probabilidad de impacto. Se plantean

además posibles soluciones para optimizar la dimensión de los cargadores involucrados en *Sentinel RFG 25*.

- 4. Conclusiones y Líneas Futuras:** en la última sección se exponen las conclusiones derivadas del trabajo realizado, seguidas de sugerencias para líneas futuras de investigación que puedan profundizar en el tema abordado.

Con esta estructura, se busca mejorar la claridad y coherencia del trabajo, facilitando la comprensión y el seguimiento de la información presentada. Las figuras presentadas en este trabajo son de autoría propia, salvo en las que se referencia la fuente.

2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se trata de aclarar los conceptos relativos a los sistemas de defensa de punto, así como exponer los sistemas utilizados actualmente. De igual manera se analizarán las líneas I+D+i en el ámbito de defensa y la proyección de su industria como base del desarrollo de las capacidades de nuestras fuerzas armadas. Por último, se hace referencia a la investigación militar operativa y su importancia en los programas de armamento.

2.1 Proyección de la Industria de Defensa

Los cambios en el escenario global han recordado la importancia de la seguridad y defensa para el desarrollo y bienestar de la sociedad. El pasado 2022 se celebraba en Madrid la cumbre de la OTAN por necesidad de la organización para la toma de decisiones estratégicas frente a la inestable situación geopolítica. La OTAN trató la carencia de inversión en defensa, tecnología e innovación, estableciendo como objetivo una inversión del 2% de PIB en el ámbito de defensa por parte de todos los países miembros antes de 2029 [15] [16].

El pasado 2023 por Resolución 300/09365/23, de 25 de mayo, la Secretaria de Estado de Defensa promulgó una nueva Estrategia Industrial de Defensa (*EID*) (Figura 2-1), donde España cuenta con un 26% más de inversión que el año anterior. Las políticas tomadas por parte del gobierno buscan ofrecer oportunidades a la industria nacional en el extranjero. Actualmente, el país participa en el Plan de Acción Europeo de la Defensa (EDAP), La Cooperación Estructurada Permanente en Materia de Defensa, PESCO (por sus siglas en inglés) y en la OTAN [15].



Figura 2-1 Portada *EID* 2023 (Fuente: Ministerio de Defensa)

Esta EID tiene un horizonte de ocho años hasta 2030. Sus principios básicos son: contribuir a la defensa europea, consolidar una Base Tecnológica e Industrial de la Defensa (*BTID*) y aumentar la autonomía estratégica del país. Para ello, busca potenciar las capacidades críticas industriales estratégicas de defensa priorizando el desarrollo nacional para aquellas que se consideren esenciales y, en caso de que las capacidades sean relevantes, pero en menor grado, buscar la solución en el mercado europeo. Los sistemas de defensa de misil son considerados una capacidad esencial para la defensa, por lo tanto, potenciar el estado de la industria de sistemas de armas es necesario para conseguir el desarrollo nacional de estos.

2.1.1 Armamento en el ámbito de Defensa

Las Fuerzas Armadas (*FAS*) viven una constante evolución y desarrollo para estar a la altura de las exigentes capacidades militares que la defensa del país exige. El Ministerio de Defensa, promotor de dicho desarrollo, se encarga de establecer las políticas I+D+i para el cumplimiento de los planes de defensa nacional.

La *ETID* (Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa) (Figura 2-2), es el documento que establece las líneas I+D+i que sirven como guía para la adquisición dichas capacidades. El documento es elaborado por la Subdirección General de Planeamiento, Tecnología e Innovación (*SDGPLATIN*) y actualizado cada cinco años en base a los cambios de situación que viven las *FAS*. Su última modificación, promulgada en 2020 establece numerosos retos tecnológicos de interés para las fuerzas armadas que divide en distintas áreas según sus características. Las armas y municiones son la primera área de I+D+i que expone la estrategia. Componen un área de especial interés ya que son un asunto horizontal a muchos de los sistemas emergentes de los tres ejércitos [17].



Figura 2-2 Portada *ETID*. Escudo *EMA* (Fuente: Ministerio de Defensa)

Cada vez son más los sistemas de armas desarrollados por la industria nacional. En el ámbito naval las empresas del sector de defensa trabajan en distintos proyectos relacionados con la defensa de los buques.

Escribano M&E realiza sistemas navales como los *RWS* (*Remote Weapon System*), *Sentinel 2.0* o *Sentinel 30* y gracias a la colaboración entre el Estado Mayor de la Armada y *PLATIN* también se encuentra desarrollando el *Sentinel RFG25* utilizando material cedido por la Armada.

2.2 Misiles Antibuque

Los misiles antibuque son todos aquellos proyectiles autopropulsados y guiados que tienen como objetivo de destrucción a un buque. Hay multitud de maneras de clasificarlos, sin embargo, las principales son las siguientes:

1. Según la plataforma lanzadora los misiles antibuque pueden ser clasificados de tres maneras:
 - Misil Aire-Superficie (*Air to Surface Missile: ASM*)
 - Misil Superficie-Superficie (*Surface to Surface Missile: SSM*)
 - Misil Submarino-Superficie (*Underwater to Surface Missile: USM*)

Únicamente se diferencian en la fase inicial de vuelo donde pueden utilizar diferentes sistemas de propulsión, para conseguir la aceleración necesaria. Tras ello, llegan a un punto en el perfil de vuelo donde los tres misiles siguen el mismo programa de vuelo hasta el blanco. Muchos de los misiles actuales cuentan con las tres versiones. El misil *Harpoon* que utiliza la Armada, cuenta con versiones (RGM-84, AGM-84, UGM-84) para ataque a buques desde aire, superficie y submarinos.

2. Según el sistema de guiado de los misiles puede clasificarse en distintos grupos: guiados por radiofrecuencia (RF: activos, semiactivos y pasivos), por infrarrojos (IR), por electroóptica (EO) o por una guía dual, combinación entre RF-IR o RF-EO.
3. Para clasificar a los misiles según su velocidad se utilizan los números Mach, que toman como referencia la velocidad del sonido del fluido en el que se mueva la aeronave o el misil (Figura 2-3).

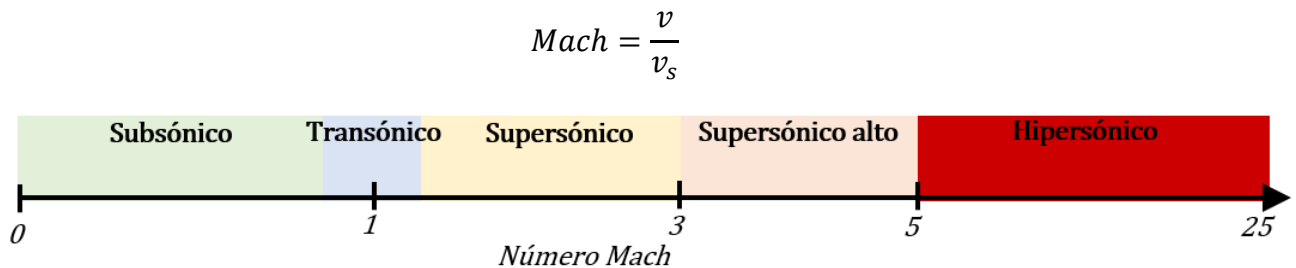


Figura 2-3 Clasificación según velocidad (Fuente: NASA) (Realización propia)

La gran mayoría de los misiles antibuque mencionados hasta ahora en este trabajo son transónicos, sin embargo, cada vez es más común ver misiles supersónicos en los arsenales de las potencias avanzadas, así como el desarrollo de misiles hipersónicos.

En general los misiles antibuque tienen una amplia gama de alcances siendo difícil diferenciarlos entre largo, medio y corto. Un ejemplo de misil antibuque de corto alcance es el *Hellfire* que utilizan los helicópteros de la 10ª Escuadrilla de Aeronaves de la Armada para atacar blancos dentro del horizonte (Figura 2-4). La limitación de alcance se debe a su sistema de guiado semiactivo donde la plataforma lanzadora necesita la adquisición con alguno de sus sensores antes del lanzamiento y el apuntamiento continuo del blanco durante el vuelo del misil. La utilización de este tipo de misiles implica aproximarse a un buque con capacidades antiaéreas para lanzar a corta distancia, exponiendo a la plataforma lanzadora, dejándola en gran desventaja frente a los buques.

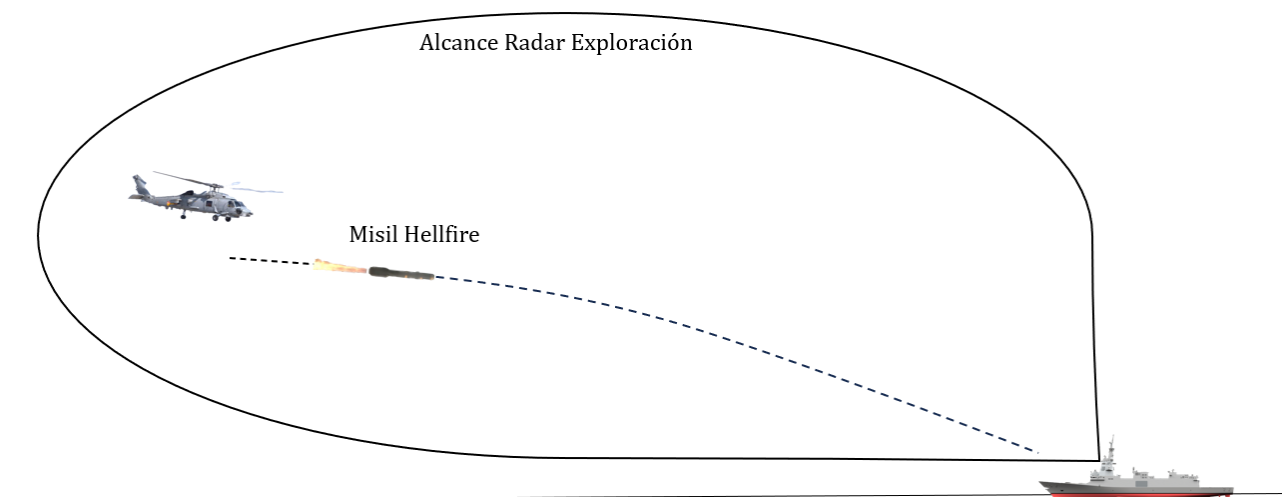


Figura 2-4 Lanzamiento misil antibuque de corto alcance

Sin embargo, la mayoría de los misiles antibuque son lanzados más allá del horizonte del blanco, donde la plataforma lanzadora no puede ser detectada, aprovechando su natural ventaja frente a la artillería. Estos misiles por lo general siguen un perfil de vuelo a cotas muy bajas aprovechando la curvatura terrestre para no exponerse a los avanzados radares de exploración aérea actuales. Son conocidos como misiles rozaolas o *sea-skimming* entre los países OTAN, y para las unidades navales suponen un riesgo elevado como ya se demostró en la Guerra de las Malvinas, (véase el 1.2.1.). Esto es debido al pequeño tiempo de reacción del que se dispone si el misil consigue no ser neutralizado durante las primeras capas de defensa. La detección se producirá dentro del horizonte donde solo misiles de corto alcance y segundos más tarde la artillería y CIWS pueden hacerle frente (dejando de lado las contramedidas electrónicas) (Figura 2-5).

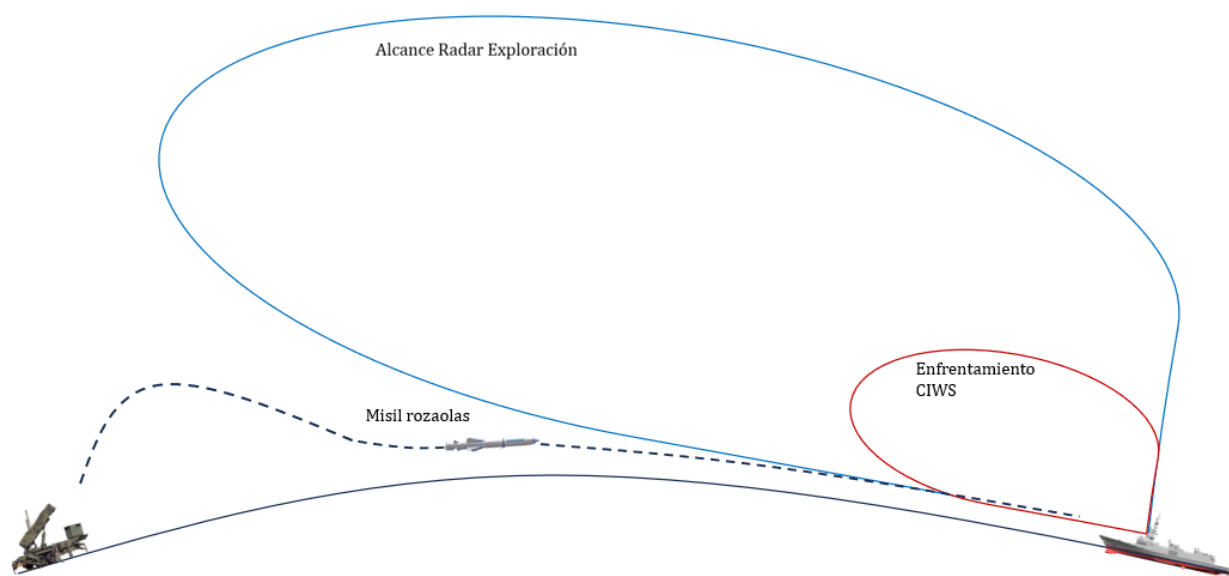


Figura 2-5 Ataque misil antibuque largo alcance, perfil *sea-skimming*

2.3 Situación actual de los sistemas de defensa de Punto.

Los sistemas de defensa de punto tienen su origen en Estados Unidos. La idea surgió en un programa de defensa contra misiles antibuque, en 1968, como respuesta al ya mencionado hundimiento del

destructor israelí *INS Eilat*. Un año más tarde, la empresa americana *General Dynamics* desarrolló el primer *CIWS*, conocido como *Vulcan-Phalanx*. Desde entonces países como Rusia, China, Alemania Holanda, España han realizado distintos *CIWS* con distintas capacidades. Pasaremos a resumir algunos de los sistemas de defensa existentes en la actualidad.

2.3.1 *Vulcan-Phalanx*

El *Vulcan-Phalanx* surge en Estados Unidos en el año 1969. La empresa *General Dynamics* se basó en un sistema de defensa aérea de la *US Army*, llamado *Vulcan Air Defense System (VADS)*, para su diseño. El sistema inicial estaba compuesto por un cañón rotatorio *Gatling* de 5 tubos de 20mm, con una cadencia de 3000 dpm (disparos por minuto). La empresa *Raytheon* se unió a la producción del sistema potenciando sus capacidades, realizando hasta 7 modificaciones para llegar a su versión más moderna, la versión *Block IB* (Figura 2-6). En esta versión se aumentó la longitud de sus cañones, así como la calidad del material para disminuir la dispersión, tiene una cadencia teórica de hasta 4500 dpm, dispone de una cámara *FLIR* y un equipo electroóptico con un sistema de seguimiento y adquisición de blancos, diseñado para la defensa ante amenazas asimétricas de superficies y aéreas e incorpora mejoras en el radar de designación que permiten el seguimiento de blancos durante maniobras evasivas.



Figura 2-6 *Vulcan-Phalanx Block-IB*. Desarrollado por *Raytheon Technologies* y *General Dynamics*. (Fuente: *Raytheon Technologies*)

Raytheon se encuentra desarrollando mejoras al sistema que ya llevan instalados todos los buques de combate de superficie de la *US Navy*, y exportado a 24 países aliados [18].

2.3.2 *Goalkeeper*

El *Goalkeeper* es un sistema de defensa de punto producido en Holanda desde el año 1980 por la empresa *Signaal*, hoy *Thales Nederland*, empresa subsidiaria del grupo francés *Thales* (Figura 2-7). El montaje consta de siete tubos de 30mm. Las capacidades son similares a las del *Phalanx*: cadencia de 4200 dpm, un radar de exploración en la banda *I* y otro de designación y seguimiento de blancos en la banda *K*. Utiliza munición *MPDS (Missile piercing discarding sabot)* diseñada para perforar misiles y detonar su carga explosiva. Según afirma el fabricante el sistema fue testado bajo ataque de tres tipos de misil durante las pruebas de mar conjuntas con la *US Navy*. Los tres misiles fueron neutralizados por el *Goalkeeper*. [19]

THALES



Figura 2-7 Goalkeeper, desarrollado por Thales Group. (Fuente: Thales)

En el año 2012 la empresa comenzó un programa de modernización que pretende alargar la vida del sistema hasta 2025. Se incluyó un sensor electroóptico para mejorar el seguimiento de blancos, especialmente el seguimiento a amenazas asimétricas tanto aéreas como de superficie. El sensor dispone de algoritmos de decisión que apoyan la solución de fuego en base a las prioridades que el operador previamente determine. El Goalkeeper es utilizado por 9 marinas en todo el mundo habiendo sido instalados más de 60 sistemas [19].

2.3.3 Oerlikon Millennium Gun

La empresa alemana *Rheinmetall AG* describe el *Millennium* como un sistema de defensa Multirole. El sistema fue diseñado para la defender a los buques ante ataques múltiples de amenazas asimétricas de superficie de alta velocidad. Incorpora una versión de defensa aérea en la que el fabricante asegura que hace frente a misiles antibuque, aviones, helicópteros de ataques y vehículos aéreos no tripulados (UAVs) [20] (Figura 2-8).



Figura 2-8 Oerlikon Millennium Gun (Fuente: Rheinmetall)

Rheinmetall ha optado para este sistema una estrategia distinta al resto de los sistemas defensa de punto. A diferencia de otros *CIWS*, el *Millennium* utiliza una cadencia de fuego de 1000 dpm, lo cual es bastante más baja que en el resto de sistemas de defensa de punto. No busca aumentar la probabilidad impacto mediante la cantidad de proyectiles lanzados, sino mediante la fragmentación de estos cerca del blanco y el alcance del sistema. En particular, utiliza munición *AHEAD* (*Advanced Hit Efficiency and Destruction*). El principio de funcionamiento de la *AHEAD*, se basa en la fragmentación del proyectil en 152 subproyectiles de tungsteno para aumentar su zona de impactos y a su vez la probabilidad de destrucción.

La fragmentación del proyectil es poco intuitiva ya que no utiliza espoletas *VT* (*de radio frecuencia*). Porta una espoleta programable de tiempos, aunque el tiempo de vuelo no se selecciona de manera

mecánica si no mediante transmisión de datos entre la boca del cañón, (que se encuentra conectada a un ordenador que recibe los datos cinemáticos del blanco) y la espoleta [21] (Figura 2-9).

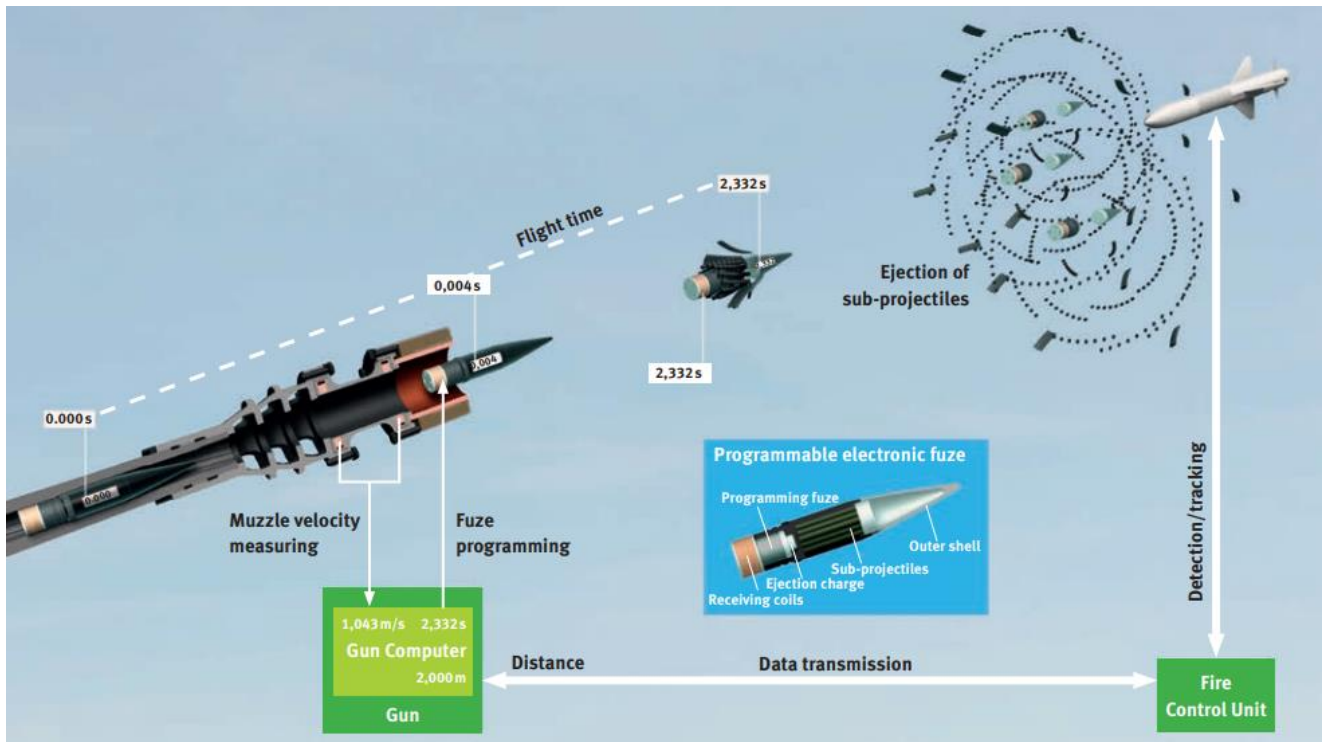
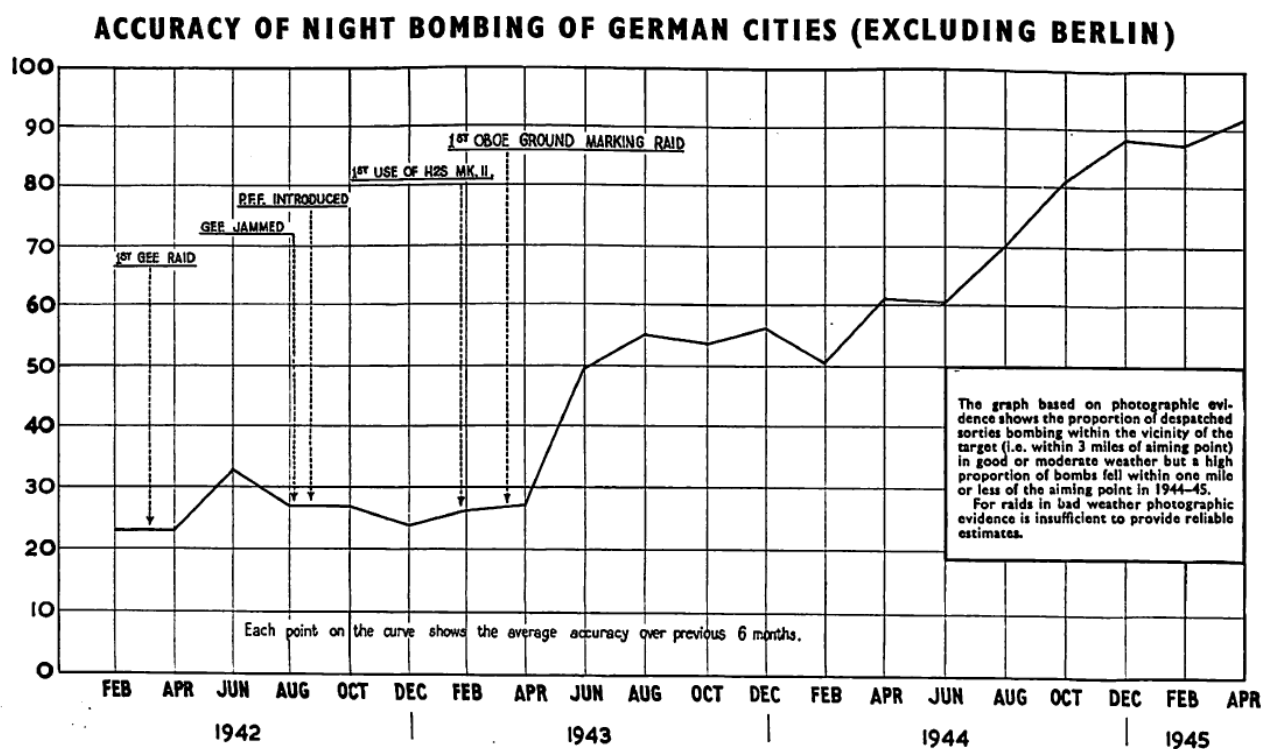


Figura 2-9 Munición AHEAD. (Fuente: Rheinmetall)

2.4 Matemáticas como base de la solución. Investigación Militar Operativa.

La *Royal Air Force (RAF)* define la investigación militar operativa como 'el pensamiento numérico sobre operaciones, con el objetivo de formular conclusiones que, aplicadas a operaciones, puedan dar una solución rentable ante un gasto de esfuerzo dado' [22].

