



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de experimentos en la realización de test de vida
acelerados para pólvora y cartuchos*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Alfonso Benavides Nieto

DIRECTORES: Alicia Vázquez Carpentier
Jorge Eiras Barca

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de experimentos en la realización de test de vida
acelerados para pólvora y cartuchos*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General / Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado constituye una fase preliminar del proyecto EIDUD (Estudio Integral de Dispositivos de Un Solo Uso para Defensa), centrado en la caracterización de la confiabilidad y el tiempo de vida útil de dispositivos de un solo uso mediante ensayos de vida acelerada. En particular, se aborda el diseño de un plan experimental aplicado a munición del calibre 9 × 19 milímetros Parabellum, sometida a condiciones de estrés térmico, salino y químico para simular entornos operacionales extremos.

Se emplea un diseño factorial con enfoque multifactorial, permitiendo analizar tanto los efectos principales como las posibles interacciones entre variables. La muestra experimental comprende 1000 cartuchos distribuidos estratégicamente en niveles e intensidades de cada factor, incorporando un grupo de control y medidas de repetibilidad estadística. El objetivo es establecer las bases para una futura modelización probabilística del comportamiento del cartucho ante condiciones adversas, con atención a la estanqueidad de la pólvora y los umbrales térmicos de seguridad.

Los resultados derivados de esta planificación experimental permitirán integrar metodologías estadísticas avanzadas como son Weibull o Gamma, para la estimación robusta de parámetros de confiabilidad en sistemas de muestreo destructivo.

PALABRAS CLAVE

Fiabilidad, Ensayos de vida acelerados, Munición, Diseño Experimental, Vida útil.

AGRADECIMIENTOS

Al Sr Eiras por su infinita paciencia ayudandome a lo largo de este proyecto en las horas de laboratorio y en las pruebas de fuego, por seguir formándome en valores, como son la constancia en seguir intentándolo, la paciencia cuando los resultados no eran los esperados y la disciplina dejando siempre las cosas mejor que como nos las encontramos. Y por todo el conocimiento transmitido en términos de municiones, armas y técnicas de tiro derivados de este proyecto.

A la Srta Alicia, por siempre tener un minuto para mí, por estar presente en todos los momentos del proyecto y hacer un seguimiento de este para que nunca se quedase atrás o atascado y que haya podido transcurrir de la forma en el que lo ha hecho.

A mi familia, pilar fundamental durante toda mi vida, a mis padres por darme el mayor regalo que tendré en mi vida, que son mis 7 hermanos y por enseñarme lo que significa querer sin medida, y a ellos por que siempre tendré algo que aprender de cada uno, unos abren camino y otros los seguimos.

A toda la gente que es especial en mi vida, ellos lo saben, y por supuesto a mi segunda familia la 425-155 por haber estado presentes en los mejores 5 años de mi vida, por apoyarme siempre y hacerme sentir en casa en cualquier latitud que hemos compartido.

A la ENM por la formación recibida, tanto intelectual como físicamente además de poner todas las instalaciones a nuestra disposición.

Y por último y más importante, a la Virgen del Carmen y Jesucristo nuestro Señor, por ser la brújula de mi vida y la calma en todas las tempestades.

CONTENIDO

Contenido.....	5
Índice de Figuras.....	7
Índice de Tablas.....	8
1 Introducción y objetivos.....	9
1.1 Contexto y Motivación.....	9
1.2 Objetivos.....	11
1.3 Estructura.....	11
2 Estado del arte.....	13
2.1 Introducción a la Industria de la Defensa.....	13
2.2 Las Fuerzas Armadas Españolas.....	14
2.2.1 La Armada española.....	15
2.2.2 La Infantería de Marina; Rol y equipamiento.....	15
2.2.3 La Escuela Naval Militar.....	16
2.3 Tipos de municiones y sus calibres.....	16
2.3.1 Clasificación General y calibres más comúnmente utilizados.....	16
2.4 Factores clave en el diseño de municiones.....	17
2.5 La munición 9 × 19 milímetros.....	19
2.5.1 Historia y Uso.....	19
2.6 Componentes de un Cartucho.....	22
2.7 Test de vida acelerados y dispositivos de un solo uso.....	23
2.8 Estudios de confiabilidad en municiones.....	25
2.9 Normativas y estándares militares aplicables al análisis de fiabilidad de municiones.....	26
2.10 Diseños Factoriales.....	27
2.12 Necesidad de estandarizar métodos experimentales en munición de uso militar.....	30
3 Desarrollo del TFG.....	31
3.1 Análisis y selección de los factores.....	31
3.2 Diseño de Experimentos.....	33
3.3 Ensayos.....	39
3.4 Análisis de componentes y decisión.....	44
3.5 Límite superior.....	47
3.6 Grupo de control.....	52
3.7 Ensayo preliminar de envejecimiento térmico a 100 °C.....	55
3.8 Herramienta informática.....	55
4 Resultados.....	57
4.1 Resultados y Observaciones.....	57
4.2 Segundo Enfoque.....	58
4.3 Relación entre la Temperatura, la masa de pólvora y energía de deflagración.....	61
4.4 Análisis y comparación.....	65
4.5 Registro de Datos y Análisis de Resultados del grupo de control.....	67
4.6 Resultados Prueba preliminar envejecimiento térmico a 100 °C.....	71
5 Conclusiones y líneas futuras.....	73
5.1 Conclusiones Principales.....	73
5.2 Limitaciones del Trabajo.....	75