Para hallar el origen del apoyo científico a la estrategia militar, sería esencial retroceder hasta el siglo III a.C. y sumergirse en el pensamiento de Arquímedes. Este enfoque intelectual como apoyo a la estrategia militar ha trascendido a lo largo de generaciones de militares, dejando una huella indeleble en la forma en que se planifican y ejecutan las operaciones militares hasta nuestros días. La investigación operativa bajo el análisis de grandes bases de datos y experimentos tiene su origen en Inglaterra durante la segunda la Segunda Guerra Mundial. La necesidad de optimización de recursos y la capacidad para el análisis, llevaron a la *RAF* a crear la Bawdsey Research Station (BRS) que estuvo al servicio del Ministerio de Defensa británico como primera base de investigación operativa regulada desde 1936. Tuvo gran éxito en ámbitos como la defensa de convoyes, defensa aérea, detección de submarinos, etc. Su objetivo fue la maximización de beneficios y minimización de esfuerzos de los aliados durante los años de guerra, lo cual era necesario en un conflicto de tanta duración. Ejemplos del éxito de sus investigaciones en el ámbito de artillería son, entre muchos, desarrollar un sistema que permitió reducir el número medio de disparos para derribar un avión enemigo, de 20.000 disparos a 4.000 disparos en los dos primeros años de guerra [23] o incrementar en un 60% la tasa de acierto de los bombardeos en Alemania (Figura 2-10).



**Figura 2-10 Mejora de la precisión en bombardeos de la RAF durante la segunda guerra mundial
(Air Ministry of Defence, Air Publication 3368)**

Hasta el día de hoy la optimización de recursos demuestra ser algo imprescindible en conflictos. Esto se puede observar en situaciones actuales como la guerra de Ucrania, donde la optimización de material está jugando un papel decisivo en la supervivencia de las fuerzas ucranianas. En particular, es de especial relevancia para los analistas de estrategia militar la gran cantidad de munición que demanda Ucrania para mantener sus posiciones y frenar el avance de tropas rusas [24] que asciende hasta 400.000 piezas de artillería mensuales, una cantidad que hasta ahora no ha sido capaz de producir ningún país en el mundo [25]. Sin munición, Ucrania carece de capacidad para lograr objetivos tácticos y estratégicos.

Extrapolando el problema de una posible falta de munición a los buques de la Armada, desembocamos en una situación que posiblemente sea aún más exigente, ya que la logística y el aprovisionamiento en la mar es más complejo que en las vías terrestres. Los buques son aprovisionados antes de salir a la mar en función de las tareas que vayan a desempeñar y la amenaza que se espere. Disponer de una reserva adecuada de proyectiles garantiza que los sistemas puedan operar de manera sostenida sin agotar rápidamente la munición.

En los CIWS, la dimensión de sus cargadores es fundamental ya que demanda altísimas cantidades de munición en cada enfrentamiento. En el caso del RFG 25, consume 70 disparos por segundo a máximo ritmo de fuego. Para asegurar un suministro continuo de proyectiles durante los enfrentamientos, es crucial que los cargadores contengan gran cantidad de proyectiles listos para ser desplegados al sistema de alimentación a alta velocidad. Sin embargo, determinar la cantidad exacta de proyectiles vendrá determinada por los proyectiles necesarios para poder afirmar que el sistema es capaz de neutralizar en un determinado número de enfrentamientos, las amenazas.

2.4.1 Uso del software MATLAB

Para llevar a cabo un estudio sobre la eficiencia del sistema desde una perspectiva matemática, es importante analizar la mayor cantidad de parámetros que influyan en su funcionamiento. Por lo tanto, resulta imprescindible emplear un software de lenguaje de programación que permita evaluar la mayor cantidad de operaciones, cálculos y simulaciones. En este trabajo se ha utilizado el software MATLAB,

como herramienta que ofrece la capacidad de manejar datos complejos, realizar análisis avanzados y visualizar resultados (Figura 2-11).



Figura 2-11 Logotipo Matlab

MATLAB, abreviatura de ‘Matrix Laboratory’ es un entorno de programación de alto nivel desarrollado por Matemático Clever Moler en 1970 durante su estancia como profesor en la Universidad de Standford (EE.UU) [26]. Desde entonces Ingenieros y científicos de todo el mundo utilizan MATLAB para numerosas aplicaciones, tanto en la industria como a nivel académico, que incluyen Deep learning, machine learning, procesamiento de señales y comunicaciones, procesamiento de imágenes y vídeos, sistemas de control, pruebas y medidas, finanzas y biología computacional [27].

3 DESARROLLO DEL ESTUDIO

En este apartado se muestra el desarrollo del trabajo estructurado como se explica a continuación. En primer lugar, se describen conceptos relativos a la defensa de punto, así como los parámetros utilizados para modelar el escenario de estudio. En segundo lugar, se explica el proceso que se ha seguido para calcular probabilidades de manera analítica. Tras ello, se expone una simulación mediante el método Montecarlo para el cálculo de probabilidades en el escenario previamente modelado.

3.1 Modelado. Parámetros utilizados en el análisis y simulación.

La eficacia de un sistema de armas para neutralizar un blanco varía dependiendo de las capacidades de alcance, ritmo de fuego y precisión del sistema además de multitud de factores externos como: velocidad, maniobrabilidad del blanco, y las condiciones meteorológicas. Por lo tanto, para el estudio es necesario tener un escenario modelado y explicar los parámetros utilizados para facilitar el entendimiento de los cálculos realizados en este trabajo.

El sistema se estudia con parámetros cercanos a los esperados durante su funcionamiento. El objetivo es analizar el sistema en situaciones que se asimilen lo máximo a posibles enfrentamientos reales. Para ello se han escogido los parámetros que se comentan a continuación.

El alcance es crucial para determinar la capacidad operativa y táctica del sistema. Los alcances utilizados han sido seleccionados en base a experiencias anteriores de la Armada con otros sistemas de igual calibre. En los cálculos se considera que el sistema abre fuego desde que el misil está dentro de distintos alcances hasta que se pueda afirmar que el misil ha sido neutralizado con una probabilidad del 95% de éxito antes de alcanzar la distancia de parada ³ (Figura 3-1).

³ Distancia mínima a una unidad para destruir o neutralizar un misil enemigo de forma segura tras su lanzamiento.

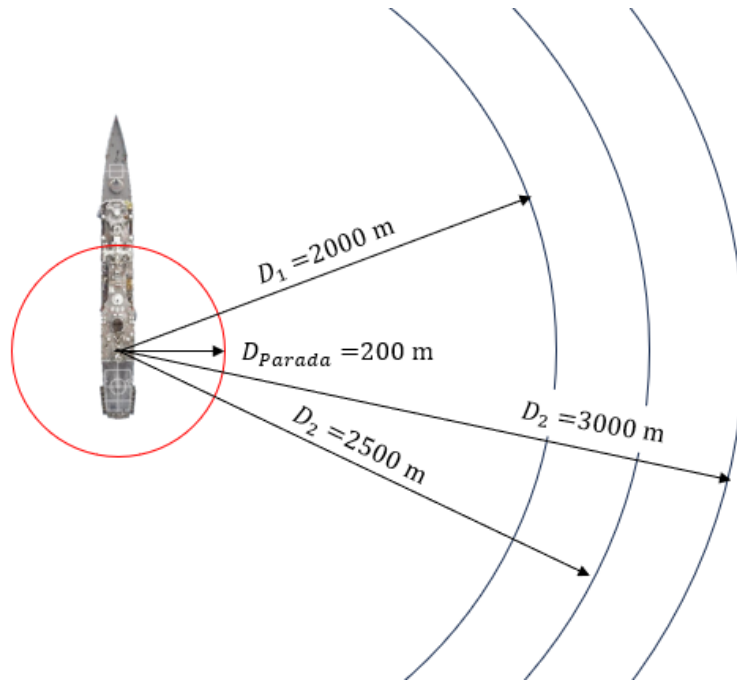


Figura 3-1 Representación de Distancias de alcance.

De igual manera, en el modelado del RFG25, se utilizan ritmos de fuego y dispersiones que son definidos por el fabricante del cañón asociado, el GAU-12/U. Este cañón es utilizado en los aviones Harrier II AV-8B y consta de cinco tubos de calibre 25 mm de tipo Gatling. Los cañones Gatling son conocidos por sus ritmos de fuego excepcionalmente altos en comparación con otros sistemas de igual calibre. Específicamente, el GAU-12/U tiene un ritmo de fuego máximo teórico de 4200 dpm. Puesto que el ritmo de fuego es seleccionable, se han utilizado para el estudio cadencias de **500, 1000, 2000, 3000 y 4000** dpm. Estos cañones, utilizan estos ritmos de fuego tan elevados para generar ‘cortinas de disparos’ centradas en el blanco que hacen aumentar la probabilidad de impacto en este (Figura 3-2) .

En cuanto a la dispersión, se ha tomado de información expuesta en las especificaciones técnicas del cañón y utilizados valores próximos durante el estudio [28]. El fabricante especifica que, el 80% de sus disparos quedan dentro de un círculo de dispersión generado por un ángulo de 2.5 miliradianes (mrad) de radio, en la distancia de impacto (Figura 3-2).

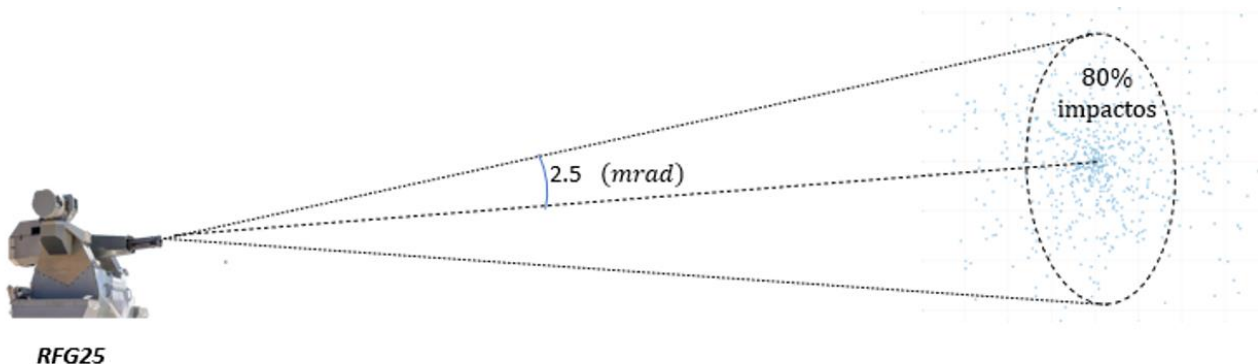


Figura 3-2 Dispersión del RFG25, datos General Dynamics.

Los blancos seleccionados para el estudio son distintos misiles antibuque utilizados en la actualidad. Todos tienen un perfil de vuelo rozaolas en el que se considera que no maniobran durante el ataque, mostrando siempre la misma superficie al buque. Como se muestra a continuación han sido

seleccionados con distintas velocidades y tamaños para así evaluar al sistema frente a distintos modelos que utilicen distintos parámetros (Figura 3-3).

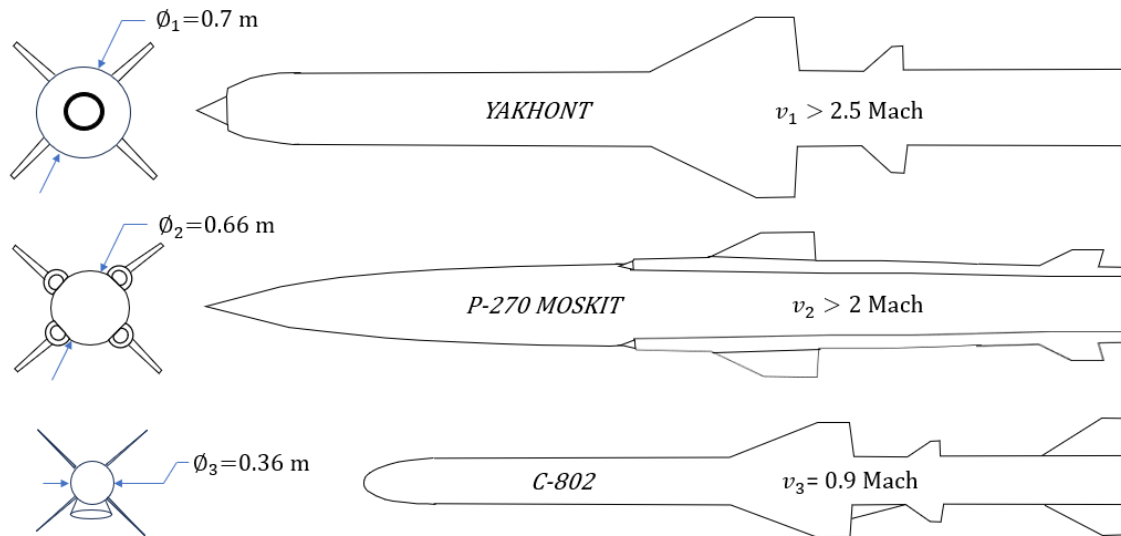


Figura 3-3 Datos Blancos utilizados

3.2 Cálculos de probabilidades

En este apartado se aborda el análisis probabilístico seguido para hallar la efectividad del sistema. La efectividad de un sistema de defensa antimisil puede entenderse como la capacidad de detectar, enfrentar e impactar en un blanco para su destrucción o neutralización [29]. En términos probabilísticos esto puede verse como:

$$P(K) = P(D \cap I)$$

donde el término $P(K)$ hace referencia a la probabilidad total de destrucción. Este suceso puede entenderse como la intersección de dos sucesos:

‘D’ Detección y enfrentamiento del blanco

‘I’ Impacto en el blanco

Puesto que la detección y el impacto en el blanco son sucesos independientes, la intersección puede representarse como el producto de las probabilidades individuales de detectar e impactar.

$$P(K) = P(D) \cdot P(I) \quad (1)$$

El factor $P(D)$ es considerado como la probabilidad de detectar y enfrentar el blanco. Hace referencia a la eficiencia del sistema de adquisición, que incluye detección, adquisición, mando y control y comunicación entre subsistemas hasta enfrentar el blanco. [29] En términos simples, describe cómo de rápido el sistema es capaz de detectar, adquirir y enfrentar el blanco. Para hallar el valor de $P(D)$ es necesario estudiar por lo tanto el sistema de adquisición del CIWS en distintas situaciones que afecten a su eficacia como puede ser condiciones meteorológicas adversas, maniobras evasivas del blanco, etc. El factor $P(I)$ representa la probabilidad de impacto en el blanco una vez que ha sido detectado, y está relacionado con el mecanismo de destrucción del CIWS.

Durante este trabajo se analiza la eficacia del *RFG25* una vez ha sido detectado el blanco y el cañón ha sido designado para enfrentarlo. Por lo tanto, se considera $P(D)=1$, quedando la ecuación (1) de la siguiente manera:

$$P(K) = P(I)$$

Realizada esta simplificación, se estudian de manera tanto analítica como mediante simulación las probabilidades de que el sistema consiga impactar en cada blanco determinado.

3.2.1 Aproximación de los impactos a una distribución normal.

Para el cálculo de probabilidades es importante estudiar el comportamiento de los disparos en diferentes ensayos, tomando tantas muestras como sea posible. Este subapartado trata de explicar el proceso seguido para aproximar los impactos del *RFG25* a una distribución normal.

En tiro naval, cuando un montaje efectúa una serie de disparos sobre un blanco en las mismas condiciones ambientales manteniendo el apuntamiento, se observa que los disparos no impactan en el mismo punto, sino que se distribuyen en una zona, agrupándose alrededor de un punto al que se denomina ‘centro de impactos’(Figura 3-4).

El origen de la dispersión de los impactos está en la existencia de errores aleatorios, que por su naturaleza son imposibles de corregir. Por lo tanto, para una única dirección de tiro, no corresponde una única trayectoria, sino tantas como disparos se realicen, agrupadas en un cono de dispersión (Figura 3-4).

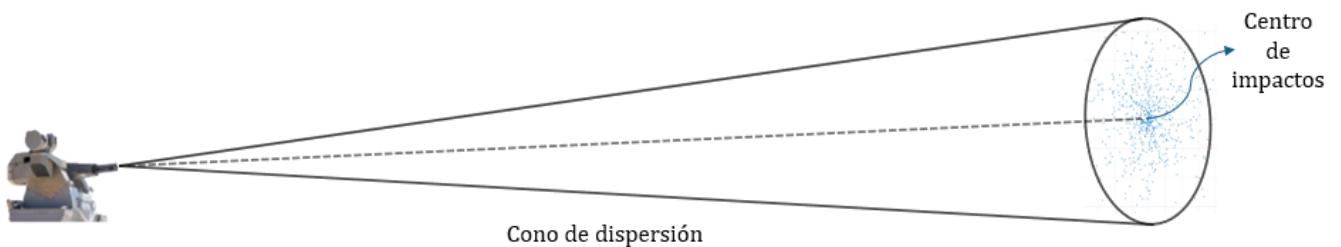


Figura 3-4 Cono de dispersión de un cañón de artillería

Midiendo reiteradamente la distancia que existe entre cada impacto y el centro de impactos, se observa cómo la distribución de impactos en X e Y siguen la naturaleza de una distribución Normal [30], agrupándose un determinado número de disparos de manera simétrica para cada intervalo de elevación (Δy) y de deriva (Δx) alrededor del centro de impactos (Figura 3-5).

Se ha representado en Matlab los impactos del *GAU/12-U* tras realizar un número de disparos determinado. De igual manera se ha utilizado el software para observar la simetría de la distribución, expresando los impactos por sus coordenadas en el plano (x, y) y calculando su función de distribución $F(x, y)$ en el espacio (Figura 3-5).

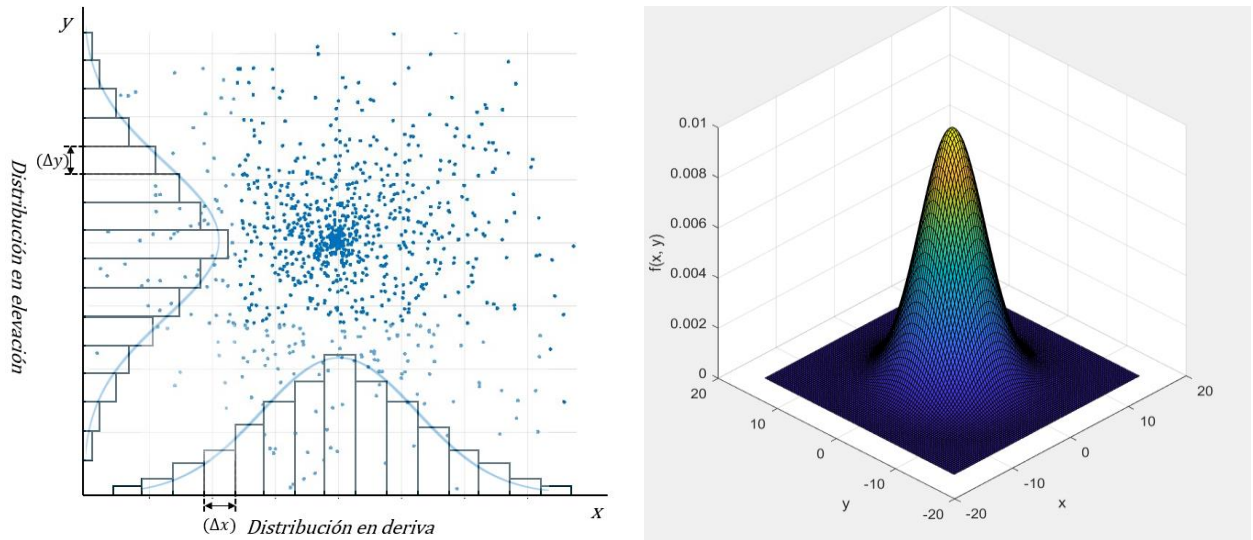


Figura 3-5 Izquierda: Distribución de los impactos en deriva y elevación. Derecha: Representación 3D como función bivariable.

Como puede observarse los impactos siguen una distribución normal tanto en deriva como en elevación de carácter similar, definidas como:

$$'X' \text{ distancia horizontal al centro de impactos} \sim N(\mu_x, \sigma_x)$$

$$'Y' \text{ distancia vertical al centro de impactos} \sim N(\mu_y, \sigma_y)$$

$$\text{donde } \mu_x = \mu_y = \mu, \sigma_x = \sigma_y = \sigma$$

Para poder realizar cálculos mediante la distribución normal es necesario definir la media (μ), y la desviación típica (σ) del sistema. La media queda definida por el centro de impactos y puesto que se considera que el tiro está centrado, la media coincidirá con el centro del blanco (esto se conoce en artillería como 'centrar el tiro' y es trabajo de la dirección de tiro instalada). Para hallar la desviación típica, medida de dispersión del sistema, ha de tenerse en cuenta el cono de dispersión mencionado anteriormente. El cañón no consigue agrupar los impactos de igual manera para distintas distancias de tiro. Como puede intuirse, con blancos a corta distancia el cañón agrupará los impactos próximos a la media, mientras que, para distancias de tiro largas, los impactos se encontrarán a mayor distancia de la media. Esto implica que la desviación típica no es constante, sino que variará su valor en función de la distancia de impacto, y que por lo tanto existen tantas distribuciones normales como distancias a las que se decida abrir fuego (Figura 3-6).