5.3 Líneas Futuras de Trabajo.....	76
6 Bibliografía.....	79
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales.....	83
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Feria armamentística TEDAE (fuente: https://tedae.org).....	13
Figura 2-3 La infantería de marina puño ofensivo de La Armada (fuente propia).....	15
Figura 2-4 distintos calibres utilizados por las FAS españolas (fuente propia).....	17
Figura 2-6 FN P9 (fuente propia).....	20
Figura 2-7 comparación de Glock 19-45-17 (fuente propia).....	20
Figura 2-8 componentes de un cartucho (fuente propia).....	22
Figura 2-9 Ejemplo de interacción.....	28
Figura 2-10 Ejemplo de efectos principales.....	28
Figura 3-1 Imagen de militares españoles operando en climas extremos (fuente propia).....	31
Figura 3-2 militares españoles operando en ambientes de pH no neutro y ambientes salinos (fuente Casa Real y Minisdef).....	31
Figura 3-3 Comparación Cartuchos degradados por agentes externos y cartuchos en perfecto estado(fuente propia).....	32
Figura 3-4 ejemplo de cámara salina a utilizar (fuente propia).....	34
Figura 3-6 Ejemplo de la toma de una muestra aleatoria para la realización de un ensayo (fuente propia).....	41
Figura 3-7 Cartuchos sumergidos (fuente propia).....	42
Figura 3-8 Martillo de Inercia y cartuchos desmontados (fuente propia).....	43
Figura 3-9 Cartuchos desmontados y pólvora seca (fuente propia).....	44
Figura 3-10 Autor del trabajo fin de grado soldando placas de acero para crear el sarcófago (fuente propia).....	46
Figura 3-11 Sarcófago (fuente propia).....	46
Figura 3-12 Sarcófago terminado con capa de Zinc (fuente propia).....	47
Figura 3-13 Sarcófago con bridas metálicas y base de la caja de seguridad (fuente propia).....	47
Figura 3-14 Mufla Nabertherm (fuente propia).....	48
Figura 3-15 Pruebas de fuego Grupo de Control (fuente propia).....	49
Figura 3-16 Cronógrafo Caldwell Balísitc empleado (fuente propia).....	50
Figura 3-17 Revólver utilizado durante las pruebas de fuego (fuente propia).....	51
Figura 4-1 Estado de los cartuchos tras detonar (fuente propia).....	55
Figura 4-2 detonación de cartuchos y zona segura de operación (fuente propia).....	60
Figura 4-3 Box plot Grupo de control(fuente propia).....	63
Figura 4-5 Boxplot Prueba preliminar (fuente propia).....	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Incremento de la temperatura con respecto al tiempo dentro de la mufla (fuente propia).....49

Tabla 2 Resumen Diseño de las pruebas que se llevarán a cabo en el proyecto..... 52

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto y Motivación

En un contexto internacional cada vez más incierto y con tensiones geopolíticas en aumento, las Fuerzas Armadas (FAS) juegan un papel clave en asegurar la seguridad nacional y cumplir con los compromisos internacionales [1]. Más allá del nivel de profesionalidad de sus miembros, la efectividad operativa de las FAS está estrechamente relacionada con la calidad, fiabilidad y modernidad de sus recursos materiales, entre los que se destacan los llamados dispositivos de un solo uso.

Estos mecanismos, como granadas, municiones, chaffs, torpedos o misiles, permanecen inactivos durante gran parte de su vida útil, siendo utilizados únicamente en el momento necesario. Una vez activados, pierden toda su funcionalidad, lo que los convierte en elementos críticos en cuanto a diseño, control de calidad y mantenimiento [2]. La fiabilidad de estos dispositivos no solo garantiza el éxito de las operaciones en las que se utilizan, sino que también reduce el riesgo de accidentes en circunstancias críticas. Por este motivo, su análisis no solo debe centrarse en el momento de su uso, sino también en la evaluación de su comportamiento a lo largo del tiempo mientras permanecen almacenados.

Dado el contexto actual, donde España forma parte de la OTAN y otras alianzas estratégicas, la capacidad de respuesta de nuestras FAS enfrenta retos específicos, como la guerra en Ucrania, las tensiones en el norte de África y otras situaciones que podrían requerir una intervención activa. En este marco, asegurar el adecuado funcionamiento de los dispositivos de un solo uso, que son almacenados durante largos períodos en diversas instalaciones militares, es fundamental para mantener la preparación y la eficacia operativa. Sin embargo, garantizar su fiabilidad a largo plazo es un desafío complejo, ya que estos dispositivos no pueden ser reutilizados ni evaluados de manera convencional sin comprometer su integridad.

Desde un punto de vista científico-técnico, el análisis de la fiabilidad y la vida útil de estos dispositivos presenta importantes retos. A diferencia de otros sistemas reutilizables, los dispositivos de un solo uso no permiten evaluar directamente su estado funcional hasta su activación, lo que impide aplicar metodologías estándar de mantenimiento predictivo o de diagnóstico. En este sentido, el estudio de su degradación y posible fallo requiere la implementación de modelos matemáticos y estadísticos que permitan predecir su comportamiento sin necesidad de activación.

Uno de los enfoques clave en este tipo de análisis es la ingeniería de fiabilidad, que emplea herramientas matemáticas para modelar la probabilidad de fallos y la duración esperada de un

dispositivo bajo diferentes condiciones de almacenamiento y uso. Entre los modelos más utilizados se encuentran la distribución de Weibull, la distribución exponencial y la distribución log-normal, las cuales permiten caracterizar el comportamiento de fallos en sistemas que no pueden ser sometidos a pruebas directas. Estas distribuciones se utilizan para estimar el tiempo medio hasta la falla y la tasa de fallos, parámetros esenciales en la planificación y gestión de estos dispositivos en los arsenales militares [3].

A esto se suma el hecho de que el estudio de estos dispositivos requiere considerar datos censurados, es decir, aquellos en los que no se ha observado un fallo dentro del tiempo de prueba, lo que complica la aplicación de modelos convencionales. Además, en muchos casos, se emplean pruebas destructivas, como la inspección de componentes mediante técnicas de envejecimiento acelerado o exposición a condiciones extremas. Este tipo de pruebas, aunque necesarias, limita la cantidad de datos disponibles, lo que refuerza la necesidad de enfoques estadísticos robustos que permitan extrapolar información a partir de muestras reducidas [4].

Dado este escenario, uno de los métodos más efectivos para analizar la vida útil de estos dispositivos es la realización de test de vida acelerados. Estas pruebas permiten estimar la duración de un dispositivo bajo condiciones normales de almacenamiento al someterlo a estrés extremo en un tiempo reducido, utilizando variables como temperatura, humedad o presión para acelerar su degradación [5].

En este marco, el proyecto Estudio Integral de Dispositivos de Un Solo Uso para Defensa surge como una contribución significativa, abordando esta problemática desde una perspectiva dual: teórica y experimental. En su vertiente teórica, se investigarán las distribuciones estadísticas y los parámetros matemáticos que definen la fiabilidad y el tiempo de vida de los dispositivos, aplicando los modelos de fiabilidad mencionados y adaptándose a las condiciones particulares de almacenamiento en entornos militares. En su vertiente experimental, el proyecto se enfocará en un caso práctico, analizando la munición de 9×19 milímetros, ampliamente utilizada en armas cortas y subfusiles.

Dentro de dichas municiones, el estudio se centrará en dos componentes fundamentales: la pólvora y los estopines ubicados en el culote de la vaina. Estos elementos son especialmente sensibles al almacenamiento prolongado, ya que su composición química puede verse afectada por factores ambientales, lo que podría comprometer su funcionalidad en el momento de su uso. Para evaluar su fiabilidad, se implementarán los mencionados test de vida acelerados, sometiendo muestras de munición a distintas condiciones de temperatura y humedad, y analizando el efecto de estas variables sobre su estabilidad química y mecánica.

El propósito final es establecer principios teóricos y prácticos que permitan mejorar el control de calidad de estos dispositivos y caracterizar su fiabilidad de forma más precisa, contribuyendo así a la seguridad y eficacia de las Fuerzas Armadas en misiones críticas. A través del uso de modelos estadísticos de fiabilidad y pruebas experimentales controladas, el estudio proporcionará información clave para la optimización del almacenamiento y mantenimiento de estos dispositivos, asegurando que su rendimiento sea óptimo cuando sean requeridos en situaciones reales.

Es por todos estos motivos que desde la Escuela Naval Militar el Centro Universitario de la Defensa, se plantea dicho estudio con los mencionados objetivos. Por tanto, el presente Trabajo de Fin de Grado, titulado "Diseño de experimentos en la realización de test de vida acelerados para pólvora y cartuchos", compone la antesala del mencionado estudio, diseñando los experimentos a realizar posteriormente en el proyecto y adelantando mediciones y análisis. De esta manera, se busca obtener conclusiones tanto empíricas como matemáticas, que permitan mejorar la fiabilidad de estos dispositivos y optimizar su uso en escenarios operacionales.

1.2 Objetivos

El Trabajo de Fin de Grado, titulado *Diseño de experimentos en la realización de test de vida acelerados para pólvora y cartuchos*, tiene como objetivo central el estudio matemático y experimental de la fiabilidad de dispositivos de un solo uso, concretamente la munición de 9×19 milímetros Parabellum y el conjunto de componentes que la conforman. Este análisis tiene como finalidad desarrollar un marco teórico-práctico que permita mejorar el control de calidad y la seguridad en el manejo de este tipo de dispositivos. Los objetivos del trabajo se organizan de la siguiente manera:

El objetivo principal es realizar un análisis de los fundamentos estadísticos que permiten evaluar la fiabilidad de los dispositivos de un solo uso, utilizando como caso de estudio la munición de 9×19 milímetros Parabellum. Se busca diseñar experimentos que se basen en test de vida acelerados los cuales permitan analizar cómo se comportará el cartucho además de determinar las condiciones que afectan a su degradación, aplicando metodologías matemáticas y creando escenarios que simulen condiciones de uso y almacenamiento. Además de contribuir a las primeras fases del proyecto EIDUD (Estudio Integral de Dispositivos de Un Solo Uso para Defensa).

1.3 Estructura

El trabajo se organiza en cinco capítulos principales, seguidos de los anexos pertinentes. En el Capítulo 1 se presenta la introducción general, proporcionando el contexto y motivación del estudio, así como los objetivos planteados. A continuación, en la sección 1.3 Estructura, se describe la organización del documento, orientando al lector sobre el contenido de cada capítulo.

El Capítulo 2 está dedicado al estado del arte y los fundamentos teóricos. En él se abordan, primero, las particularidades de la industria de la defensa y la relevancia de la fiabilidad en sistemas militares. Seguidamente, se profundiza en aspectos técnicos relacionados con la diseñabilidad y vida útil de municiones, incluyendo factores clave en el diseño de cartuchos y pólvoras, y se describen los componentes de un cartucho 9×19 milímetros Parabellum. Finalmente, se introducen las distintas tipologías de ensayos, destructivos y no destructivos relevantes para caracterizar la fiabilidad de dispositivos de un solo uso, sentando las bases conceptuales del trabajo.

El Capítulo 3 corresponde al Desarrollo del Trabajo de Fin de Grado, que incluye la metodología y planificación experimental propuesta. En primer lugar, se realiza un análisis y selección de los factores ambientales de envejecimiento acelerado estos son, temperatura, salinidad y pH considerados más críticos para la munición estudiada, justificando su elección en base a escenarios operativos reales. A continuación, se detalla el diseño de experimentos planteado, la distribución de los 1000 cartuchos en distintos grupos de prueba, niveles de estrés y un grupo de control, siguiendo un enfoque factorial multifactorial. Se describen por separado las pruebas pensadas para cada factor, exposición térmica, salina y química, así como los escenarios combinados que simulan condiciones extremas con múltiples factores actuando simultáneamente. También se incluye en este capítulo la preparación de los ensayos, protocolos, equipamiento y consideraciones de seguridad, y una descripción de las pruebas preliminares con el grupo de control, que sirven como referencia base. Además de una última prueba preliminar a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este capítulo cierra con un cuadro resumen del diseño de experimentos a realizar en el proyecto.

En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos y su análisis. Primero, se exponen las observaciones experimentales iniciales, entre ellas los ensayos para determinar el límite superior de temperatura segura de almacenamiento, pruebas de detonación espontánea por calor, y sus interpretaciones. Se comparan estos resultados con la información teórica inicial, discutiendo discrepancias y confirmaciones. Posteriormente, se ofrece un análisis estadístico de los datos recopilados, incluyendo estadísticos descriptivos, medias, dispersión, incertidumbres y la validación

del enfoque experimental con el grupo de control. Se presentan gráficas, diagramas de caja y diagramas de distribución de frecuencias, para ilustrar el comportamiento balístico del grupo de control y se interpretan los resultados en el contexto de la fiabilidad de la munición. Este capítulo concluye destacando las tendencias detectadas y su relevancia de cara a los objetivos del estudio.

Finalmente, el Capítulo 5 abarca las Conclusiones y Líneas Futuras. En él se sintetizan los hallazgos más importantes del trabajo, evaluando en qué medida se han cumplido los objetivos iniciales. Se discuten las limitaciones encontradas durante la realización del TFG, tanto experimentales como de alcance, y se proponen líneas de trabajo futuras que podrían dar continuidad y ampliar la investigación presentada. Tras estos capítulos principales, se incluyen dos anexos: el Anexo I, que explora las implicaciones sociales, económicas y medioambientales del estudio, y el Anexo II, que recoge unas reflexiones éticas y sociales acerca del trabajo realizado y su contexto. Estos anexos complementan el cuerpo central del documento, situando los resultados en un marco más amplio de responsabilidad social, sostenibilidad y ética profesional.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción a la Industria de la Defensa

La industria de la defensa desempeña un papel fundamental en la seguridad nacional, aportando tanto soluciones tecnológicas que garantizan la eficacia operativa de las fuerzas armadas. Además de su contribución directa a la soberanía, este sector actúa como motor de desarrollo en los ámbitos económico y tecnológico.