Aunque la función de distribución de los impactos varía con la distancia, existe una relación entre todas las distribuciones. El ángulo de dispersión (α), define la dispersión en el plano para cada distancia de tiro. A través de α se puede hallar la desviación típica (σ) sobre el plano al que se dispare, utilizando una simple relación trigonométrica: $\sigma = d \tan \alpha$ que se muestra en la figura 3-6.

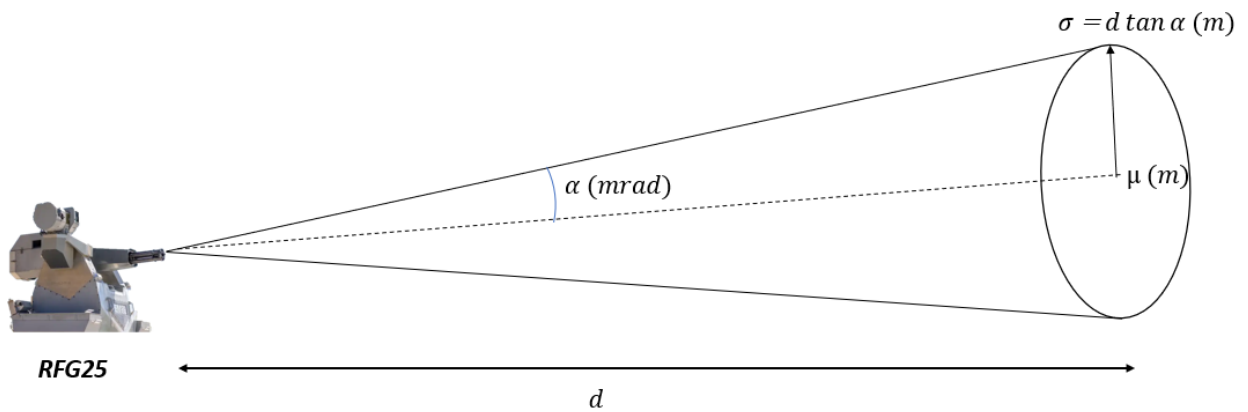


Figura 3-6 Sistema RFG abriendo fuego a una distancia dada.

Para hallar el ángulo de dispersión (α) del sistema se ha utilizado un dato de dispersión que el fabricante proporciona. El fabricante indica un ángulo para un cono de dispersión que agrupa el 80% de los impactos. Utilizando el teorema de Cheyvyhev a través de la relación que existe entre el ángulo dado y la proporción de los impactos, se puede obtener el valor de α que nos define el cono de dispersión para agrupación en el intervalo $\mu \pm \sigma$ (68,2%) de los impactos (Figura 3-7).

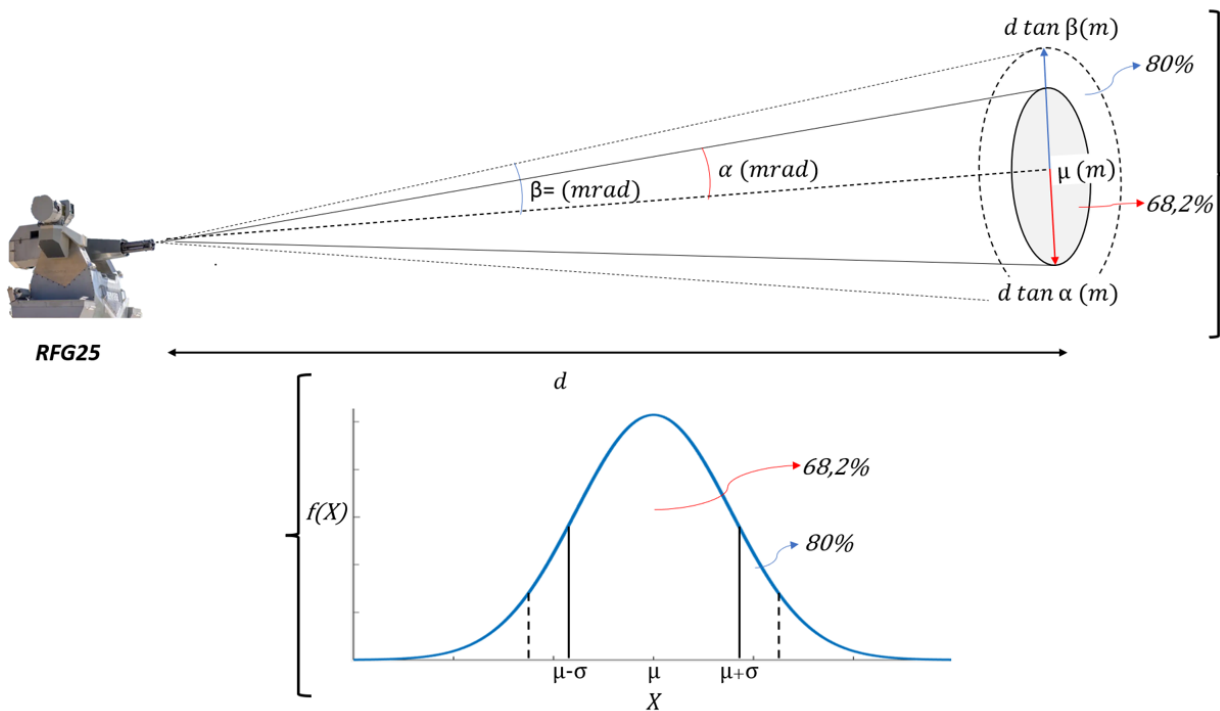


Figura 3-7 Cálculo del ángulo de dispersión.

Hallado α , podemos definir todas las distribuciones normales como:

$$'X_i, Y_i' \sim N(\mu, \sigma_i) = N(\mu, d_i \tan(\alpha))$$

siendo $i = 1, 2, \dots, n$. la notación de referencia del i -ésimo disparo realizado, donde:

$$\left\{ \begin{array}{l} d = \text{distancia al blanco (m)} \\ \alpha = \text{ángulo de dispersión (mrad)} \\ \mu = \text{media poblacional (m), centro de impactos.} \\ \sigma(d, \alpha) = \text{desviación típica poblacional (m), dispersión de los impactos} \end{array} \right.$$

3.2.2 Probabilidad de impacto simple.

Para el cálculo de probabilidad de impacto es importante especificar cuándo se considera que se ha producido un impacto en el misil. Para el modelado del blanco, se han diseñado unas celdas que ocupan la superficie equivalente que el misil muestra al sistema de designación (Figura 3-8). Se considera que se produce un impacto en el blanco cuando, al realizar un disparo, este impacta dentro de la celda.

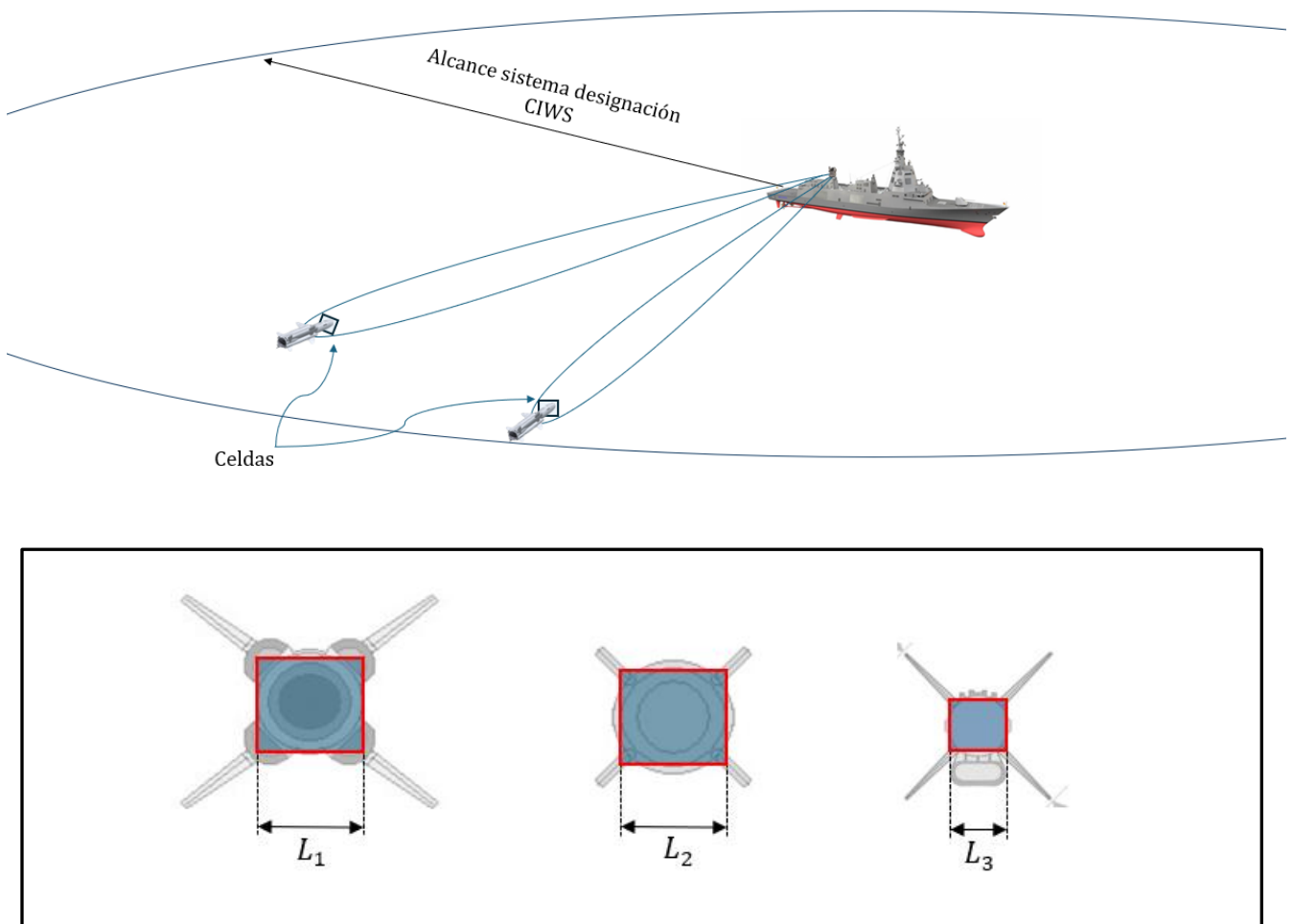


Figura 3-8 Modelado del blanco

Las celdas son cuadriláteros regulares que mantienen la misma superficie que el misil que modela. Para ello se establece una relación entre el lado de la celda y el radio del misil que modela.

$$L = r\sqrt{\pi}$$

Una vez definido el blanco y la función de distribución de los impactos el cálculo de la probabilidad se ha realizado como la intersección entre dos sucesos independientes (Figura 3-9):

$$P(I) = P(I_x \cap I_y)$$

' I_x ' Impacto en x. El impacto se encuentra dentro de los límites establecidos por la celda en abcisas

' I_y ' Impacto en y. El impacto se encuentra dentro de los límites establecidos por la celda en ordenadas

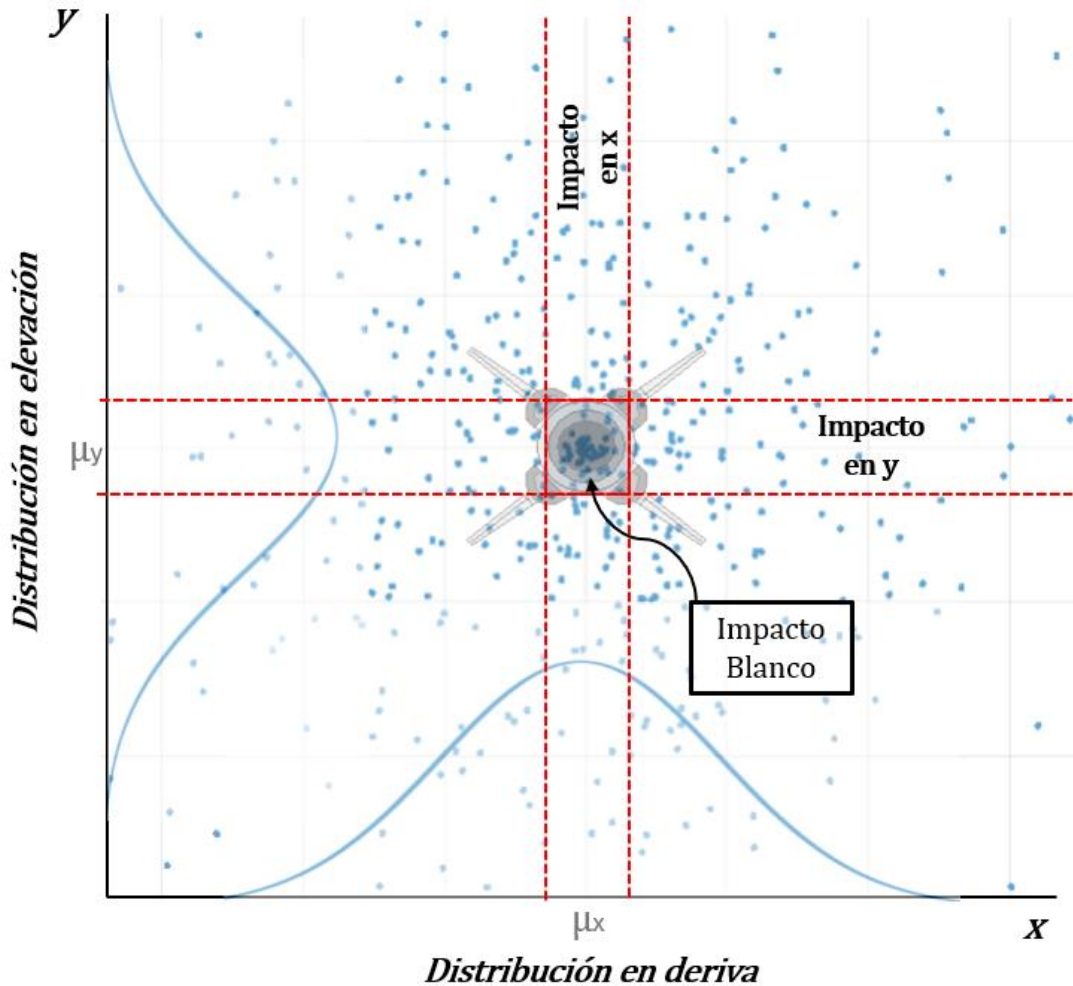


Figura 3-9 Representación de impacto en Blanco

3.2.3 Probabilidad de impacto acumulada: 'al menos un impacto'

En general, los CIWS se diseñan para maximizar la probabilidad de impacto y proporcionar una defensa eficaz en entornos de combate donde el tiempo tanto de reacción como de acción es mínimo. Para ello se utilizan montajes de pequeño calibre que permitan cadencias de fuego muy elevadas. La probabilidad de al menos producirse un impacto en un determinado número de disparos aumenta cuantos más disparos se realicen durante el vuelo del misil, ya que mayor es la oportunidad de que al menos uno de los proyectiles impacte en el objetivo. Se ha calculado la probabilidad de impacto para distintas cadencias de fuego y dispersiones del sistema como se expone a continuación.

Sea el espacio muestral en cada disparo ' D_i ', existen dos posibles sucesos: Impacto ' I_i ' y No impacto ' \bar{I}_i ' donde cada suceso tiene asociada una probabilidad $P(I_i)$ y $P(\bar{I}_i)$ relativa a la distancia a la que se efectúa el disparo, y que se ha calculado en el apartado anterior. Esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$D_i = \begin{cases} I_i, & P(I_i) \\ \bar{I}_i, & P(\bar{I}_i) = 1 - P(I_i) \end{cases}$$

con $i = 1, 2, \dots, n$, número de disparos realizados.

La probabilidad de al menos producirse un impacto en un determinado número de disparos puede expresarse como el complementario de la probabilidad de no haber impactado en ninguno de los ensayos anteriores.

$$P(I_1 \cup I_2 \cup \dots \cup I_n) = 1 - P(\bar{I}_1 \cap \bar{I}_2 \cap \dots \cap \bar{I}_n)$$

Al tratarse de sucesos independientes, la intersección puede calcularse como el producto

$$P\left(\bigcup_{i=1}^n I_i\right) = 1 - \prod_{i=1}^n P(\bar{I}_i) \quad (2)$$

Es importante resaltar que el número de disparos realizados depende de tres variables:

$$n = \frac{Q}{v_m} \cdot d_m$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q = \text{ritmo de fuego (disparos/s)}. \\ v_m = \text{velocidad del misil (m/s)}. \\ d_m = \text{distancia recorrida por el misil (m)}. \end{array} \right.$$

3.2.4 Probabilidad de impacto acumulada: ‘al menos 5 y 10 impactos’.

Hasta ahora, se ha considerado que producir un impacto asegura la destrucción o neutralización de un misil enemigo. Esta información está basada en información de balística de efectos proporcionada por el fabricante en especificaciones técnicas sobre la munición en el Anexo V. Son de interés para el estudio las probabilidades asociadas a obtener más de un impacto en el blanco, puesto que esto puede ser requerido para neutralizar ciertos blancos. En este apartado se calcula la probabilidad acumulada de producirse un número determinado de impactos, utilizando como base teórica el *teorema de Le Cam*.

El matemático *Lucien Le Cam* demostró, fruto de su investigación en campo de la estadística, la aproximación de sumas de variables aleatorias de Bernoulli independientes y no idénticamente distribuidas a una distribución de Poisson en un estudio publicado por la revista de investigación matemática ‘*The Pacific Journal of Mathematics*’ [31]. Se han proporcionado varias demostraciones de la desigualdad de Le Cam a lo largo de los años, cada una contribuyendo a una mejor comprensión y refinamiento del resultado. Otros estadísticos como Hodges, presentaron una demostración elemental poco después del artículo original de Le Cam, y el trabajo posterior de varios investigadores, incluidos Kerstan, Franken, Vervatt, Galambos, Freedman, Serfling y Chen, ha conducido a generalizaciones y mejoras [32].

Le Cam durante este estudio no solo observa empíricamente, sino que demuestra la hipótesis de que en numerosas situaciones una repetición de sucesos S sigue aproximadamente una distribución de Poisson. Esto sucede para un número elevado de eventos n asociados a una probabilidad pequeña p cuyo valor varía para cada suceso a lo largo de estos eventos [31]. El *teorema de Le Cam* por lo tanto establece que siendo X_1, X_2, \dots, X_n variables aleatorias independientes, no necesariamente distribuidas idénticamente, cada una de ellas siguiendo una distribución de Bernoulli (es decir toman valor 1 ‘éxito’ o 0 ‘fracaso’) con $P(X_i = 1) = p_i$ y $P(X_i = 0) = 1 - p_i$ para $i = 1, 2, \dots, n$, se puede afirmar [33] que la suma de sucesos $S_n = X_1 + X_2 + \dots + X_n$ sigue aproximadamente una distribución de Poisson con cierto error.

$$\left| P(S_n \leq T) - \sum_{k=0}^T \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!} \right| < 2 \sum_{i=1}^n p_i^2 \quad \text{donde} \quad \lambda = \sum_{i=1}^n p_i \quad (3)$$

donde T indica la cantidad de éxitos a considerar en la suma de los S_n eventos.

Dado que la distribución de Poisson modela el número de eventos que ocurren en un intervalo de tiempo o medida dado, y en este caso se quiere contabilizar el número de impactos ‘ T ’ a lo largo del tiempo o distancia recorrida, se utilizará la aproximación de *Le Cam* a la Distribución de Poisson para el cálculo de las probabilidades, Anexo IV. El teorema permite afirmar que siendo los disparos D_1, D_2, \dots, D_n variables aleatorias independientes con una probabilidad asociada a producirse ‘Impacto’ y ‘No Impacto’ respectivamente con $P(I_i = 1) = p_i$ y $P(\bar{I}_i = 0) = 1 - p_i$ para $i = 1, 2, \dots, n$, se puede considerar que la suma de sucesos $S_n = D_1 + D_2 + \dots + D_n$ sigue aproximadamente una distribución de Poisson (Figura 3-10).

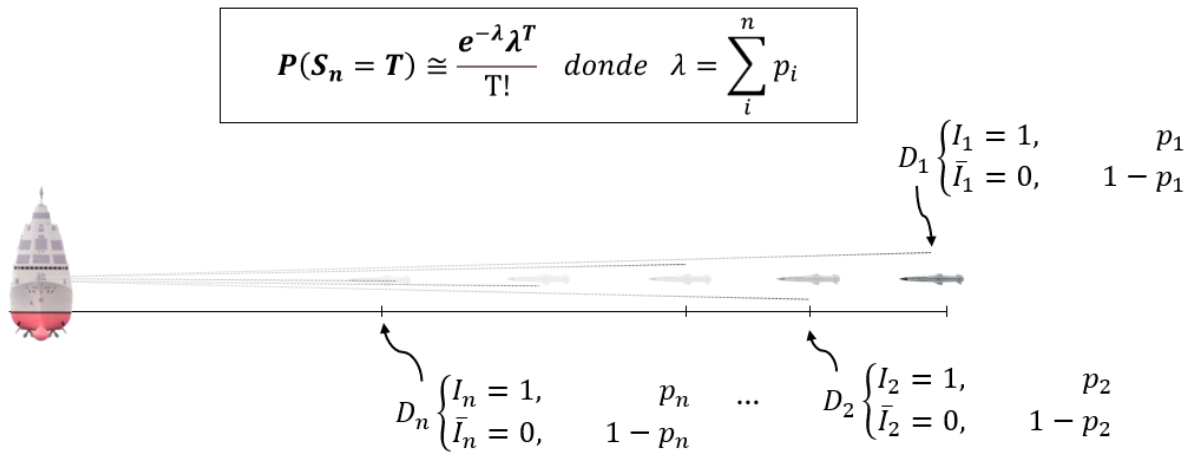


Figura 3-10 Teorema de Le Cam aplicado la probabilidad de impacto

El cálculo de estas probabilidades permite dar solución a la efectividad del sistema frente amenazas que requieran varios impactos para su destrucción, de tal manera que se calcularan probabilidades de producirse al menos 5 y 10 impactos en distintos blancos. Además del cálculo de la probabilidad de impacto en misiles, en este apartado se ha calculado la probabilidad de neutralizar o destruir blancos de superficie como el USV ‘*Magura 5V*’ utilizado durante la guerra de Ucrania (Figura 3-11). Los USV han mostrado ser difíciles de detectar a largas distancias debido a su reducido tamaño y superficie equivalente radar, permitiéndoles estas características infiltrarse en la última capa de defensa de los buques, convirtiéndose entonces en un posible blanco a batir para los CIWS. Se ha modelado el blanco en base a datos publicados por la empresa como se muestra a continuación [34].

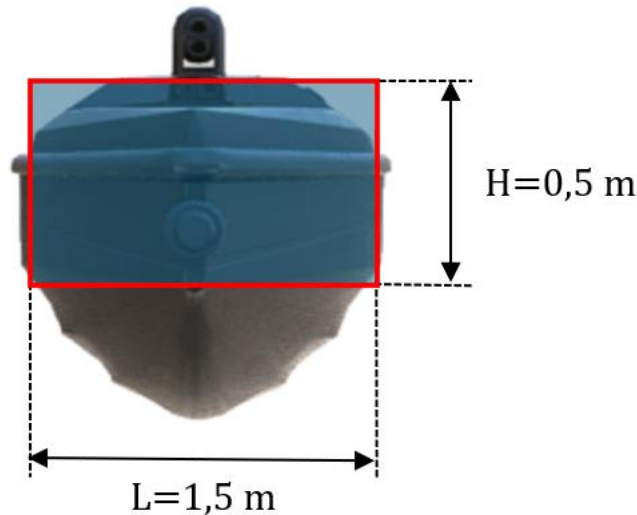


Figura 3-11 Modelado USV Magura V5

3.3 Simulación Montecarlo

El método Monte Carlo consiste en resolver un problema mediante la invención de juegos de azar cuyo comportamiento simula algún fenómeno real gobernado por una distribución de probabilidad. El término Monte Carlo se aplica a un conjunto de métodos matemáticos que se empezaron a usar en los 1940s para el desarrollo de armas nucleares en Los Álamos, favorecidos por la aparición de los ordenadores digitales modernos.