En España, la industria de defensa se encuentra estrechamente ligada al Ministerio de Defensa, que dicta estrategias como la "Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa" (ETID). Este enfoque promueve la autosuficiencia y la modernización tecnológica a través de proyectos como los submarinos S-80, Eurofighter, A-400M, helicópteros NH-90 y Tigre, los buques construidos por Navantia, y los medios de ruedas y cadenas de la familia ASCOD, Piranha V, de SBS o ST5 de Urovesa, reflejando la capacidad de adaptarse a un entorno global competitivo [6].

A nivel global, las principales potencias invierten considerables sumas de dinero en defensa, lo que genera un entorno hipercompetitivo. En este contexto, España ha conseguido consolidar su posición gracias a la alta calidad de sus productos y sistemas de aseguramiento como las normas PECAL, que garantizan la fiabilidad de los equipos militares.



Figura 2-1 Feria armamentística TEDAE (fuente: <https://tedae.org>)

2.2 Las Fuerzas Armadas Españolas

Las Fuerzas Armadas Españolas se componen del Ejército de Tierra, la Armada y el Ejército del Aire y del Espacio. Su máxima se encuentra establecida en el Artículo 8.1 de la Constitución Española, esta es, el firme propósito de proteger la soberanía y la independencia del país, además de garantizar la integridad de su territorio y el mantenimiento del orden constitucional.

En la práctica, las Fuerzas Armadas desempeñan un papel clave tanto dentro como fuera de España. Participan en tareas que van desde la preservación de la paz en escenarios internacionales hasta ejercicios diseñados para prevenir conflictos y responder eficazmente a situaciones de crisis. Estas actividades reflejan su compromiso con la seguridad y la estabilidad, tanto a nivel nacional como en colaboración con otros países.

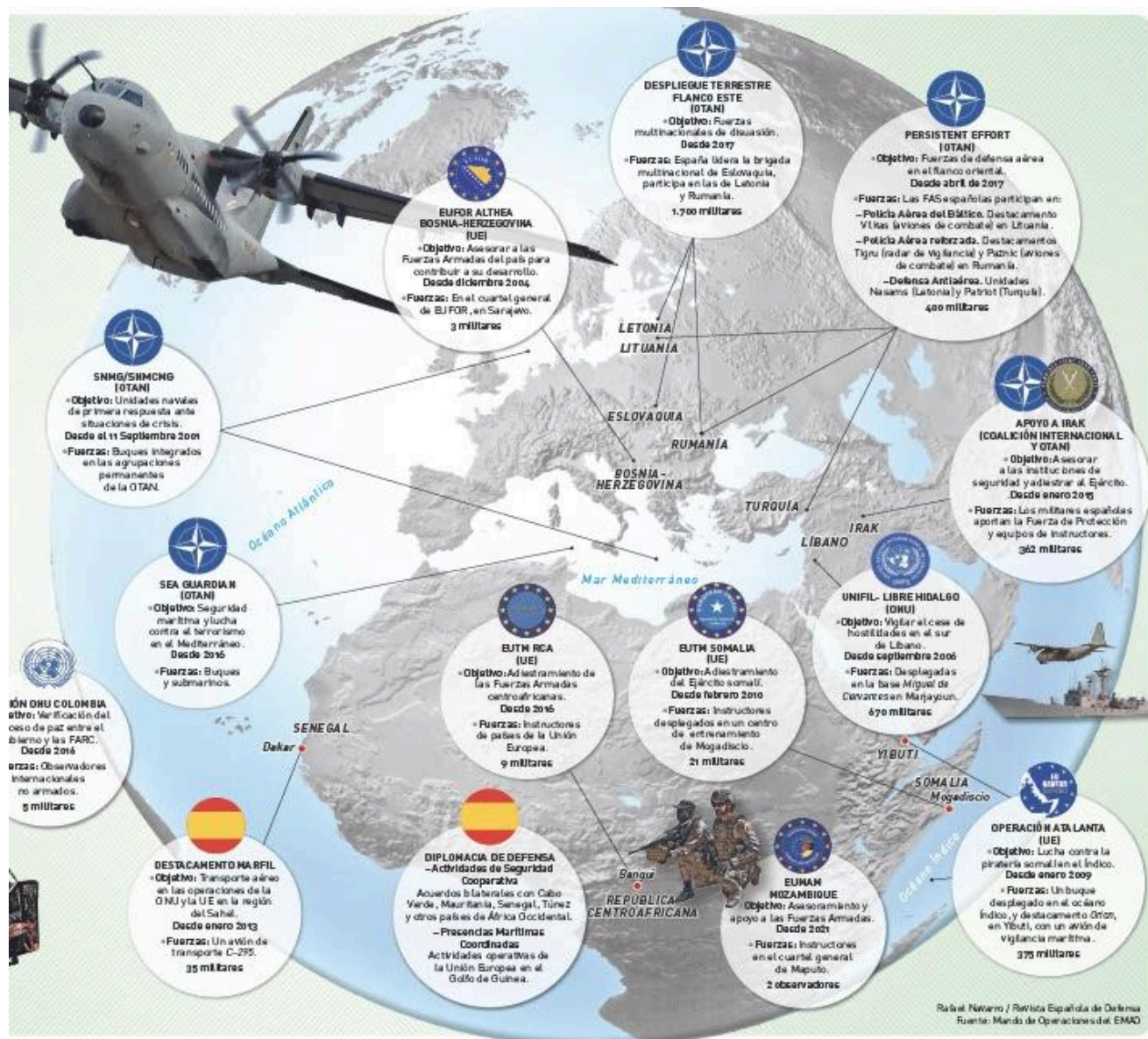


Figura 2-2 Misiones en curso de las FAS (fuente: <https://www.defensa.gob.es>)

2.2.1 La Armada española

Dentro de las Fuerzas Armadas, la Armada Española destaca como el componente marítimo encargado de proteger los intereses nacionales en el mar y proyectar la seguridad en el ámbito naval. Cuenta con una flota moderna y versátil formada por fragatas, submarinos, buques anfibios, patrulleros, entre otros que le permite enfrentar los desafíos actuales en escenarios marítimos. La Armada participa activamente en operaciones conjuntas con aliados de la OTAN y la UE, reforzando su papel en la defensa colectiva y la seguridad marítima global. Su capacidad de operar en entornos lejanos y hostiles subraya la importancia de mantener sistemas de armas confiables, desde grandes buques hasta la munición de armamento individual, para garantizar el éxito de sus misiones.

2.2.2 La Infantería de Marina; Rol y equipamiento

La Infantería de Marina es la fuerza anfibia de las Fuerzas Armadas Españolas y considerada la más antigua del mundo, con su creación en los Tercios de Nápoles en 1537 [7]. Su misión principal es garantizar la proyección del poder naval sobre tierra, actuando en operaciones de desembarco, seguridad marítima y defensa de instalaciones.

Para la realización y cumplimiento de dichas operaciones el equipamiento de la Infantería de Marina debe de cumplir unos estándares especiales que le hace diferenciarse del resto de unidades del Ejército de Tierra. Entre este equipo destacan armas ligeras, municiones, y sistemas de apoyo diseñados para operar en entornos hostiles. Entre todo este armamento resalta el uso de pistolas y subfusiles. Dichos elementos emplean munición de 9×19 milímetros Parabellum; munición que será sometida a estudio en este proyecto.

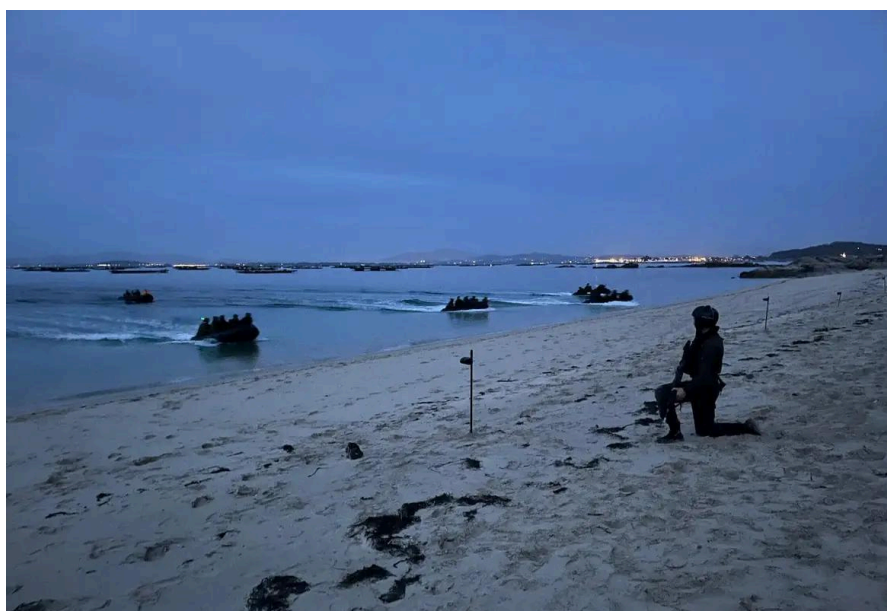


Figura 2-3 La infantería de marina puño ofensivo de La Armada (fuente propia)

2.2.3 La Escuela Naval Militar

La Escuela Naval Militar, ubicada en Marín (Pontevedra), es el centro de formación de los oficiales de la Armada Española, incluyendo tanto el Cuerpo General de La Armada como la Infantería de Marina. Además de su labor docente, este centro académico-militar promueve activamente la investigación en tecnología naval y defensa. En los últimos años, la Escuela a través del Centro Universitario de la Defensa ha impulsado proyectos de estudio sobre fiabilidad de sistemas militares. Un ejemplo es el mencionado proyecto EIDUD, centrado en dispositivos de un solo uso como la

munición. La implicación de la Escuela Naval en este proyecto refleja su compromiso con la innovación y la mejora de la seguridad y eficacia del material empleado por las Fuerzas Armadas.

2.3 Tipos de municiones y sus calibres

Las municiones han evolucionado a lo largo de la historia para adaptarse a las necesidades del combate y defensa. Se clasifican según su uso y calibre, dividiéndose en tres grandes categorías.

2.3.1 Clasificación General y calibres más comúnmente utilizados

- Armas cortas: Diseñadas para el combate cercano y la defensa personal. Entre ellas se encuentran pistolas y revólveres, que utilizan calibres como el 9 × 19 milímetros Parabellum o el .45 ACP. Estas municiones ofrecen un equilibrio entre letalidad y facilidad de manejo, lo que las convierte en una elección común para fuerzas y cuerpos de seguridad del estado y civiles con licencia de porte de armas. El 9 × 19 mm Parabellum, ampliamente adoptado por cuerpos militares y policiales debido a su bajo retroceso y capacidad de penetración adecuada para enfrentamientos urbanos. Su versatilidad también ha permitido el desarrollo de versiones con diferentes tipos de proyectiles, desde expansivos hasta perforantes.
- Armas largas: Incluyen fusiles, ametralladoras tanto medias como ligeras y fusiles de precisión, empleados en combate a media y larga distancia. Algunos de los calibres más comunes en esta categoría son el 5.56 × 45 milímetros y el 7.62 × 51 milímetros, utilizados por fuerzas armadas de todo el mundo. Su alcance y poder de penetración varían según el tipo de proyectil y la carga de pólvora empleada. El 5.56 × 45 mm es el calibre estándar en fusiles de asalto, apreciado por su ligereza, velocidad y equilibrio entre potencia y control del retroceso. En el caso de armas de mayor potencia, el 7.62 × 51 milímetros es preferido por francotiradores y ametralladoras medias, ofreciendo un mayor alcance y poder de detención en combate [\[8\]](#).
- Recientemente han surgido calibres intermedios innovadores para armas largas, como el .300 AAC Blackout, 7.62 × 35 milímetros, que combinan ventajas de ambos extremos. Este cartucho emplea un proyectil de 7.62 milímetros en una vaina recortada de 5.56, logrando munición subsónica muy versátil. El .300 Blackout permite, con cambios mínimos en el arma, optimizar el desempeño en contextos donde se requiere bajo ruido/fogonazo (uso con silenciador) manteniendo buena energía terminal. Innovaciones de este tipo buscan cubrir nichos operativos específicos, ofreciendo alternativas entre los calibres estándar existentes.
- Munición especial: Abarca proyectiles de artillería, morteros, cohetes y granadas, diseñados para apoyo de fuego en las operaciones militares. Estas municiones de mayor calibre están concebidas para generar efectos más destructivos o cumplir misiones específicas: por ejemplo, destrucción de vehículos blindados, demolición de estructuras, o bien proveer efectos secundarios como humo, iluminación o dispersión de agentes. Su fiabilidad es crítica dado el alto impacto estratégico de cada disparo; además, suelen incorporar espoletas o iniciadores pirotécnicos que incrementan la complejidad de su diseño. Aunque este TFG se centra en munición de arma ligera, los principios de ensayo de vida acelerada pueden aplicarse también a sistemas de munición especial para evaluar su estabilidad en almacenamiento prolongado o condiciones extremas.