Desde una perspectiva más técnica, el método de Monte Carlo se puede definir como un proceso numérico estocástico, es decir, una secuencia de estados cuya evolución está influenciada por eventos aleatorios. Es importante recordar que un evento aleatorio es un conjunto de resultados que ocurren con una probabilidad determinada [35]. En el estudio de la probabilidad de impacto, se ha utilizado el método Montecarlo para realizar una simulación modelada con los parámetros, las características del blanco y el CIWS. El objetivo de esta simulación es determinar el promedio de impactos del cañón para cada distancia de impacto, y una vez se obtenga el promedio de impactos, se calcularán las probabilidades de impacto. Dichas probabilidades serán comparadas con los resultados que se hayan obtenido hasta el momento tratando de llegar al mismo resultado mediante distintos métodos para así dar mayor confianza al resultado.

La simulación consta de un gran número ensayos en los que en cada uno se simulan disparos a distintas distancias desde la apertura de fuego hasta la distancia de parada (Figura 3-12). Se almacenan los resultados obtenidos de éxito ' $T=1$ ' y fracaso ' $T=0$ ' asociados a haber impactado o no a lo largo del avance en distancia. Una vez se haya avanzado hasta la distancia de parada el ensayo habrá acabado, procediéndose con el siguiente. El ensayo se repetirá tantas veces como se determine, teniendo en cuenta que el error cometido al utilizar este método como cálculo aproximado decrece cuando el número de ensayos crece. La simulación se ha realizado mediante MATLAB, cuyo código se expone en el Anexo VI.

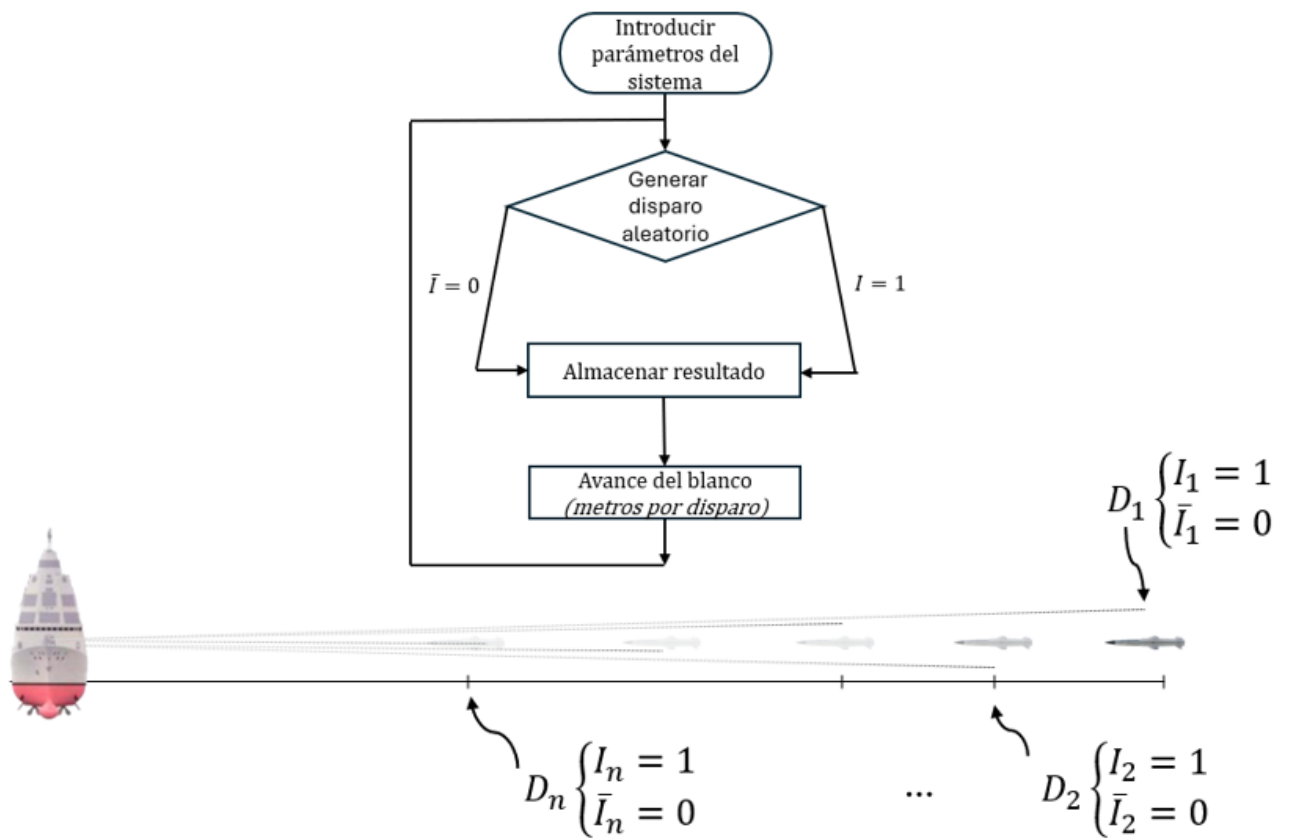


Figura 3-12 Representación simulación Montecarlo. Diagrama de flujo resumen.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo del trabajo. Para ello, se inicia con la exposición de los cálculos de probabilidades realizados de forma analítica, seguido por una comparación con los valores obtenidos en la simulación. Posteriormente, se proponen distintas dimensiones de cargadores en función de los posibles enfrentamientos requeridos.

4.1 Cálculo de probabilidades

4.1.1 Cálculo de Distribución Normal de los impactos.

Como se comentó en el capítulo anterior, los impactos del *RFG 25* se distribuyen de manera normal tanto en deriva como en elevación siguiendo distintas distribuciones en función de la distancia.

$$'X_i, Y_i' \sim N(0, d_i \tan(\alpha))$$

sea $i = 1, 2, \dots, n$, la notación de referencia del i -ésimo disparo realizado.

La media (μ) tiene valor 0 puesto que se considera que el tiro está centrado en el centro del blanco, el origen de coordenadas. La desviación típica (σ) puede calcularse para cada distribución a través de la relación trigonométrica que cumple con la distancia en ese punto y el ángulo de dispersión. El ángulo de dispersión (α) del sistema ha sido calculado como se muestra en la Figura 4-1.

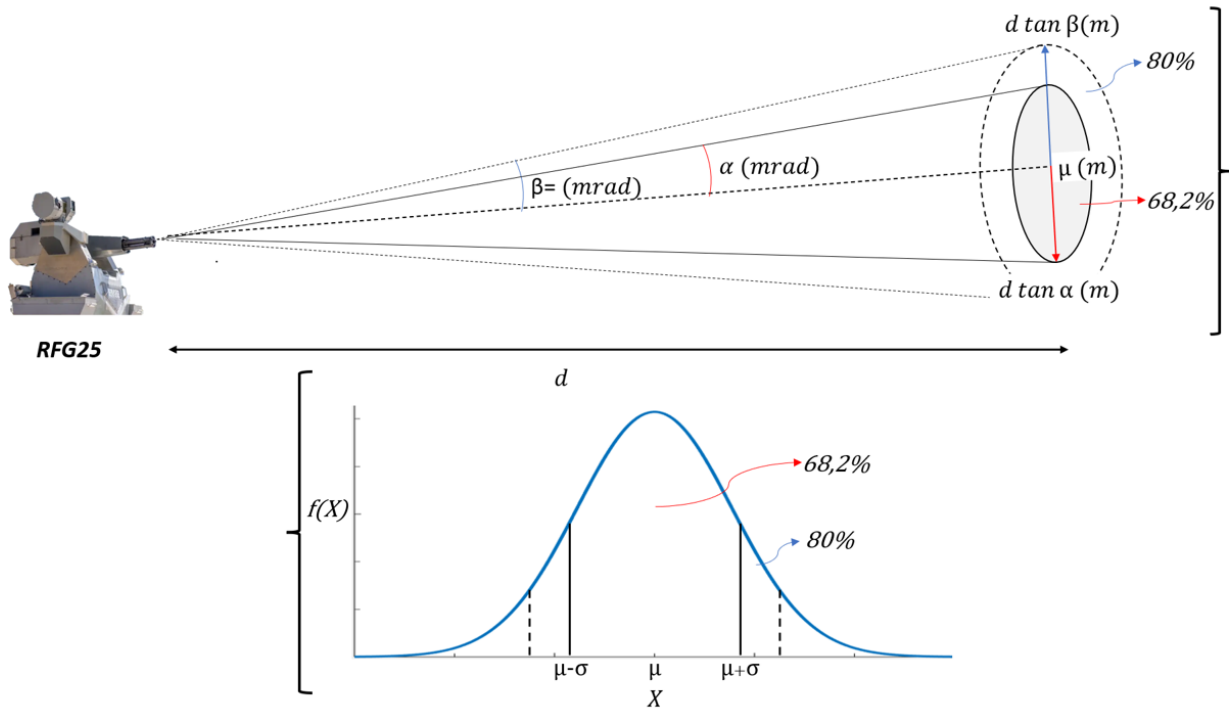


Figura 4-1 Cálculo del ángulo de dispersión.

$$P(-x_0 < X < x_0) = 0.8 \rightarrow \text{Tipificando} \rightarrow P\left(\frac{-x_0 - \mu}{\sigma} < Z < \frac{x_0 - \mu}{\sigma}\right) = 0.8;$$

$$2P\left(Z < \frac{x_0 - \mu}{\sigma}\right) - 1 = 0.8; P\left(Z < \frac{x_0 - \mu}{\sigma}\right) = 0.9$$

$$\sigma = \frac{x_0 - \mu}{\Phi(0.9)}$$

ver explicaciones sobre el uso de la distribución normal para el cálculo de probabilidades en Anexo III

- $\sigma = d \tan \alpha \text{ (m)}$
- $x_0 = d \tan \beta \text{ (m)}$, donde β es el ángulo dado por el fabricante
- $\mu =$ media poblacional en metros, centro de impactos
- $\Phi(0.9) =$ función de distribución normal estándar evaluada en 0.9

$$\alpha = \arctan\left(\frac{x_0 - \mu}{\Phi(0.9)d}\right) = 1.95 \text{ mrad}$$

A continuación, se muestra un ejemplo de las distribuciones seguidas por los disparos a distintas distancias de tiro, representadas mediante el código expuesto en el Anexo VI. (Figura 4.2)

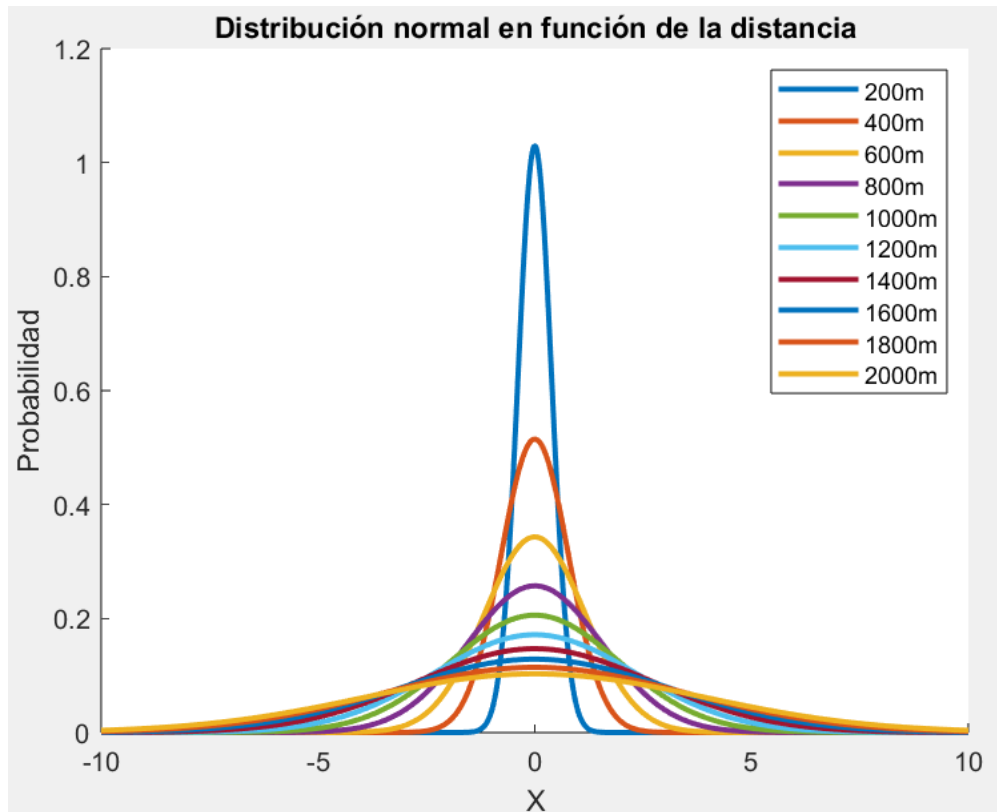


Figura 4-2 Distribuciones Normales para un ángulo de dispersión del GAU-12/U

4.1.2 Cálculo de probabilidad simple. RFG25

Una vez definida la distribución Normal, en este subapartado se muestran las probabilidades de impactar al realizar un único disparo para las posibles distancias de tiro. (Figura 4-3, Figura 4-4, Figura 4-5). Los cálculos se han realizado para dispersiones cercanas a la dispersión teórica del cañón. Se ha utilizado Matlab para representar estas probabilidades de impacto sobre los blancos presentados en el apartado 3.1 (Figura 3-3) de manera continua. Estas probabilidades serán utilizadas en el resto de los subapartados para realizar cálculos de probabilidad acumulada. (Ver código en Anexo VI)

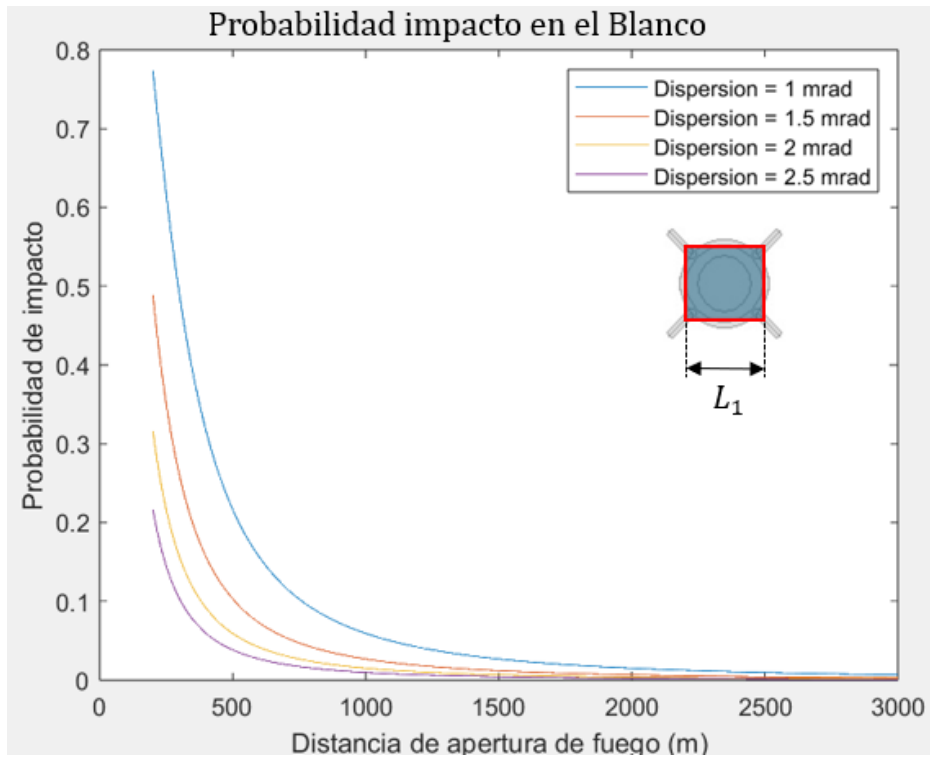


Figura 4-3 Probabilidad simple de impacto en *Yakhont*

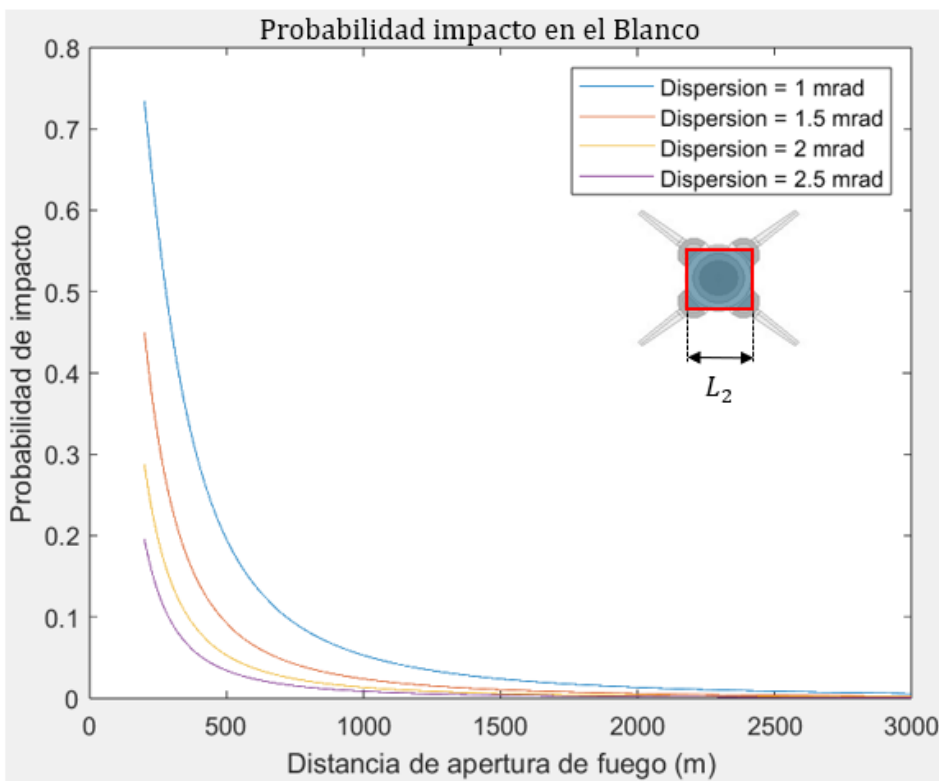


Figura 4-4 Probabilidad simple de impacto en *Moskit*

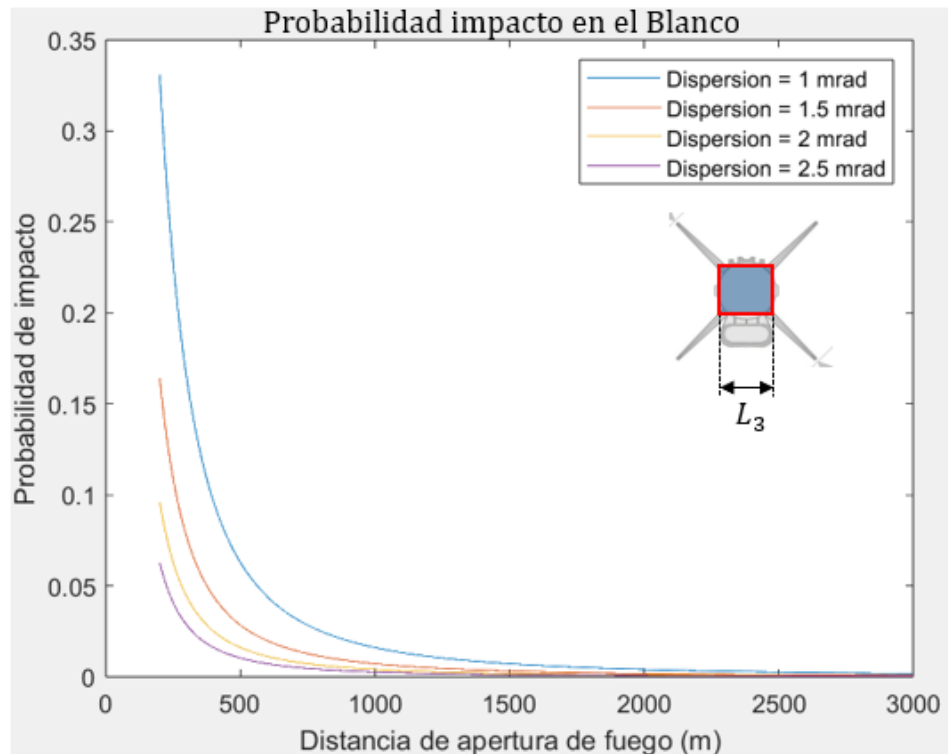


Figura 4-5 Probabilidad simple de impacto en C-802

Como puede observarse la probabilidad de impacto depende del tamaño del blanco y de la dispersión del cañón, además de la distancia. El valor de las probabilidades para distancias mayores de 2000m es despreciable y por lo tanto abrir fuego a distancias superiores supondría un gasto de munición innecesario. Analizando los valores con el uso de distintas dispersiones se puede observar la importancia de usar cañones precisos, con el mínimo valor de dispersión posible ya que afecta directamente a la efectividad del sistema. Cuanto menor sea la dispersión del cañón, mayor será la probabilidad de impacto en cada disparo y por lo tanto menor será número de disparos necesarios para alcanzar altas probabilidades de éxito.

En general los valores de probabilidad obtenidos son bajos para las distancias donde se comienza a abrir fuego y no alcanzan un valor significativo hasta que el blanco encuentra a cortas distancias. Por lo tanto, la intuición lleva a pensar que lo más eficiente sería abrir fuego lo más tarde posible, donde el sistema es más efectivo. Sin embargo, es importante recordar que el sistema está diseñado para enfrentar a misiles que se desplazan a gran velocidad, donde el tiempo de reacción puede llegar a ser de unos pocos segundos. Los *CIWS* están pensados para realizar el mayor número de disparos posibles y así ofrecer más oportunidades de impactar en el blanco, no siendo la precisión su característica principal, sino su volumen de fuego. En el siguiente apartado, se analizarán los cambios en las probabilidades con blancos en movimiento, y la importancia del ritmo de fuego en situaciones reales.

4.1.3 Cálculos probabilidad al menos un impacto.

Este subapartado viene a mostrar los cálculos de probabilidad acumulada de producirse al menos un impacto en los misiles indicados (Figura 4-6). Se ha partido de una distancia de 2.000 metros, ya que para distancias superiores la probabilidad calculada en el apartado anterior es insignificante.