Figura 2-4 distintos calibres utilizados por las FAS españolas (fuente propia)

2.4 Factores clave en el diseño de municiones

El diseño de una munición está influenciado por tres aspectos balísticos fundamentales:

- Balística interna: Analiza el comportamiento de la munición dentro del arma, incluyendo la presión generada y la eficiencia del disparo. Factores como la calidad de la pólvora y el diseño de la vaina influyen en el comportamiento del disparo.
- Balística externa: Se refiere a la trayectoria y estabilidad del proyectil en el aire. Factores como la aerodinámica, la velocidad en la boca de fuego y la resistencia al viento afectan directamente su rendimiento y capacidad de impacto a diferentes distancias.
- Balística terminal: Evalúa los efectos del impacto sobre el objetivo, considerando la penetración y el poder de detención del proyectil. Dependiendo del diseño, algunos proyectiles están pensados para maximizar el daño en tejidos blandos, mientras que otros priorizan la perforación de blindajes [\[9\]](#). Cabe resaltar que la mayoría de los proyectiles están diseñados para que, una vez el impacto se ha realizado, este cause una cavitación temporal en el cuerpo impactado haciendo que la piel se expanda al paso del proyectil multiplicando el efecto letal. De ahí que varios impactos seguidos de un pequeño calibre causen mayor daño que un impacto aislado de un calibre mayor, teniendo la suma de pequeños calibres mayor capacidad de parada que el calibre grande [\[10\]](#).

La capacidad de parada, también conocida como stop power, hace referencia a la habilidad de un proyectil para incapacitar a un objetivo con el menor número de impactos posibles. No se trata solo

de la energía cinética del disparo, sino también de otros factores como la transferencia de energía en el cuerpo, la cavitación que produce en los tejidos y la posibilidad de causar un colapso inmediato del sistema nervioso.

Un proyectil de mayor calibre suele generar un impacto más contundente y una cavidad de mayor diámetro, como se observa en la siguiente imagen, lo que puede aumentar la posibilidad de incapacitación con un solo disparo. Sin embargo, los calibres más pequeños permiten una mayor cadencia de fuego y múltiples impactos en un corto período de tiempo, lo que, en conjunto, puede generar una transferencia de energía más efectiva y aumentar la probabilidad de incapacitar al objetivo de manera rápida y eficiente.

Por esta razón, en escenarios de combate y defensa, la capacidad de parada no depende exclusivamente del tamaño del proyectil, sino de un conjunto de factores que incluyen la velocidad, la penetración, la expansión del proyectil y la cantidad de impactos que se pueden realizar en un corto espacio de tiempo.

En el siguiente gráfico (Figura 2-5) se compara los efectos balísticos en tejido de dos proyectiles distintos: uno del 9 × 19 milímetros Parabellum en la parte superior superior y otro de 7.62 milímetros en la parte inferior. En ambos casos se distinguen dos tipos de cavidades generadas en el medio, la cavidad permanente, que representa el daño estructural irreversible provocado por el paso del proyectil, y la cavidad temporal, que refleja la expansión elástica de los tejidos debido a la onda de choque. Se observa que el proyectil de 9 milímetros produce una cavidad más estrecha y prolongada, con menor deformación transversal. En cambio, el 7.62 milímetros genera una cavidad temporal significativamente mayor y más violenta, lo que indica una transferencia de energía mucho más alta al medio. Esta diferencia justifica la mayor letalidad del calibre 7.62 frente al 9 × 19 en contextos militares.

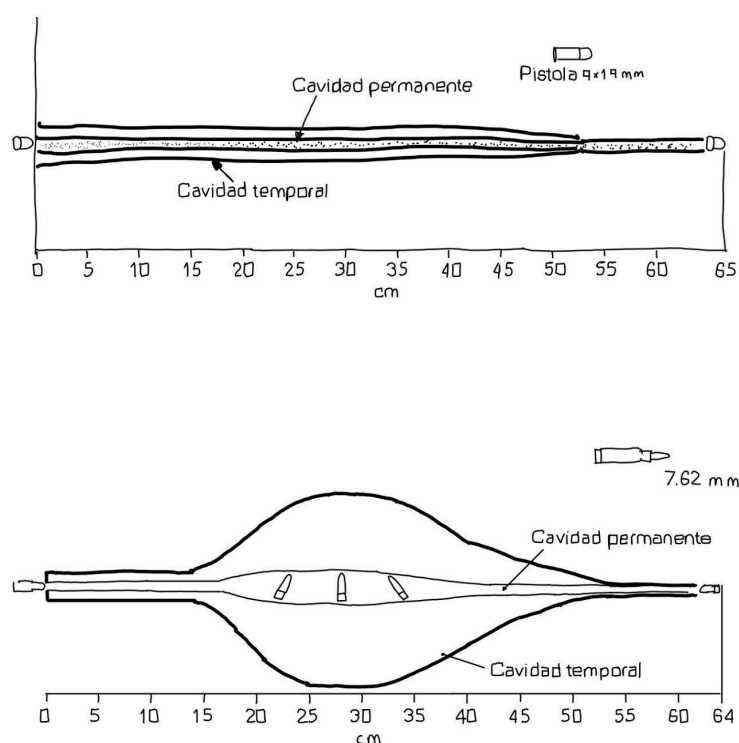


Figura 2-5 diferencia entre cavidades creadas por un 9mm vs 7, 62 mm (fuente propia)

2.5 La munición 9 × 19 milímetros

Al analizar los componentes técnicos de las armas de fuego, resulta fundamental profundizar en el estudio de su munición. Para este trabajo se ha seleccionado el calibre 9 × 19 milímetros Parabellum como eje central, no solo por ser uno de los más utilizados a nivel global, sino por su trayectoria histórica y su equilibrio técnico entre eficacia y practicidad. Esta elección permitirá explorar cómo un diseño centenario sigue siendo hoy un referente en balística, adaptándose a las necesidades cambiantes de seguridad y combate.