A continuación, se muestran las probabilidades de al menos producirse un impacto en el blanco calculadas para distintas velocidades y tamaños de misil, cadencias de fuego y dispersiones del sistema. En las gráficas cada disparo viene representado mediante un punto y lleva asociado una distancia y una probabilidad acumulada de impacto. (2)

Si se comparan las curvas de igual ritmo de fuego de los gráficos verticales (misil transónico) se observa la gran influencia que tiene la dispersión radial en el sentido de que al disminuir aumente grandemente la probabilidad, ratificando lo demostrado en el capítulo anterior.

Si se comparan las curvas de igual ritmo de fuego de los gráficos horizontales se observa que la velocidad del misil no influye grandemente en la probabilidad, como sí lo hace el tamaño del misil, factor determinante en la probabilidad de impacto.

Finalmente, comparando las curvas de un mismo gráfico, se observa la gran influencia que tiene el ritmo de fuego en el sentido de que, al aumentar, también lo hace la probabilidad. Así pues, se justifica que un sistema artillero antimisil deberá tener un gran ritmo de fuego y una reducida dispersión para neutralizar un blanco. Puesto que obtener dispersiones pequeñas en cañones con ritmos de fuego tan elevados puede ser complejo a nivel tecnológico, se observa que conviene reducir el ritmo de fuego si esto implica una reducción de dispersión notable. Véase que el sistema obtiene mejores resultados funcionando a (3000 dpm / 1.5 mrad) que funcionando a (4000 dpm / 2 mrad).

Las gráficas han sido realizadas haciendo uso del código de Matlab ‘al menos un impacto’ expuesto en el Anexo VI.

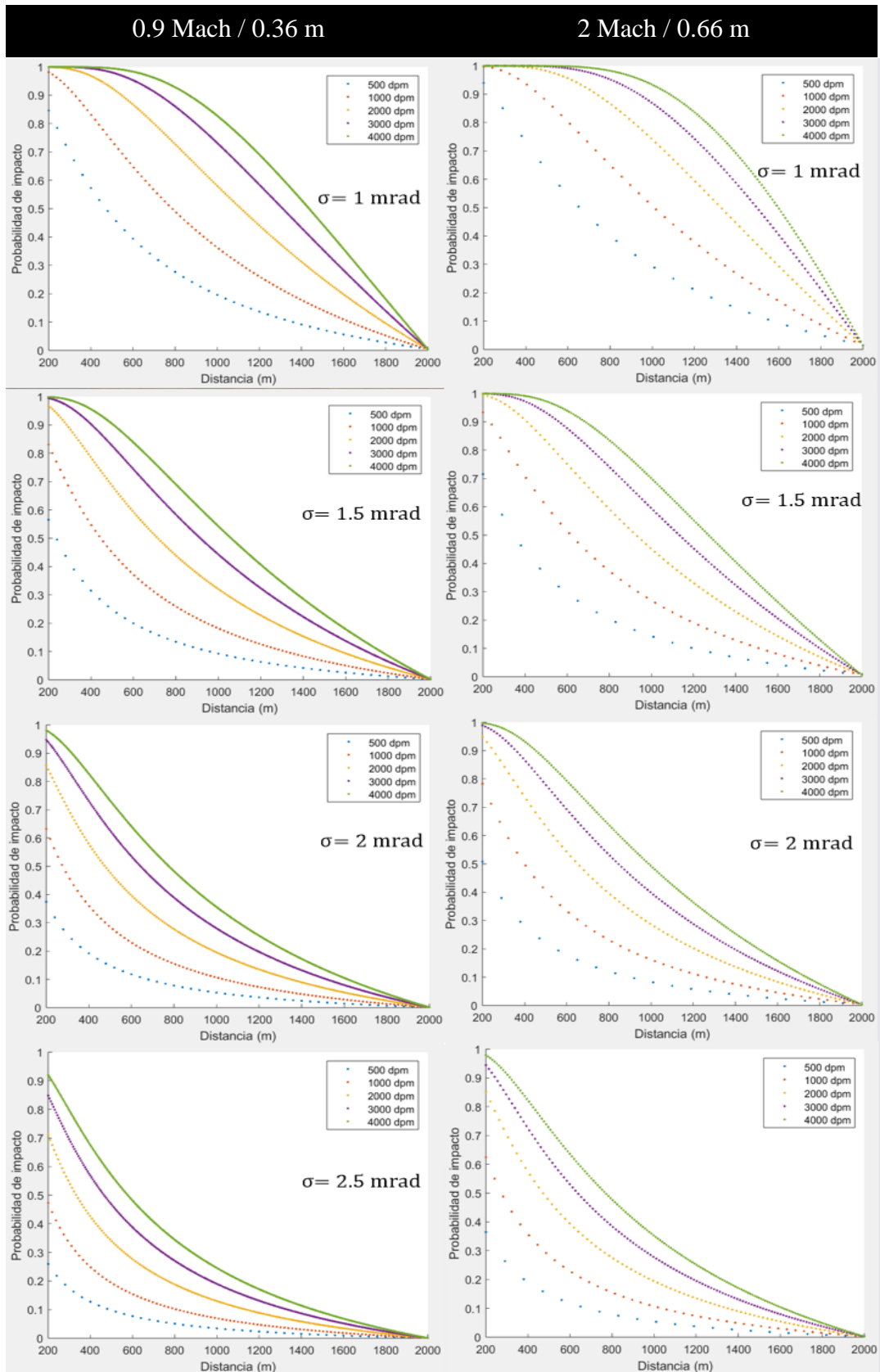


Figura 4-6 Probabilidades acumuladas, 'al menos un impacto'.

4.1.4 Cálculos probabilidad al menos 5 y 10 impactos.

El cálculo de la probabilidad de producirse 5 y 10 impactos se ha realizado haciendo en uso del *teorema de Le Cam* (3). El *teorema de Le Cam* nos ofrece una solución aproximada a diferencia de los cálculos exactos realizados hasta ahora utilizando teorías de operaciones con sucesos. Al tratarse de probabilidades simples ' p ' muy pequeñas y un elevado número de eventos, el error producido es despreciable. Esto se demuestra en el siguiente apartado, comparando los resultados las simulaciones realizadas.

Se han calculado las probabilidades de al menos producirse 5 y 10 impacto para distintas velocidades y tamaños de misil, cadencias de fuego y dispersión del sistema. Los cálculos se han realizado para dispersiones menores de 1, 1.5 y 2 mrad, puesto que las probabilidades para dispersiones superiores son muy reducidas. En las gráficas cada disparo viene representado mediante un punto asociado a una probabilidad acumulada de destrucción para esa distancia de tiro.

Se observa cómo las probabilidades de producir 5 impactos se han reducido considerablemente en misiles frente a las de producir 'al menos un impacto'. Anteriormente el sistema aseguraba con un 95% de probabilidad el impacto para dispersiones menores a 1.5 mrad siempre que la cadencia fuese superior a 2000 dpm. En el caso actual, la probabilidad solo supera valores del 95% de probabilidad de impacto cuando se utilizan dispersiones menores a 1 mrad cuya obtención es muy compleja a nivel experimental. (Figura 4-7)

A continuación, se muestran las gráficas de producir al menos 10 impactos. Se observa cómo el sistema no es efectivo si se requieren 10 impactos en su uso frente a misiles, ya que el sistema no obtiene más de 50% de probabilidad de éxitos en la mayoría de los casos (Figura 4-8). Por otro lado, se muestran los cálculos realizados para neutralizar un *USV 'Maruga V'* considerando 'neutralizado' como producir 10 impactos en el mismo (Figura 4-9). En la gráfica se observa que la efectividad del sistema aumenta considerablemente ante blancos de mayor tamaño y menor velocidad. El *RFG25* muestra ser un sistema altamente eficiente ante estos blancos de superficie que se mueven a gran velocidad, gracias a su alto ritmo de fuego.

Las gráficas han sido realizadas haciendo uso del código de Matlab 'producir ' x ' impactos' expuesto en el Anexo VI.

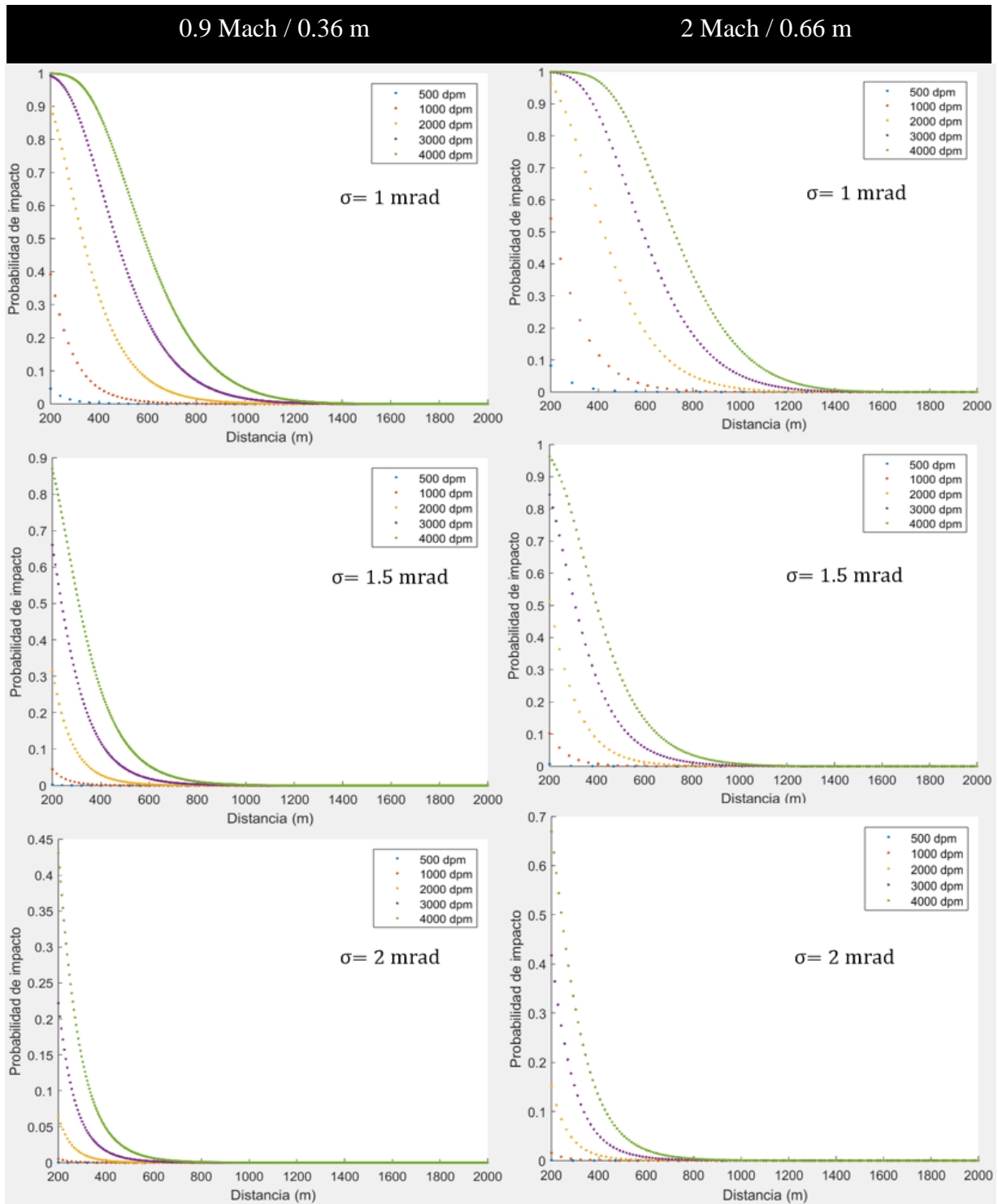


Figura 4-7 Probabilidad al menos 5 impactos en misiles.

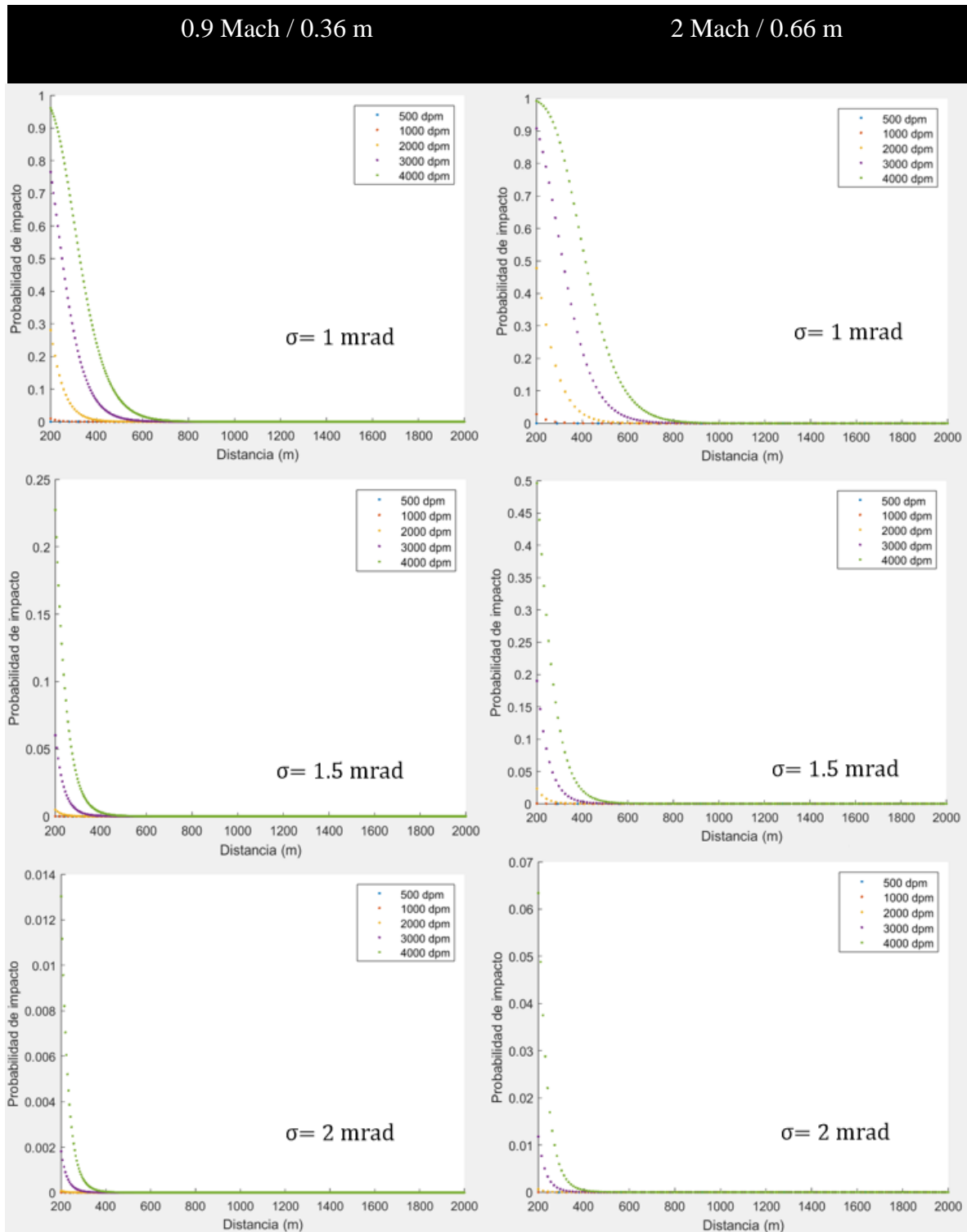


Figura 4-8 Probabilidad al menos 10 impactos en misiles

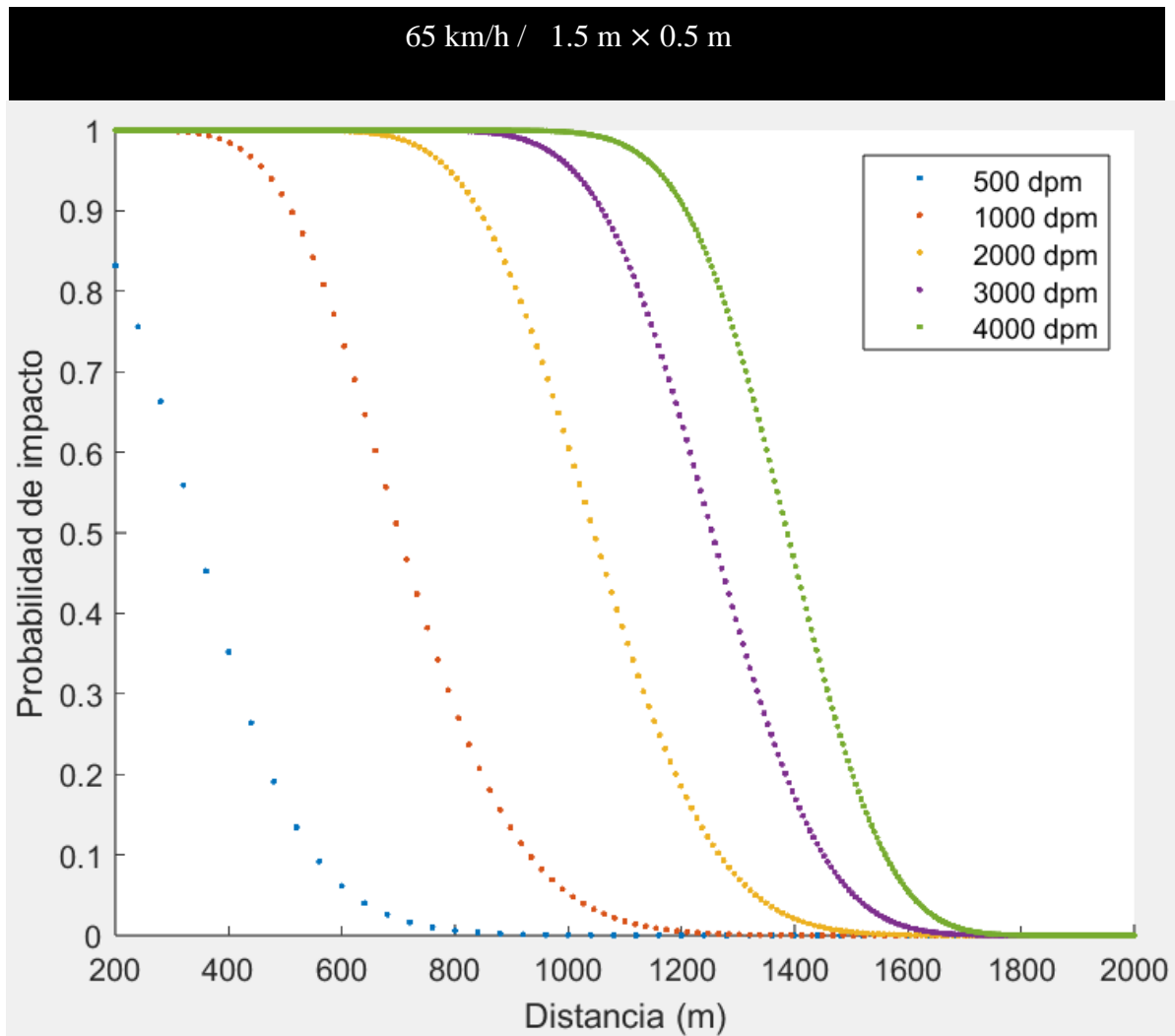


Figura 4-9 Probabilidad de producir 10 impactos en USV 'Maruga V5'

4.2 Simulación mediante método Montecarlo

Una vez que se han calculado todas las probabilidades pertinentes, la simulación se emplea con el propósito de validar la coherencia de los resultados y su correspondencia con la realidad. El objetivo de esta simulación es determinar el promedio de impactos del cañón para cada distancia de impacto. En consecuencia, será posible calcular las probabilidades de que se produzcan al menos 'x' impactos en cualquier blanco antes de alcanzar la distancia de parada. Se han realizado en MATLAB simulaciones de 1000 ataques, calculando un valor promedio de los valores adquiridos en cada una de ellas. Para ello se ha usado el código 'Montecarlo' expuesto en el Anexo VI, cuyo diagrama de flujo se expone a continuación (Figura 4-10).

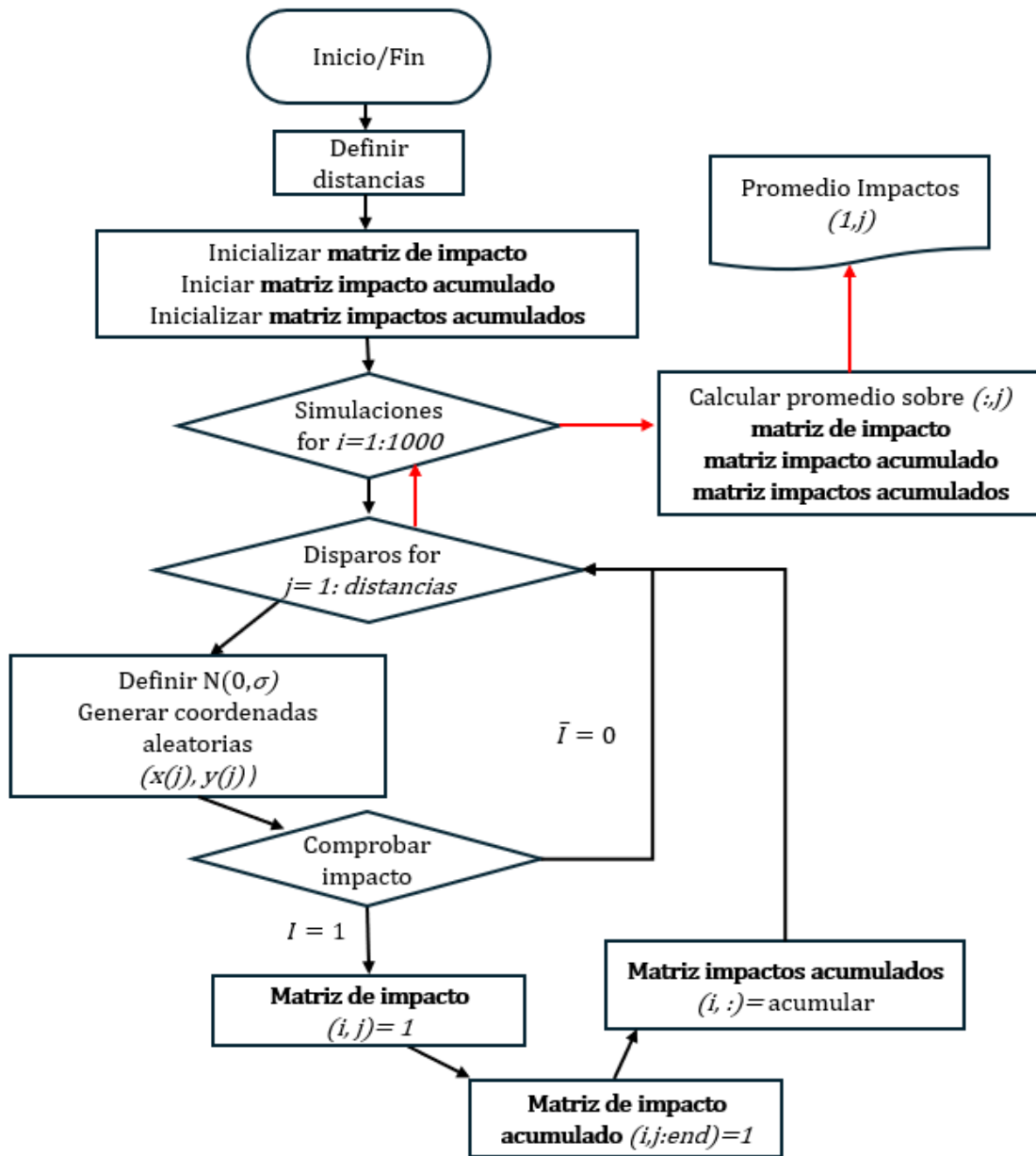


Figura 4-10 Diagrama de flujo simulación utilizando método Montecarlo

En las siguientes gráficas se muestran los resultados obtenidos a través de la simulación en MATLAB siendo comparados, tanto con los cálculos analíticos como con los realizados mediante la aproximación de *Le Cam*. Analizando las dos primeras gráficas se observa cómo para producir ‘al menos un impacto’, situación para la cual se puede realizar el cálculo de manera exacta, mediante la aproximación de *Le Cam* y mediante el método *Monte Carlo*, los resultados son similares, mostrando además que el error producido en la aproximación es del orden de milésimas (Figura 4-11).

Se muestran también los resultados de producir 5 impactos, que han sido calculados únicamente mediante el método aproximado. Ambos resultados, tanto los obtenidos mediante la aproximación usando el *teorema de Le Cam* como los resultados de la simulación utilizando el método *Monte Carlo* toman valores similares, resaltando la coherencia entre los resultados obtenidos mediante diferentes métodos de análisis, lo que respalda la validez y utilidad de las aproximaciones realizadas en el estudio. Por último, se muestra la misma comparación en producir 10 impactos, obteniendo las mismas conclusiones (Figura 4-12).

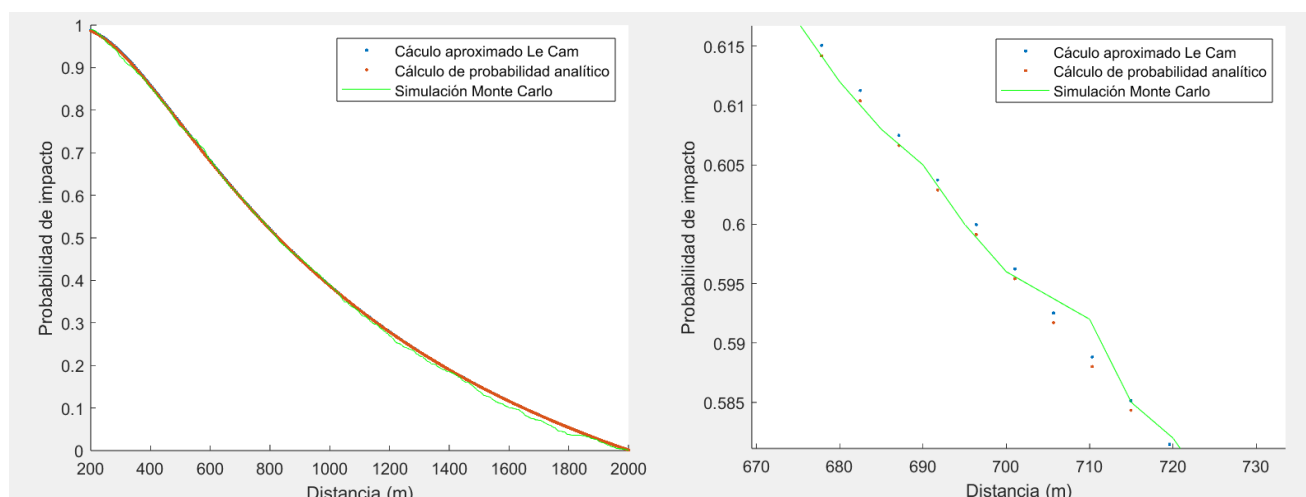


Figura 4-11 Izquierda: Comparación probabilidad acumulada 'al menos un impacto' 4000 dpm, 2 mrad, misil C-802. Derecha: Error producido en aproximaciones

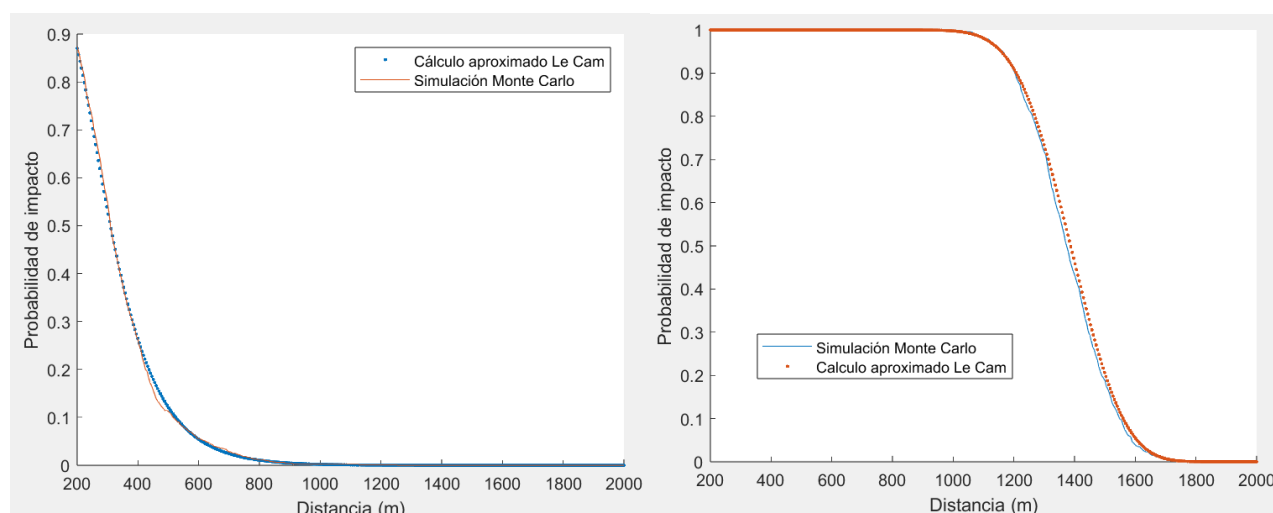


Figura 4-12 Derecha: Comparación aproximación de Le Cam 'al menos 10 impactos' 4000 dpm, 2 mrad. Maruga V5. Izquierda: Comparación aproximación de Le Cam 'al menos 5 impactos' 4000 dpm, 1.5 mrad, misil C-802.

4.3 Dimensionamiento de cargadores

Un sistema de defensa de punto se enfrenta a la posibilidad de que múltiples amenazas, como misiles enemigos, sean lanzados de manera simultánea o en rápida sucesión. En tales escenarios, contar con una reserva adecuada de proyectiles es necesario para que el sistema pueda hacer frente a todas las amenazas y neutralizarlas de manera efectiva. Además, es posible que, debido a fallos mecánicos, errores en el cálculo de trayectoria, o el empleo de contramedidas por parte del enemigo para evadir la interceptación, sea necesario tener una cantidad suficiente de proyectiles que proporcione un margen de error, aumentando la probabilidad de éxito en la defensa contra las amenazas entrantes. En escenarios de conflicto prolongado o situaciones de defensa continua, la capacidad del sistema para mantener su eficacia a lo largo del tiempo implica disponer de una reserva adecuada de proyectiles garantiza que el sistema pueda operar de manera sostenida sin agotar rápidamente la munición.

La cantidad de munición vendrá determinada por los proyectiles necesarios para poder afirmar que el sistema es capaz de neutralizar misiles en un determinado número de enfrentamientos. En este contexto, se considera "neutralizar la amenaza" lograr una probabilidad de impacto superior al 95%.

Puesto que la probabilidad depende de distintos parámetros del sistema y del blanco, existen numerosas soluciones para lograr esta probabilidad. Se busca, por lo tanto, la situación más desfavorable para el sistema, es decir, la que más proyectiles demande para lograr alcanzar una probabilidad superior a 95%. Se ha calculado el número de disparos necesarios para neutralizar un misil en cada situación con intención de encontrar la situación más desfavorable para el CIWS, mostrando los resultados en (Tabla 4-1, Tabla 4-2, Tabla 4-3). Se indica en color verde, el número de disparos necesarios para neutralizar el misil en cada situación, mientras que se utiliza el color rojo para indicar que el misil no es neutralizado bajo esos parámetros de funcionamiento. También se indican las distancias a las que se produce la neutralización en los casos en los que exista, mientras que cuando no se produce se indica la probabilidad de impacto con la que el misil llega a la distancia de parada.

Considerando **que un impacto neutraliza o destruye el misil**, los disparos necesarios para acumular la probabilidad se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 4-1 Consumo de munición. Misil C-802.

0.9 Mach			PROYECTILES NECESARIOS PARA ALCANZAR 95% PROBABILIDAD DE DERRIBO							
			Ritmo de fuego (dpm)							
			4000		3000		2000		1000	
			distancia(m)	n	distancia(m)	n	distancia (m)	n	distancia (m)	n
1 impacto	σ (mrad)	1	738	275	605	228	445	169	255	95
		1.5	400	349	324	274	226	193	Parada (83%)	
		2	251	381	200	294	Parada (86%)		Parada (63%)	
		2.5	Parada (92%)		Parada (84%)		Parada (70%)		Parada (47%)	

Tabla 4-2 Consumo de munición. Misil Moskit.

2 Mach			Ritmo de fuego (dpm)							
			4000		3000		2000		1000	
			distancia(m)	n	distancia (m)	n	distancia (m)	n	distancia (m)	n
1 impacto	σ (mrad)	1	946	103	805	88	597	69	363	40
		1.5	568	140	460	113	325	82	Parada (93%)	
		2	353	161	282	126	200	88	Parada (78%)	
		2.5	251	171	200	132	Parada (85%)		Parada (63%)	

Tabla 4-3 Consumo de munición. Misil Yakhont

3 Mach			Ritmo de fuego (dpm)							
			4000		3000		2000		1000	
			distancia(m)	n	distancia (m)	n	distancia (m)	n	distancia (m)	n
1 impacto	σ (mrad)	1	752	82	613	45	452	51	262	28
		1.5	415	104	334	54	231	58	Parada (83%)	
		2	261	114	200	59	Parada (78%)		Parada (63%)	
		2.5	Parada (92%)		Parada (84%)		Parada (70%)		Parada (47%)	

Si se consideran necesarios **5 impactos para neutralizar o destruir el misil**, se obtienen los siguientes resultados. (Tabla 4-4, Tabla 4-5, Tabla 4-6)

Tabla 4-4 Consumo de munición. 5 impactos misil C-802

0.9 Mach			Ritmo de fuego (dpm)							
			4000		3000		2000		1000	
			distancia(m)	n	distancia (m)	n	distancia (m)	n	distancia (m)	n
5 impacto	σ (mrad)	1	339	362	262	284	Parada (87%)		Parada (38%)	
		1.5	Parada (87%)		Parada (67%)		Parada (31%)		Parada (4%)	
		2	Parada (44%)		Parada (22%)		Parada (7%)		Parada (1%)	

Tabla 4-5 Consumo de munición. 5 impactos misil Moskit

2 Mach			Ritmo de fuego (dpm)							
			4000		3000		2000		1000	
			distancia(m)	n	distancia (m)	n	distancia (m)	n	distancia (m)	n
5 impacto	σ (mrad)	1	425	154	262	128	200	77	Parada (53%)	
		1.5	210	176	Parada (84%)		Parada (52%)		Parada (11%)	
		2	Parada (68%)		Parada (43%)		Parada (15%)		Parada (3%)	

Tabla 4-6 Consumo de munición. 5 impactos misil Yakhont

3 Mach			Ritmo de fuego (dpm)							
			4000		3000		2000		1000	
			distancia(m)	n	distancia (m)	n	distancia (m)	n	distancia (m)	n
5 impacto	σ (mrad)	1	292	112	200	59	Parada (76%)		Parada (23%)	
		1.5	Parada (87%)		Parada (67%)		Parada (31%)		Parada (4%)	
		2	Parada (44%)		Parada (22%)		Parada (7%)		Parada (1%)	

Se observa como la situación que más munición demanda es el enfrentamiento contra misiles de reducido tamaño como el C-802 (Tabla 4-1), utilizando por lo tanto estos consumos para el dimensionamiento de los cargadores.

Como se ha comentado anteriormente, el CIWS se enfrenta a la posibilidad de que múltiples misiles sean lanzados de manera simultánea o en rápida sucesión. Un ejemplo real de esto son los ataques que sufrió el destructor americano *USS Mason* de dos misiles C-802 lanzados por los rebeldes Hutíes en 2016, para los que necesitó tres misiles interceptores en el enfrentamiento [36] . Otro ejemplo es el ataque mencionado en el apartado 1.2.1 de las fuerzas ucranianas al crucero *Movska* con dos misiles *Neptunel*. Se presenta por lo tanto en la siguiente gráfica la munición necesaria para enfrentar con una probabilidad de éxito de 95% hasta 2, 3 y 4 misiles en base a los datos asociados al máximo ritmo de fuego (4000 dpm) de la Tabla 4-1, obteniendo las siguientes dimensiones.

Si se requiere al sistema la capacidad de realizar 2 enfrentamientos en rápida sucesión el cargador debe tener capacidad para 800 proyectiles. Sin embargo, esta dimensión puede ser poco prudente pues no sería suficiente para actuar en entornos de combate saturados. Si en cambio, se requiere un sistema capaz de enfrentar hasta 3 o 4 misiles rozaolas con las probabilidades de éxito mencionadas anteriormente, la capacidad asciende a los 1200 o 1600 proyectiles, en cada caso (Figura 4-13). Quizás la probabilidad de que hasta 4 misiles superen todas las capas de defensa teniendo la necesidad de enfrentarlos con el CIWS es baja. Sin embargo, es posible que haya otras implicaciones tácticas que influyan en el consumo de munición, por lo tanto, para esperar máxima eficacia y no necesitar escatimar en munición en ninguna situación que requiera del uso de CIWS la capacidad debe ser al menos de 1600 proyectiles.

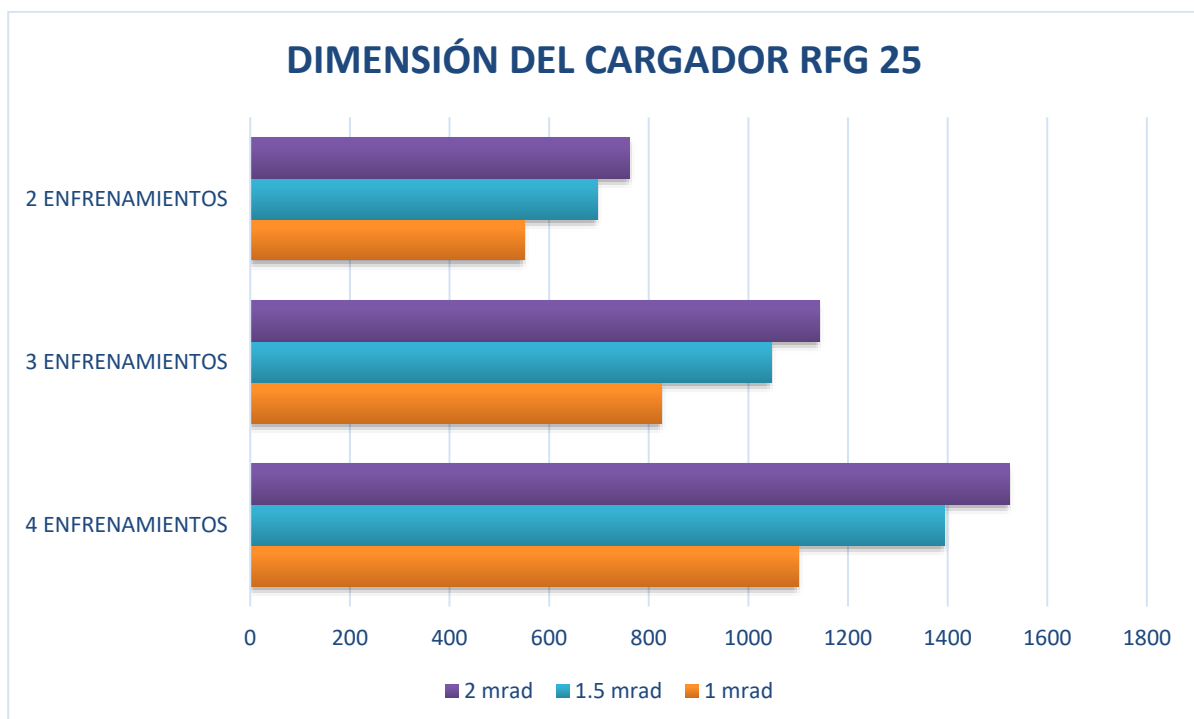


Figura 4-13 Posibles dimensiones de cargadores para RFG25

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Los buques de la Armada afrontan una época de constante cambio donde el desarrollo de sistemas de armas elaborados por la industria nacional es indispensable para poder adaptarse al exigente entorno que la rodea. Este estudio ha tratado de establecer conclusiones sobre la efectividad del sistema de defensa de punto *Sentinel RFG 25* de manera teórica, utilizando las matemáticas como herramienta fundamental.

Analizando las capacidades, el trabajo demuestra que los sistemas de defensa de punto son los únicos sistemas de artillería aptos para enfrentar con altas probabilidades de éxito cualquier amenaza en la última capa de defensa de un buque. Esto se debe a que son los únicos capaces de generar cadencias de fuego lo suficientemente altas para asegurar que se impacta en el blanco una vez ha sido detectado, adquirido y designado a un arma para ser enfrentado.

A raíz del estudio, se aprecia que el sistema *RFG25* no es eficiente si se utiliza para distancias superiores a 2000 metros puesto que esto supondría un elevado gasto de munición para una reducida efectividad. Esto se debe a que la dispersión de los disparos a esas distancias es demasiado grande, haciendo que las probabilidades de impactos sean muy pequeñas. Para distancias superiores conviene realizar otras acciones defensivas.

Analizando otros parámetros del cañón que se puede comprobar es fundamental que un sistema de defensa de punto utilice cadencias de fuego muy elevadas y su dispersión sea mínima. El ritmo de fuego ha demostrado ser determinante en el cálculo de probabilidades de impacto, sin embargo, también se observa que tiene que ser utilizado de manera óptima para reducir los altos consumos de munición que el sistema demanda. Se ha demostrado, que tan importante es la cadencia de fuego, como el rápido centrado del tiro en el blanco y mantener una reducida dispersión. Es posible que a nivel experimental exista una relación entre el ritmo de fuego del cañón y la dispersión de este. En el capítulo anterior se observó cómo el sistema era más efectivo reduciendo su cadencia máxima a 3000 dpm, si se esta reducción venía acompañada de disminución de su dispersión a 1.5 mrad. Esto muestra que existe un punto óptimo de funcionamiento para el que convendría reducir la cadencia si esto produjese una disminución notable del valor de dispersión.

Comparando la efectividad del sistema sobre distintos blancos se puede afirmar que el principal obstáculo del sistema está en los enfrentamientos contra blancos de reducido tamaño como el C-802 ya que la probabilidad de impacto es menor que la obtenida ante misiles supersónicos aun permitiendo estos un menor tiempo de apertura de fuego. Esta conclusión puede ser poco intuitiva, sin embargo, la ventaja de los misiles supersónicos está en su dificultad para ser detectados, y adquiridos para su posterior enfrentamiento, cuya capacidad del sistema no se ha tenido en cuenta durante el trabajo.

Por último, la necesidad de dimensionar los cargadores adecuadamente se destaca, con un énfasis en la capacidad de enfrentar ataques con hasta cuatro misiles, dada la posibilidad de escenarios realistas donde múltiples amenazas pueden surgir rápidamente. Aunque la probabilidad de enfrentar cuatro misiles de manera simultánea puede parecer baja, consideraciones tácticas y la necesidad de máxima eficacia sugieren que la capacidad de munición debe ser al menos de 1600 proyectiles para garantizar la efectividad en todas las situaciones de combate que requieran el uso del *CIWS*.

5.1 Líneas futuras

Una vez concluidos los objetivos propuestos en el presente trabajo de fin de grado, se describen en este apartado diferentes estudios propuestos como continuación de las líneas de investigación seguidas durante el trabajo.

-Estudiar la efectividad de un posible sistema de adquisición blancos. Este estudio se centrará en calcular las probabilidades de detección adquisición y correcto seguimiento de objetivos previo al enfrentamiento con el fin de aproximar más el cálculo de probabilidades de destrucción y neutralización de misiles mediante el *CIWS*.

-Estudiar la efectividad de los sistemas de energía dirigida (SED) como sistemas de defensa de punto, que incluya: precisión, capacidad de destrucción, capacidad de integración con otros sistemas actuales. Esta es un área de investigación crucial en la guerra moderna como posible sistema adjunto y/o sustituto de los actuales sistemas de defensa de punto.

-Realizar un estudio sobre la implementación de una Inteligencia artificial, como apoyo a la decisión en entornos saturados de combate, como los que se tienen al ser atacados por enjambres de UAV, USV, misiles etc. Generar distintos algoritmos encargados de determinar el nivel de amenaza según el tamaño y la velocidad del blanco, utilizando parámetros predefinidos. Basándose en esta evaluación, podría emitir órdenes de enfrentamiento apropiadas, que incluyan la selección de armas específicas y la coordinación de ataques utilizando las armas más adecuadas para cada situación con el objetivo de ofrecer soluciones óptimas para abordar un número específico de objetivos al mismo tiempo.

-Realizar un estudio de balística de efectos sobre los daños producidos en distintos blancos por distintos tipos de munición. Este tipo de estudio también puede incluir pruebas de campo o simulaciones computarizadas para replicar condiciones de combate realistas y evaluar el rendimiento de la munición en escenarios específicos frente a determinados blancos.

6 BIBLIOGRAFÍA

[1] C. Echeverría Jesús, «El empleo del mar en las estrategias de las organizaciones terroristas», *Bie3 Bol. IEEE*, n.º 8, pp. 916-930, 2017.

[2] «La guerra en Yemen: una crisis humanitaria desatendida. Revista de Relaciones Internacionales de la UNAM, núm. 132, septiembre-diciembre de 2018, pp. 123-156.», 2018.

[3] «German Remotely Piloted Bombs | Proceedings - November 1976 Vol. 102/11/885». Accedido: 10 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.usni.org/magazines/proceedings/1976/november/german-remotely-piloted-bombs>

[4] «Aftermath of the Elath», U.S. Naval Institute. Accedido: 20 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.usni.org/magazines/proceedings/1969/october/aftermath-elath>

[5] G. J. Astaburuaga, «MISILES TÁCTICOS ANTIBUQUE MODERNOS» Revista de Marina 1/2007, Chile.

[6] M. P. Garat, «EL HUNDIMIENTO DEL HMS SHEFFIELD» Revista general de marina, ISSN 0034-9569, Vol. 265, MES 11 (Noviembre), 2013, págs. 669-682.

[7] A. B. Ordovás, «MALVINAS, HACE TREINTA AÑOS» Revista general de marina, ISSN 0034-9569, Vol. 264, MES 6 (Junio), 2013, págs. 795-802.

[8] S. LaGrone, «The Attack on USS Stark at 30», USNI News. Accedido: 11 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://news.usni.org/2017/05/17/the-attack-uss-stark-at-30>

[9] J. M. B. Navarro, «Hezbollah, el partido de Dios» Documento de investigación 01/2015 colección: grupos militantes de ideología radical y carácter violento área 2. región “Mena” y Asia Central, hasta la región autónoma Uigur de Sinkiang.».