2.5.1 Historia y Uso

La munición 9 × 19 milímetros Parabellum fue desarrollada en 1902 por el ingeniero Georg Luger con la intención de crear un cartucho fiable, compacto y eficaz para pistolas semiautomáticas [11]. Con el paso del tiempo, se convirtió en un estándar para fuerzas armadas y policiales en todo el mundo, gracias a su equilibrio entre capacidad de carga, retroceso controlable y poder letal. Su popularidad ha llevado a que numerosas armas de fuego sean diseñadas o adaptadas para usar este calibre.

2.5.2 Ventajas y limitaciones

La utilización de este calibre por parte de tantos cuerpos y fuerzas de seguridad del estado se debe a un número de prestaciones que ofrece y que aportan ventajas frente al resto de calibres. Una de sus principales fortalezas es su alta capacidad en cargadores. Al ser un cartucho de menor tamaño en comparación con calibres más grandes, permite que las armas que lo utilizan almacenen más munición sin aumentar significativamente su peso o volumen; en el caso de las pistolas la media de munición que albergan sus cargadores está entre 15 y 17 proyectiles siendo una cantidad más que razonable para las misiones a realizar. Esto es clave en situaciones de combate, donde contar con más disparos sin recargar puede marcar la diferencia.

Otra característica importante es su bajo retroceso, lo que facilita disparos más precisos y rápidos. Esta característica lo convierte en una excelente opción para enfrentamientos en espacios reducidos, como en entornos urbanos o situaciones de respuesta rápida, donde la velocidad y la precisión son esenciales.

Además, el 9 × 19 milímetros Parabellum es uno de los calibres más utilizados a nivel mundial, lo que garantiza una amplia disponibilidad tanto en el mercado militar como en el civil. Esto significa que es fácil encontrar munición compatible en casi cualquier parte del mundo, lo que resulta una gran ventaja en operaciones internacionales.

Sin embargo, este calibre también tiene algunas limitaciones. Una de ellas en comparación con calibres más grandes, es su menor poder de penetración, que puede dificultar la perforación de protecciones balísticas avanzadas. No obstante, algunas variantes de munición han sido diseñadas para mejorar este aspecto, aunque pueden sacrificar otros factores como estabilidad en el disparo o seguridad en entornos cerrados. Su rendimiento puede verse afectado dependiendo de la situación y el tipo de arma utilizada.

2.5.3 Armas que utilizan este calibre

El calibre 9 × 19 milímetros ha sido ampliamente utilizado tanto en pistolas semiautomáticas como en subfusiles, convirtiéndose en una opción esencial para fuerzas militares, policiales y civiles. Entre las pistolas más destacadas se encuentran la Glock 17, reconocida por su fiabilidad y diseño modular; la SIG Sauer P226, favorita de unidades especiales por su precisión; la Beretta 92FS, un clásico en el ámbito militar y policial; y la HK USP Compact, versátil y adaptable a distintos usos. En

el mundo de los subfusiles, este calibre brilla por su bajo retroceso y alta cadencia de fuego, como lo demuestran el legendario Heckler & Koch MP5, empleado por fuerzas de élite; el icónico UZI, compacto y robusto; o el moderno CZ Scorpion Evo 3, con diseño ergonómico y gran capacidad de personalización [12].



Figura 2-6 FN P9 (fuente propia)

En el caso del ejército español, existen dos variantes, mientras el ejército de tierra continúa utilizando la ya mencionada HK USP Compact [13], la Armada en concreto en Infantería de Marina, ha dado el salto de calidad hacia las conocidas Glock 45 [14], siendo estas una fusión de los modelos Glock 17 y Glock 19, solicitada al gigante empresarial por los Navy Seals americanos tras probar ambas en combate y descubrir que mediante la corredera de la 19 y la empuñadura de la 17 se obtendría un modelo ideal para las operaciones militares ofreciendo las ventajas que diferencian una pistola de otra [15].



Figura 2-7 comparación de Glock 19-45-17 (fuente propia)

2.6 Componentes de un Cartucho

Un cartucho metálico ordinario, como el 9 × 19 milímetros Parabellum, está compuesto por cuatro elementos principales[16]:

Vaina (casquillo): envase metálico generalmente de latón o acero que alberga en su interior la pólvora y sostiene al fulminante en su base. La vaina proporciona hermeticidad y soporta la presión de

los gases durante la deflagración. Su integridad es vital para evitar fugas de gases o fallos de fuego; la corrosión de la vaina por ambientes salinos o ácidos puede debilitar su estructura e incluso causar fallos de extracción en el arma.

Pólvora (carga propulsora): compuesto químico propelente sólido que, al deflagrar, genera los gases que impulsan el proyectil por el cañón. En municiones modernas se emplean pólvoras sin humo de base nitrocelulosa, a veces con nitroglicerina. La estabilidad química de la pólvora es crucial para la vida útil de la munición; factores ambientales como la temperatura elevada o la humedad pueden degradarla, alterando su velocidad de combustión y la presión generada [17]. Una pólvora húmeda o envejecida puede provocar fallos de disparo conocidos en inglés como misfires o una reducción significativa de la velocidad del proyectil.

Fulminante (iniciador): cápsula iniciadora ubicada en el culote de la vaina, que contiene un explosivo sensible normalmente estifnato de plomo encargado de encender la pólvora al ser percutido. El fulminante es un componente crítico ya que debe mantener su sensibilidad a lo largo del tiempo. Condiciones extremas, como temperaturas muy altas o contaminación química, pueden deteriorar el compuesto detonante, aumentando la probabilidad de fallos de ignición. Estudios previos señalan que la resistencia del fulminante a entornos adversos es determinante para la fiabilidad de la munición en almacenamiento prolongado.

Proyectil (bala): parte frontal del cartucho, usualmente un cilindro de plomo recubierto encamisado con metal duro, que es propulsado hacia el blanco. En el caso del 9 × 19 milímetros Parabellum, el proyectil pesa típicamente entre 7 y 8 gramos y puede poseer distintas puntas según su finalidad ogival, hueca, trazadora y otras de carácter especial. El proyectil en sí no sufre cambios químicos con el ambiente, aunque la oxidación o depósitos en su superficie por exposición salina podrían influir levemente en la precisión o causar incremento de rozamiento en el cañón. En general, el proyectil es el componente menos vulnerable ambientalmente, pero es el que finalmente materializa el desempeño balístico que se verá afectado si los demás componentes fallan.