[10] S. LaGrone, «Warship Moskva was Blind to Ukrainian Missile Attack, Analysis Shows», USNI News. Accedido: 11 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://news.usni.org/2022/05/05/warship-moskva-was-blind-to-ukrainian-missile-attack-analysis-shows>

[11] Defense of Ukraine «Another bad day for the russian Black Sea fleet. @DI_Ukraine released a video of the attack on the russian warship “Sergei Kotov”. <https://t.co/UTmt3eBDXO>», Twitter. Accedido: 21 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://twitter.com/DefenceU/status/1764936271439241421>

[12] «Magura V5. Що відомо про морські дрони, якими Україна може атакувати Росію», BBC News Україна. Accedido: 21 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbc.com/ukrainian/articles/clew6ee5nx8o>

- [13] UN Security Council resolution 2722 (10th January 2024) «On Attacks by Houthis on merchant and commercial vessels».
- [14] «Operación Aspides: la UE despliega en el mar Rojo», Real Instituto Elcano. Accedido: 29 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.realinstitutoelcano.org/comentarios/operacion-aspides-la-ue-despliega-en-el-mar-rojo/>
- [15] «Estrategia industrial de defensa 2023», Castellano. Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://publicaciones.defensa.gob.es/estrategia-industrial-de-defensa-2023.html>
- [16] «NATO Review - El concepto estratégico de Madrid y el futuro de la OTAN». Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.nato.int/docu/review/articles/2022/06/02/el-concepto-estrategico-de-madrid-y-el-futuro-de-la-otan/index.html>
- [17] «Estrategia de tecnología e innovación para la Defensa ETID - 2020», Castellano. Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://publicaciones.defensa.gob.es/estrategia-de-tecnologia-e-innovacion-para-la-defensa-etid-2020-libros-pdf.html>
- [18] «Phalanx System». Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.rtx.com/raytheon/what-we-do/sea/phalanx-close-in-weapon-system>
- [19] «Goalkeeper - close-in weapon system | Thales Group». Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.thalesgroup.com/en/goalkeeper-close-weapon-system>
- [20] «B036e0222-Oerlikon-Millennium-Gun-System.pdf». Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.rheinmetall.com/Rheinmetall%20Group/brochure-download/Air-Defence/B036e0222-Oerlikon-Millennium-Gun-System.pdf>
- [21] «B038e0823-Oerlikon-Ahead-Air-Burst-ammunition.pdf». Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.rheinmetall.com/Rheinmetall%20Group/brochure-download/Weapon-Ammunition/B038e0823-Oerlikon-Ahead-Air-Burst-ammunition.pdf>
- [22] «The Origins and Development of. Operational Research in the Royal Air Force» AIR MINISTRY. Air Publication 3368.
- [23] «La OTAN, la Investigación Operativa y el pendulo», Revista general de marina, ISSN 0034-9569, Vol. 264, MES 4 (Abril), 2013, págs. 473-480».
- [24] M. F. Cancian, «Aid to Ukraine: Much More Than Tanks», feb. 2023, Accedido: 13 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.csis.org/analysis/aid-ukraine-much-more-tanks>
- [25] «La UE calcula que en 12 meses su capacidad de producción anual de obuses aumentará hasta un millón de proyectiles», ELMUNDO. Accedido: 13 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.elmundo.es/internacional/2023/05/02/64514eccfc6c83063b8b45ab.html>
- [26] «MathWorks - Founders - Cleve Moler». Accedido: 29 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/company/aboutus/founders/clevemoler.html>
- [27] «What Is MATLAB?» Accedido: 29 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/discovery/what-is-matlab.html>
- [28] «Aircraft Guns and Gun Systems - 25mm Gatling Gun Systems», General Dynamics Ordnance and Tactical Systems. Accedido: 1 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gd-ots.com/armaments/aircraft-guns-gun-systems/>.
- [29] D. Dutta, «Probabilistic Analysis of Anti-Ship Missile Defence Effectiveness», *Def. Sci. J.*, vol. 64, n.º 2, pp. 123-129, mar. 2014, doi: 10.14429/dsj.64.3532.
- [30] «D-SF-01 "Principios básicos de enfrentamiento al cañón"», Publicaciones tácticas de la Armada, Capítulo 5, 0502 'Probabilidades aplicadas a las dispersiones'».

- [31] L. Le Cam, «An approximation theorem for the Poisson binomial distribution», *Pac. J. Math.*, vol. 10, n.º 4, pp. 1181-1197, dic. 1960, doi: 10.2140/pjm.1960.10.1181.
- [32] «J. Micheal Steele «Le Cam's Inequality and Poisson Approximations», *The American Mathematical Monthly*, Vol. 101, No. 1 (Jan., 1994), pp. 48-54».
- [33] L. Le Cam, «An approximation theorem for the Poisson binomial distribution», *Pac. J. Math.*, vol. 10, n.º 4, pp. 1181-1197, dic. 1960, doi: 10.2140/pjm.1960.10.1181.
- [34] T. Ozberk, «Ukraine's Magura V5 USV on the stage at DSEI 2023», *Naval News*. Accedido: 24 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.navalnews.com/event-news/dsei-2023/2023/09/ukraines-magura-v5-usv-on-the-stage-at-dsei-2023/>
- [35] J. I. Illana, «Métodos Monte Carlo». Departamento de Física Teórica y del Cosmos Universidad de Granada, 2013».
- [36] S. LaGrone, «USS Mason Fired 3 Missiles to Defend From Yemen Cruise Missiles Attack», *USNI News*. Accedido: 31 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://news.usni.org/2016/10/11/uss-mason-fired-3-missiles-to-defend-from-yemen-cruise-missiles-attack>
- [37] «Acuerdo para financiar 1.638 millones de las fragatas F-110», *ABC Blogs*. Accedido: 30 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://abcblogs.abc.es/tierra-mar-aire/espana/acuerdo-para-financiar-1-638-millones-de-las-fragatas-f-110.html>
- [38] «Republic of Korea – MK 15 MOD 25 Phalanx Close-In Weapons System (CIWS) Block 1B Baseline 2 (1B2) System | Defense Security Cooperation Agency». Accedido: 30 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.dsca.mil/press-media/major-arms-sales/republic-korea-mk-15-mod-25-phalanx-close-weapons-system-ciws-block-1b>
- [39] «UNCLASSIFIED Budget». Accedido: 30 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.dacis.com/budget/budget_pdf/FY20/PROC/N/0270_11.pdf
- [40] «Mar Rojo: el complejo y costoso desvío de 6.500 km que deben tomar los grandes cargueros para evitar los ataques», *BBC News Mundo*. Accedido: 30 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/articles/cxx5g16w7r9o>
- [41] «Dilema de seguridad», *Global Strategy*. Accedido: 31 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://global-strategy.org/dilema-seguridad/>
- [42] «Explained: Sigma | MIT News | Massachusetts Institute of Technology». Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://news.mit.edu/2012/explained-sigma-0209>
- [43] «DISTRIBUCIÓN DE POISSON». Accedido: 24 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.uv.es/ceaces/base/modelos%20de%20probabilidad/poisson.h>
- [44] «Arma de Fuego. Balística». Accedido: 24 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/9439/Arma%20de%20Fuego.%20Bal%C3%ADstica.pdf?se#:~:text=Es%20Ciencia%20por%20que%20forma,principio%20a%20las%20leyes%20f%C3%ADsicas.>

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

Los avances tecnológicos experimentados en los últimos años implican la responsabilidad y la consideración de las consecuencias sociales, ambientales y económicas que estos pueda traer consigo.

El desarrollo de armas por la industria nacional conlleva una serie de implicaciones sociales significativas. Por un lado, este sector suele ser un importante motor de generación de empleo, ofreciendo oportunidades laborales en áreas como la ingeniería, la fabricación, la logística y la gestión. Estos empleos no solo contribuyen al sustento económico de la industria del país. Además, el fomentan la investigación, el desarrollo y la innovación (I+D+i) en el ámbito de defensa que impulsa avances tecnológicos que pueden tener aplicaciones más amplias en otros sectores de la economía, estimulando así la competitividad y el crecimiento de la industria nacional.

Además, se debe considerar el posible impacto ambiental de la fabricación y el uso de armas, así como la gestión de los residuos y desechos generados durante la experimentación, que debe ser abordado de manera responsable para mitigar cualquier efecto negativo en el medio ambiente y en las comunidades locales, promoviendo un desarrollo sostenible.

Las consecuencias Económicas en el uso de los sistemas de defensa de punto son dignas de mencionar pues estos pueden suponer el ahorro de la inversión en un nuevo buque. Las cinco nuevas fragatas F-110 construidas por *Navantia*, tendrán un coste estimado de 4.300 millones de euros [37]. El precio de un sistema de defensa de punto adquirido en un país extranjero ronda los 20 millones en el caso de la última obtención del *Phalanx* por la República de Corea del sur, incluyendo munición, adiestramiento de personal e instalación [38]. Hablando de buques que rondan los 1000 millones de euros invertir en sistemas de defensa de punto puede resultar una decisión prudente y acertada a nivel económico especialmente si son desarrollados bajo la industria nacional.

Los precios de misiles interceptores superan el millón de euros la unidad (Figura A1-0-1), mientras que cada proyectil utilizado por un *CIWS* como el *Vulcan Phalanx* ronda los 30 euros (Figura A1-0-2) [39], que implica un coste aproximado de más de 5000 euros en cada enfrentamiento ante un misil. Sin embargo, quizás la cuestión no deba estar en el costo de los sistemas de defensa sino en el costo de lo que se está defendiendo. En el caso actual del conflicto del Mar Rojo invertir en sistemas defensa antimisil es necesario para que los buques de guerra puedan realizar sus labores de defensa y seguridad, evitando así costos adicionales como los que se exponen a continuación. El valor de la carga transportada por los buques que transitan el Mar Rojo pueden alcanzar cifras de millones e incluso cientos de millones de dólares. Por esta razón, no es sorprendente que, en muchos casos, las navieras opten por enviar sus buques por rutas alternativas. Sin embargo, alejarse del Mar Rojo y tomar el largo desvío alrededor del Cabo de Buena Esperanza (África) agrega alrededor de 3.500 millas náuticas (6.500 km) y de 10 a 12 días de navegación a cada viaje. Este cambio conlleva la necesidad de combustible adicional (con un costo estimado adicional de hasta un millón de dólares) [40].

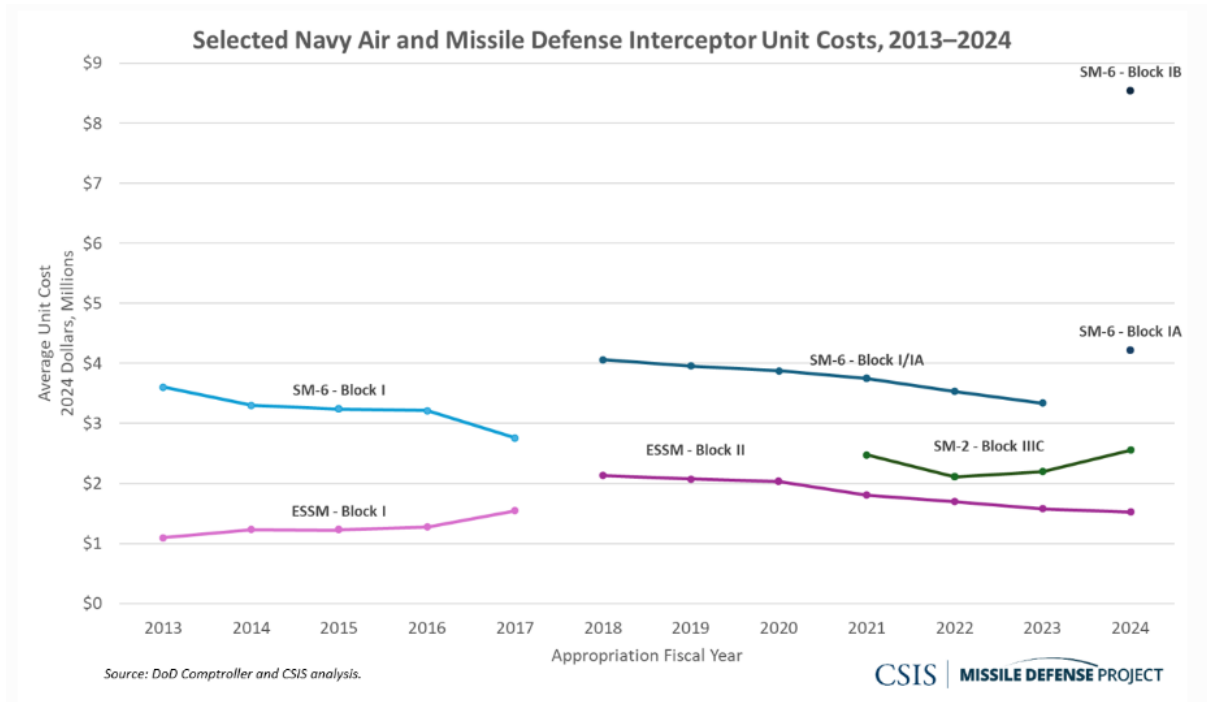


Figura A1-0-1 Precio unitario de misiles interceptores. (Fuente: Center for Strategic and International Studies (CSIS))

UNCLASSIFIED

Exhibit P-5a, Procurement History and Planning: PB 2020 Navy										Date: March 2019			
Appropriation / Budget Activity / Budget Sub Activity:				P-1 Line Item Number / Title:				Item Number / Title [DODIC]:					
1508N / 01 / 1				0270 / Other Ship Gun Ammunition				1 / Integrated Warfare Systems					
Cost Elements	O C O	FY	Contractor and Location	Method/Type or Funding Vehicle	Location of PCO	Award Date	Date of First Delivery	Qty (Each)	Unit Cost (\$)	Specs Avail Now?	Date Revision Available	RFP Issue Date	
5.1.2) CART., 20MM MK 244 ELC (AA61) ^(f)		2017	GD-OTS / MARION, IL	C / FFP	JMC ROCK ISLAND	Sep 2017	Jul 2018	478,850	30.84	Y		Dec 2012	
5.1.2) CART., 20MM MK 244 ELC (AA61) ^(f)		2018	TBD / TBD	C / FFP	JMC ROCK ISLAND	Mar 2019	Dec 2020	588,203	33.40	Y		Oct 2017	
5.1.2) CART., 20MM MK 244 ELC (AA61) ^(f)		2019	TBD / TBD	C / FFP	JMC ROCK ISLAND	Mar 2019	Dec 2020	568,500	33.40	Y		Oct 2017	
5.1.2) CART., 20MM MK 244 ELC (AA61) ^(f)	✓	2020	TBD / TBD	C / FFP	JMC ROCK ISLAND	Mar 2020	Dec 2021	491,300	34.04	Y		Oct 2017	

Figura A1-0-2 Precio de munición MK244 (Fuente: USAF Budget)

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

En el desarrollo de nuevas tecnologías especialmente si estas están relacionadas con defensa y seguridad, es importante no solo evaluar su eficacia militar, sino también abordar cuestiones éticas de manera integral y considerar el impacto a largo plazo de las decisiones tomadas, con sus posibles implicaciones en términos de estabilidad internacional, y cumplimiento de derechos humanos.

El desarrollo de armamento puede plantear ciertas cuestiones éticas relacionadas con el dilema de seguridad. El dilema de seguridad hace referencia a la situación que se produce cuando un actor, tratando de mejorar su seguridad, adopta medidas que sin pretenderlo son consideradas como amenazantes por otro actor que, al reaccionar, perjudica la seguridad del primero [41]. Sin embargo, este dilema no suele plantearse de la misma manera en el desarrollo de sistemas de armas defensivos, pues la razón de armarse no supondría una amenaza para ningún actor. Los *CIWS*, como se ha expuesto a lo largo del trabajo, están diseñados específicamente para proteger unidades contra amenazas entrantes hostiles, y no tienen capacidad inherente para llevar a cabo ataques ofensivos.

El sistema de defensa de punto estudiado en el presente trabajo se adhiere a los principios éticos fundamentales del *Ius in bello*, que son un conjunto de normas y principios éticos que sirven como guía de conducta en cualquier conflicto armado. Uno de los principios clave del *Ius in bello* es la proporcionalidad en el uso de la fuerza. Esto significa que las acciones militares deben ser proporcionales al objetivo legítimo que se busca alcanzar. En el contexto del sistema de defensa de punto estudiado, esto implica que las medidas defensivas implementadas deben ser proporcionales a la amenaza percibida. Por ejemplo, el uso de armamento defensivo debería limitarse a la defensa contra amenazas reales y no debería emplearse de manera excesiva o desproporcionada.

Otro principio importante del *Ius in bello* es la prohibición de ataques indiscriminados. Esto significa que las partes en conflicto deben tomar todas las precauciones posibles para evitar causar daño innecesario a civiles y a bienes de carácter civil. En el caso del sistema de defensa de punto, esto implica que las operaciones defensivas deben estar dirigidas específicamente hacia las amenazas identificadas y no deben poner en riesgo indiscriminadamente a la población civil o a infraestructuras no militares.

En resumen, el sistema de defensa de punto estudiado se alinea con los principios éticos del *Ius in bello* al adherirse a la proporcionalidad en el uso de la fuerza, la prohibición de ataques indiscriminados y el respeto por la dignidad humana incluso en tiempos de guerra. Esto garantiza que las acciones militares sean éticas y humanitarias, incluso en situaciones de conflicto armado.

ANEXO III: USO DE LA DISTRIBUCIÓN NORMAL

La distribución normal o de Gauss es una función de densidad de probabilidad utilizada en muchos campos de investigación por su capacidad para modelar datos presentados en la naturaleza (Figura A3-0-1). La distribución de Gauss, más comúnmente conocida como ‘campana de Gauss’ dado a su forma, está completamente determinada por dos parámetros: su media y su desviación estándar, denotadas como ‘ μ ’ y ‘ σ ’ respectivamente. Se dice que una variable sigue una distribución normal de media μ y desviación típica σ , y se denota como:

$$X \sim N(\mu, \sigma)$$

si su función de densidad viene dada por la siguiente ecuación:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad x \in (-\infty, \infty)$$

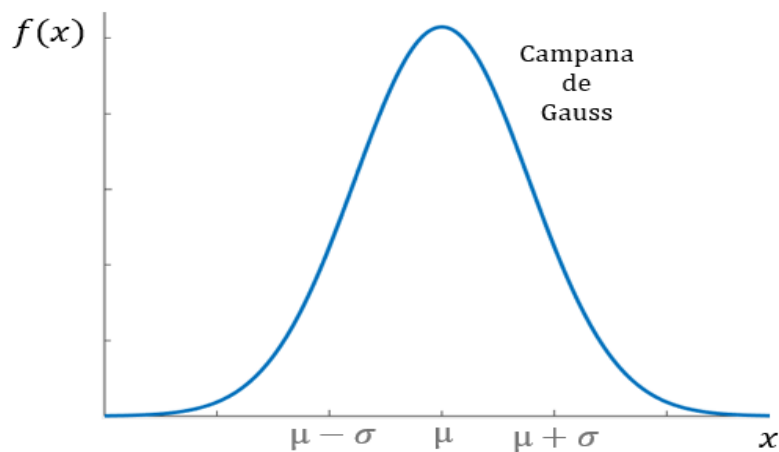


Figura A3-0-1 Función de densidad

La distribución normal es simétrica respecto a la media, siendo este valor central, coincidente con la moda y mediana. La media determina la posición de la campana en abscisas, mientras que la desviación típica mide la dispersión de los datos. A mayor desviación típica, mayor dispersión y más plana será la curva. Independientemente de la forma de la curva, la distribución de los datos respecto a la media mantiene las siguientes proporciones según el teorema de Cheychev [42] (Figura A3-0-2).

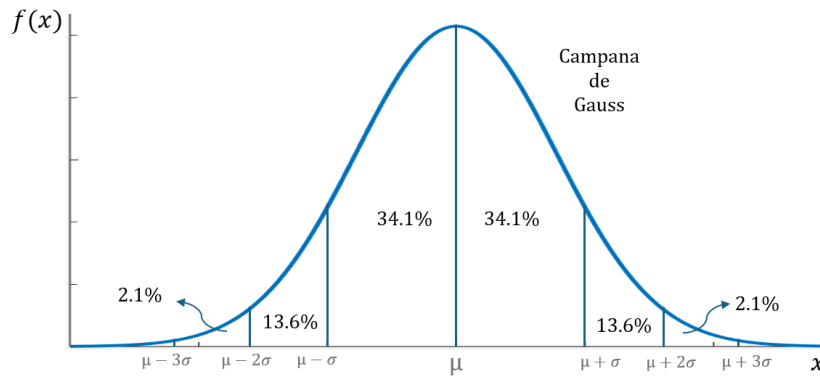


Figura A3-0-2 Campana de Gauss. Teorema Chevychev

El área bajo la curva de la distribución normal y sobre el eje horizontal tiende a 1 a medida que nos alejamos infinitamente en ambas direcciones del eje x. Esto se debe a que la curva abarca todos los posibles valores que puede tomar la variable distribuida. Para calcular la probabilidad de que un valor aleatorio pertenezca a un intervalo (x_1, x_2) en la distribución normal, basta con realizar la integral de la función de densidad de probabilidad sobre ese intervalo.

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx$$

De entre todas las distribuciones normales, la más utilizada es la distribución normal estándar, que corresponde a una distribución de media 0 y desviación típica 1. Esto facilita mucho los cálculos con la función simplificándola de la siguiente manera:

$$X \sim N(0, 1)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x)^2}{2}} \quad x \in (-\infty, \infty)$$

Existen unas tablas a través de las cuales se puede obtener la probabilidad de que al obtener un valor aleatorio de $x \in X \sim N(0, 1)$, este sea menor o igual que cierto valor x_n (Figura A3-0-3).

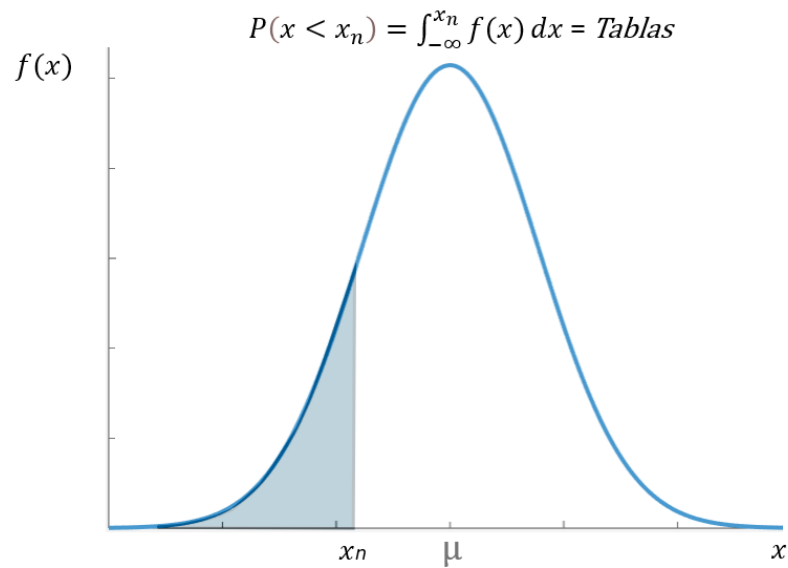


Figura A3-0-3 Cálculo probabilidad en la distribución normal estándar

Es importante conocer que, a partir de cualquier variable 'X' que siga una distribución $N(\mu, \sigma)$, se puede obtener otra variable 'Z' que siga una distribución $N(0, 1)$, realizando lo que se conoce como tipificación:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Esto simplifica mucho los cálculos de probabilidades realizados para cada distribución normal, tipificando su variable a un variable que siga una distribución normal estándar y obteniendo los valores de las probabilidades en las tablas.

ANEXO IV: USO DE LA DISTRIBUCIÓN POISSON

La distribución de Poisson es una de las distribuciones más importantes de variable discreta. Sus principales aplicaciones hacen referencia a la modelización de situaciones en las que nos interesa determinar el número de hechos de cierto tipo que se pueden producir en un intervalo de tiempo o de espacio u otra medida, bajo presupuestos de aleatoriedad y ciertas circunstancias restrictivas [43]. El modelo de distribución de Poisson sirve para definir variables aleatorias discretas que representan el número de ocurrencias de un fenómeno durante un periodo de tiempo fijo o una región fija del espacio. (Figura A4-0-1)

Sea ‘X’ una variable aleatoria discreta, se dice que sigue una distribución de Poisson de parámetro λ , si su función de probabilidad viene definida por la siguiente función de masa de probabilidad.

$$X \sim Ps(\lambda) \qquad F(X = x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}$$

donde ‘x’ denota un número entero positivo y lambda ‘ λ ’ el valor promedio en el intervalo estudiado, media, y varianza de la distribución.

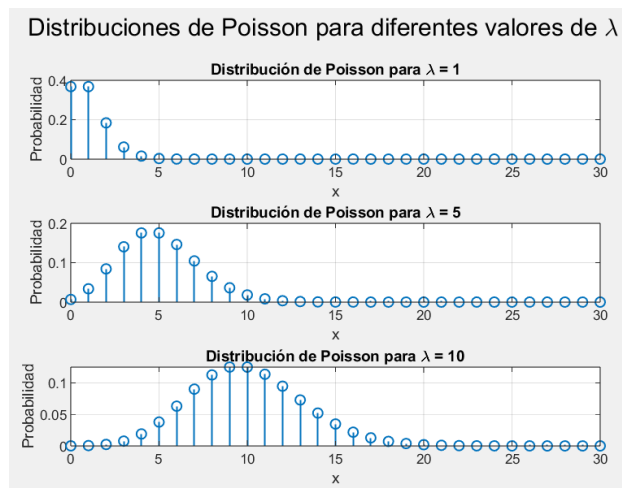


Figura A4-0-1 Distribución de Poisson para distintos valores de λ

La variable aleatoria debe de cumplir las siguientes condiciones para poder distribuirse según una Poisson.

- Los sucesos ocurren de manera independiente, es decir, si un evento ocurre, no afecta la probabilidad de que ocurra otro evento en ese intervalo de tiempo o medida.
- Un suceso puede ocurrir cualquier número de veces durante un período de tiempo o medida.
- La probabilidad de éxito es constante; es decir, la probabilidad no varía según el valor del tiempo o medida.
- La probabilidad de que ocurra un suceso es proporcional a la duración del intervalo de tiempo o medida.

ANEXO V: MUNICIÓN PERFORANTE.

La balística forma un auténtico cuerpo de doctrina sobre el conocimiento de las causas, principios y resultados en relación con el comportamiento de los proyectiles sometidos en principio a las leyes físicas. La balística se divide en tres campos de estudio distintos. Balística interna, externa y de efectos. La balística interna estudia los fenómenos que se producen en el interior del arma. La balística externa se ocupa del comportamiento del proyectil desde que abandona la boca de fuego hasta su impacto en un objeto o blanco. La balística de efectos estudia el comportamiento del proyectil desde que incide en el blanco hasta que se detiene, principalmente el poder de penetración y el poder de parada [44].

Tanto la balística exterior como la balística de efectos de la munición utilizada por un sistema de armas tiene gran importancia en la probabilidad de impacto y destrucción de cualquier blanco. Para poder afirmar que el blanco es penetrado al impactar en él, los sistemas de defensa de punto utilizan municiones especializadas en perforación, puesto que la efectividad de la munición perforante depende en gran medida de la energía cinética del proyectil en el momento del impacto. Para ello, estos proyectiles deben tener velocidades iniciales muy altas, la cual alcanzan gracias al uso de sabots (Figura A5-0-1), que permiten que el proyectil sea disparado desde un cañón de mayor calibre que el mismo, además, suelen estar fabricados con metales muy pesados como el Tungsteno o el Uranio empobrecido para aumentar así su energía cinética en el momento del impacto.

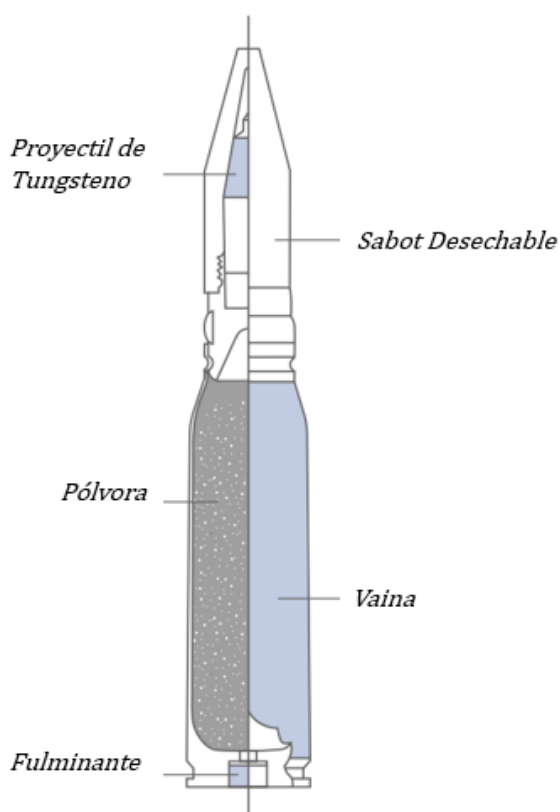


Figura A5-0-1 Esquema munición Perforante

General Dynamics ha experimentado con distintas municiones perforantes (*Armor-Piercing Discarding Sabot: APDS*) (Figura A5-0-2) como la *MK149* frente a munición común como la *M50* en el Vulcan Phalanx demostrando un notable aumento de velocidad y alcance cuando se hace uso de la munición *APDS* (Figura A5-0-3). La última versión de munición perforante para el sistema, la *MK244*, utiliza proyectiles de tungsteno un 48% más pesados que las de su anterior versión, consiguiendo no solo aumentar la energía cinética si no también disminuir su dispersión como se muestra en la Figura A5-0-4.



Figura A5-0-2. De izquierda a derecha, MK244, MK149, M50.

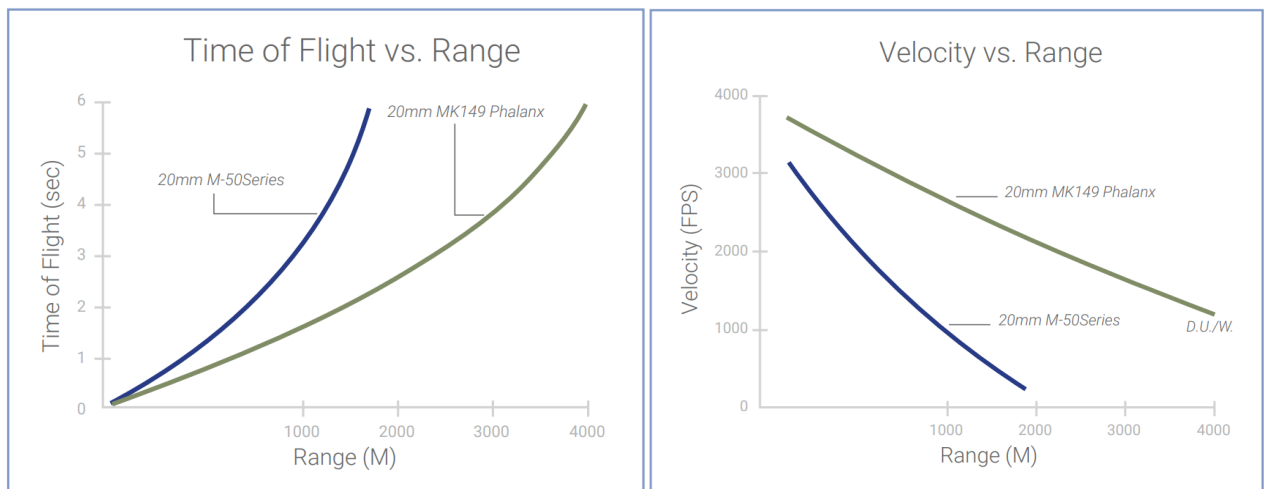


Figura A5-0-3. Comparación entre munición APDS y convencional (Fuente: *General Dynamics*)

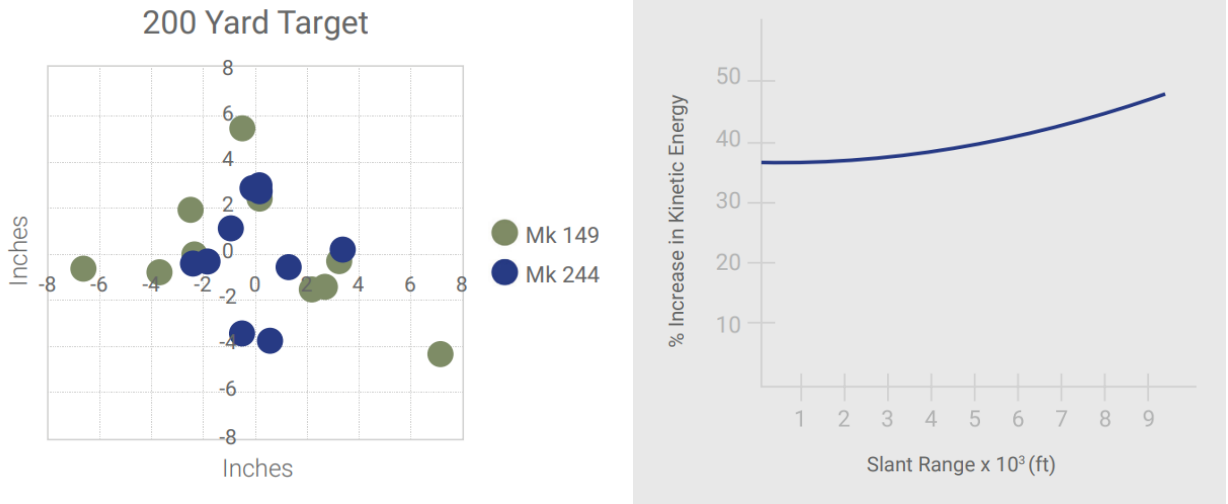


Figura A5-0-4. Comparación entre MK149 y MK244. (Fuente: General Dynamics)

ANEXO VI: CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN

Código para graficar función de densidad en función de la distancia

```
%Gráfica las distribuciones normales para distintos valores de d

%Parametros
d = 200:200:2000; % Distancia al objetivo
A = 0.0025;% Dispersión del cañón en radianes
media = 0; % Media
sigma = (d * tan(A));

% Datos para cada distribución normal
x = linspace(-10, 10, 1000);

% Graficar las distribuciones normales
figure;
hold on;
for i = 1:numel(d)
    y = normpdf(x, media, sigma(i));
    plot(x, y, 'LineWidth', 2);
end
xlabel('X');
ylabel('Probabilidad');
title('Distribución normal en función de la distancia');
legend('200m', '400m', '600m', '800m', '1000m', '1200m', '1400m', '1600m', '1800m',
'2000m');
```

Código para calcular probabilidad simple.

```
% Este codifgo calculas las probabilidades de impactar en un único disparo
% Variables
A = [0.001 0.0015 0.002 0.0025]; % Dispersión en radianes
d = 200:3000; % Distancia de apertura de fuego en m
media = 0; % Media
Diametro_misil = 0.70;

%Calculo limites de la celda
l1 = (-sqrt(pi)* Diametro_misil/2)/2; % Límite inferior del intervalo
l2 = (sqrt(pi)* Diametro_misil/2)/2; % Límite superior del intervalo

% Inicializar un vector para almacenar las probabilidades de impacto
Pimpacto = zeros(length(d),length(A));
sigma = zeros(length(d),length(A));
% Bucle para calcular la probabilidad en los límites del intervalo para cada valor de
sigma
for i = 1:length(d)
    for j = 1:length(A)
        sigma(i,j) = d (i).* tan(A(j));
        p1 = normcdf(l1, media, sigma(i,j));
        p2 = normcdf(l2, media, sigma(i,j));
        Pimpacto(i,j) = (p2 - p1)^2;
    end
end

for j = 1:length(A)
    plot(d, Pimpacto(:,j), '-');
    hold on;
```



```

end

xlabel('Distancia de apertura de fuego (m)');
ylabel('Probabilidad de impacto');
legend('Dispersion = 1 mrad', 'Dispersion = 1.5 mrad', 'Dispersion = 2 mrad', 'Dispersion = 2.5 mrad')

```

Código para calcular la probabilidad acumulada 'al menos un impacto' (distintos ritmos de fuego)

%Este codigo grafica el numero de impactos realizado y la probabilidad de que impacte el disparo(n) sabiendo que los anteriores no han impactado

```

% Parametros
A = 0.0020; % Dispersión en radianes
d = 200:2000; % Distancia de apertura de fuego en m
Velocidad_misil = 310; % Velocidad misil en m/s
Diametro_misil= 0.38;

l1 = (-sqrt(pi)* Diametro_misil/2)/2; % Límite inferior del intervalo
l2 = (sqrt(pi)* Diametro_misil/2)/2; % Límite superior del intervalo
media = 0; % Media
sigma = d .* tan(A); % Desviación Típica

Ritmo_fuego = [500 1000 2000 3000 4000]; % Ritmo de fuego en disparos/min

figure;
for r =1:length (Ritmo_fuego)
    Ritmo_fuego_s = round(Ritmo_fuego(r) / 60); % Ritmo de fuego en disparos/s
    disparos_metro = Ritmo_fuego_s / Velocidad_misil; % Disparos por metro en función de la distancia

    % Inicializar un vector para almacenar las probabilidades de impacto
    Pimpacto = zeros(size(d));

    % Inicializar un vector para almacenar los valores de n
    n = zeros(size(d));

    % Bucle para calcular la probabilidad en los límites del intervalo para cada valor de sigma
    for i = 1:length(d)
        p1 = normcdf(l1, media, sigma(i));
        p2 = normcdf(l2, media, sigma(i));
        Pimpacto(i) = (p2 - p1)^2;

        % Calcular n para cada distancia d
        q = disparos_metro * (d(i) - 199);
        n(i) = round(q);
    end

    % Inicializar un vector para almacenar las probabilidades asociadas a cambios de n
    probabilidades_asociadas = [];

    % Recorrer el vector n para buscar cambios y asociar probabilidades
    for i = 2:length(n)
        if n(i) ~= n(i-1) % Verificar si hay cambio de valor de n
            % Asignar la probabilidad asociada al cambio de n
            probabilidad = Pimpacto(i);

            % Almacenar la probabilidad asociada en el vector

```

```
        probabilidades_asociadas = [probabilidades_asociadas, probabilidad];
    end
end

% Calcular las probabilidades de impacto
P_In = calcularProbabilidades(probabilidades_asociadas);

% Creo un vector de distancias correspondientes a las probabilidades asociadas
distancias_asociadas = linspace(min(d), max(d), length(probabilidades_asociadas));

% Grafico las probabilidades asociadas respecto a d

scatter(distancias_asociadas, fliplr(P_In), ".")
hold on
xlabel('Distancia (m)');
ylabel('Probabilidad de impacto');
title(' ');
legend('500 dpm', '1000 dpm', '2000 dpm', '3000 dpm', '4000 dpm')

end

function P_In = calcularProbabilidadespoisson(lambda)

    % n intentos, utilizando el vector de probabilidades asociadas

    N = length(lambda); % Número total de intentos
    P_In = zeros(size(N)); % Inicializar el vector de probabilidades
    k=5;

    % Calcular las probabilidades de impactar en el blanco para los primeros
    % n intentos
    for n = 1:N
        P_In(n) = 1-poisscdf(k-1, lambda(n));
    end
end
```

Código para calcular la probabilidad acumulada de producir ‘X’ impactos. Teorema de Lecam

%Este codigo grafica el número de impactos realizado y la probabilidad de que impacte el disparo(n) sabiendo que los anteriores no han impactado

```
% Parametros
A = 0.0015; % Dispersión en radianes
d = 200:2000; % Distancia de apertura de fuego en m
Velocidad_misil = 1020; % Velocidad misil en m/s
Diametro_misil= 0.66;

l1 = (-sqrt(pi)* Diametro_misil/2)/2; % Límite inferior del intervalo
l2 = (sqrt(pi)* Diametro_misil/2)/2; % Límite superior del intervalo
media = 0; % Media
sigma = d .* tan(A); % Desviación Típica

Ritmo_fuego = [500 1000 2000 3000 4000]; % Ritmo de fuego en disparos/min

figure;
for r =1:length (Ritmo_fuego)
    Ritmo_fuego_s = round(Ritmo_fuego(r) / 60); % Ritmo de fuego en disparos/s
```

```

    disparos_metro = Ritmo_fuego_s / Velocidad_misil; % Disparos por metro en función de
la distancia

    % Inicializar un vector para almacenar las probabilidades de impacto
Pimpacto = zeros(size(d));

    % Inicializar un vector para almacenar los valores de n
n = zeros(size(d));

    % Bucle para calcular la probabilidad en los límites del intervalo para cada valor de
sigma
for i = 1:length(d)
    p1 = normcdf(l1, media, sigma(i));
    p2 = normcdf(l2, media, sigma(i));
    Pimpacto(i) = (p2 - p1)^2;

    % Calcular n para cada distancia d
q = disparos_metro * (d(i) - 199);
n(i) = round(q);
end

% Inicializar un vector para almacenar las probabilidades asociadas a cambios de n
probabilidades_asociadas = [];

% Recorrer el vector n para buscar cambios y asociar probabilidades
for i = 2:length(n)
    if n(i) ~= n(i-1) % Verificar si hay cambio de valor de n
        % Asignar la probabilidad asociada al cambio de n
probabilidad = Pimpacto(i);

        % Almacenar la probabilidad asociada en el vector
probabilidades_asociadas = [probabilidades_asociadas, probabilidad];
    end
end
probabilidades_asociadas= flip (probabilidades_asociadas);
% Inicializar el vector lambda
lambda = zeros(size(probabilidades_asociadas));

% Calcular el sumatorio de las probabilidades asociadas desde 1 hasta n
for k= 1:length((probabilidades_asociadas))
    lambda(k) = sum(probabilidades_asociadas(1:k));
end

% Calcular las probabilidades de impacto
P_In = calcularProbabilidadespoisson(lambda);

% Creo un vector de distancias correspondientes a las probabilidades asociadas
distancias_asociadas = linspace(min(d), max(d), length(lambda));

% Grafico las probabilidades asociadas respecto a d

scatter(distancias_asociadas, fliplnr(P_In),".")
hold on
xlabel('Distancia (m)');
ylabel('Probabilidad de impacto');
title('');
legend('500 dpm', '1000 dpm', '2000 dpm', '3000 dpm','4000 dpm')
end

```

```
function P_In = calcularProbabilidadespoisson(lambda)

    % n intentos, utilizando el vector de probabilidades asociadas

    N = length(lambda); % Número total de intentos
    P_In = zeros(size(N)); % Inicializar el vector de probabilidades
    k=5;

    % Calcular las probabilidades de impactar en el blanco para los primeros
    % n intentos
    for n = 1:N
        P_In(n) = 1-poisscdf(k-1, lambda(n));
    end
end
```

Código de simulación 'Montecarlo'

```
%Este código calcula probabilidades a través de simulación 'Monte Carlo'

simulaciones = 1:1000;
A=0.0015; %Dispersión en mrad
distancias = 200:5:2000; % Distancias de tiro en metros
distancias = flip(distancias); % Invertir el orden de las distancias para la
representación

%Inicializo las matrices: Probabilidad simple, probabilidad acumulada.
Impactos = zeros(length(simulaciones), length(distancias));
ImpactoAcumulado = zeros(length(simulaciones), length(distancias));
ImpactosAcumulados = zeros(length(simulaciones), length(distancias));

for j = 1:length(simulaciones)
    for i = 1:length(distancias)
        % Generar impacto con coordenadas aleatorias siguiendo la distribución
        desviacion = distancias(i) * tan(A);
        x = normrnd(0, desviacion);
        y = normrnd(0, desviacion);
        % Verificar si el impacto está dentro del blanco
        if abs(x) <= 0.17 && abs(y) <= 0.17 %Tamaño del lado del blanco L=R*raiz(pi)
            Impactos(j, i) = 1; % Asignar 1 si hay impacto
            % Si hay un impacto en esta distancia;
            ImpactoAcumulado(j, i:end) = 1; % Matriz acumulativa hasta un impacto
            ImpactosAcumulados(j, :) = cumsum(Impactos(j, :)); %Matriz de impactos
        end
    end
end

% Calcular el probabilidad simple
probabilidad_simple = mean(Impactos);
probabilidad_acumulada = mean(ImpactoAcumulado);
Promedio_de_impactos = round(mean(ImpactosAcumulados));

%Cálculo la probabilidad de producirse al menos 5 impactos
p5=mean(ImpactosAcumulados>=5,1);

% Graficar
plot(distancias, probabilidad_acumulada);
hold on
plot(distancias, p5);
```

Código de visualización impactos 'Montecarlo'

```

%Este visualiza 3 veces el ataque de un misil
% Parámetros Cañón: // 4000 dpm // Misil: 0.9 Mach.
%Los parametros se han utilizado para definir los intervalos de distancia

simulaciones = 1:1000;
distancias = 200:5:2500; % Distancias de tiro en metros
distancias = flip(distancias); % Invertir el orden de las distancias para la
representación

%Inicializo las matrices: Probabilidad simple, probabilidad acumulada.
Impactos = zeros(length(simulaciones), length(distancias));
ImpactoAcumulado = zeros(length(simulaciones), length(distancias));
ImpactosAcumulados = zeros(length(simulaciones), length(distancias));

for j = 1:length(simulaciones)
    figure;
    hold on;
    for i = 1:length(distancias)
        % Generar impacto con coordenadas aleatorias siguiendo la distribución
        desviacion = distancias(i) * tan(0.002);
        x = normrnd(0, desviacion);
        y = normrnd(0, desviacion);

        % Verificar si el impacto está dentro del blanco
        if abs(x) <= 0.266 && abs(y) <= 0.266 %Tamaño del lado del blanco
            % Si está dentro, dibujar en rojo
            scatter(x, y, '.', 'r')
            Impactos(j, i) = 1; % Asignar 1 si hay impacto
            % Si hay un impacto en esta distancia;
            ImpactoAcumulado(j, i:end) = 1; % Matriz acumulativa hasta un impacto
            ImpactosAcumulados(j, :) = cumsum(Impactos(j, :)); %Matriz de impactos
        acumulados
        else
            % Si está fuera, dibujar en negro
            scatter(x, y, '.', 'k')
        end
        drawnow;
        if simulaciones(j)>=3
            break
        end
    end
    if simulaciones(j)>=3
        break
    end
end
end

```