Cada uno de estos componentes puede ser fuente de fallo si se degrada: por ejemplo, un sellado inadecuado entre la cápsula fulminante y la vaina podría permitir la entrada de humedad, estropeando la pólvora; una pólvora inestable podría quemar demasiado rápido creando sobrepresión o demasiado lento produciendo baja velocidad; un fulminante deteriorado podría no iniciar la reacción; y una vaina corroída podría romperse. Por ello, el diseño de experimentos debe considerar cómo los factores ambientales afectan a cada componente y, en conjunto, a la funcionalidad del cartucho. A continuación, se revisan las investigaciones y metodologías existentes relativas a ensayos acelerados de vida de municiones y dispositivos de un solo uso, que servirán de base teórica para nuestro diseño experimental.



Figura 2-8 componentes de un cartucho (fuente propia)

2.7 Test de vida acelerados y dispositivos de un solo uso

Los ensayos de vida acelerados conocidos como ALT, por sus siglas en inglés Accelerated Life Testing, constituyen una metodología clave para la evaluación del rendimiento y la confiabilidad de dispositivos de un solo uso, cuya naturaleza impide realizar pruebas de diagnóstico sin comprometer su funcionalidad. Estos dispositivos, como municiones, granadas, explosivos iniciadores o chaffs, permanecen latentes durante largos periodos de almacenamiento, siendo utilizados una única vez, lo que genera un reto significativo para su análisis estadístico y control de calidad [\[18\]](#).

En el ámbito científica, el ALT se ha aplicado habitualmente mediante la exposición de los dispositivos a condiciones de estrés acelerado, como pueden ser la temperatura, la humedad, la presión, la salinidad entre otros, durante periodos breves, con el objetivo de inducir un deterioro representativo del envejecimiento real, pero en menor tiempo. Sin embargo, en el caso específico de los dispositivos de un solo uso, este tipo de pruebas se ve limitado por la naturaleza destructiva del muestreo y la frecuente presencia de datos censurados, ya que no todos los dispositivos fallan en condiciones experimentales.

Estudios recientes, como los realizados por N. Balakrishnan en 2021 [\[19\]](#) han propuesto modelos específicos para este tipo de dispositivos, incluyendo distribuciones Weibull y Gamma, así como enfoques bayesianos y métodos de estimación robusta para inferir sobre confiabilidad y vida útil bajo muestreo destructivo. Además, se ha investigado el uso de pruebas de estrés escalonado con datos censurados por intervalo y métodos no paramétricos adaptados al contexto de los one-shot devices, término utilizado en la lengua inglesa para referirse a ellos.

El Departamento de Defensa de EE.UU. ha sido uno de los principales impulsores del análisis de confiabilidad en estos sistemas, publicando guías técnicas como las conocidas “STARS” – Selected Topics in Assurance Related Technologies, estas están enfocadas en el diseño de ensayos específicos para cargas explosivas, componentes pirotécnicos y sistemas de ignición. Estos documentos establecen la necesidad de procedimientos estadísticos adaptados al muestreo irrepetible ya la baja disponibilidad de datos [\[20\]](#).

En el ámbito nacional, el proyecto EIDUD plantea la integración de estos enfoques internacionales en un marco metodológico, incorporando tanto pruebas físicas como simulaciones estadísticas. La evaluación de la munición de 9×19 milímetros Parabellum en este contexto se alinea

con los criterios establecidos en la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa, dentro de la subárea de apoyo al ciclo de vida de armas y municiones.

2.7.1 Modelos estadísticos para confiabilidad con muestreo destructivo

El estudio de la confiabilidad en dispositivos de un solo uso plantea desafíos estadísticos únicos, dado que cada unidad probada queda inservible tras la evaluación, imposibilitando la observación repetida sobre una misma muestra. Esta limitación, conocida como muestreo destructivo, reduce considerablemente el volumen de datos disponibles y obliga a emplear técnicas estadísticas específicas para datos incompletos o censurados. En este contexto, las distribuciones de probabilidad clásicas no siempre son aplicables, por lo que se recurre a modelos como la distribución Weibull, ampliamente utilizada en ingeniería de confiabilidad por su capacidad de modelar distintos tipos de fallos a lo largo del tiempo mediante el ajuste de su forma y escala. La distribución Gamma también ha ganado protagonismo en escenarios donde la tasa de fallo no es constante y se requiere un mayor grado de flexibilidad.

Diferentes estudios destacan la importancia de incorporar enfoques semi-paramétricos cuando no es posible asumir con certeza la estructura de la función de distribución subyacente, situación común en entornos militares y de defensa. Este tipo de herramientas estadísticas permite obtener estimaciones más robustas en presencia de incertidumbre, mejorando la capacidad predictiva del sistema bajo evaluación. En aplicaciones militares, donde los dispositivos son almacenados durante largos periodos y utilizados en condiciones extremas, las decisiones logísticas y operativas deben basarse en modelos que integren adecuadamente esta variabilidad. Así, la ingeniería de confiabilidad se convierte en un pilar esencial para establecer políticas de mantenimiento preventivo, calendarios de sustitución y protocolos de seguridad asociados al uso de dispositivos que no permiten la evaluación convencional [21].

2.7.2 Ensayos destructivos vs no destructivos en el ámbito militar

En el sector militar, la elección entre ensayos destructivos y no destructivos está condicionada principalmente por la criticidad funcional del componente, el riesgo operativo asociado a su fallo, y el impacto económico y logístico de su evaluación. Los ensayos no destructivos se han consolidado como una herramienta fundamental en la inspección de estructuras complejas y de alto valor añadido, como blindajes, fuselajes de aeronaves, submarinos o componentes electrónicos sensibles. Métodos como la inspección por ultrasonidos, radiografía industrial, corrientes inducidas o termografía infrarroja permiten detectar grietas internas, corrosión, porosidades o defectos de fabricación sin alterar la integridad del objeto, siendo particularmente útiles en operaciones de mantenimiento preventivo o en fases de control de calidad de producción en serie [22].

Sin embargo, esta aproximación no es viable para el análisis de dispositivos de un solo uso, como municiones, granadas, detonadores o componentes pirotécnicos. Estos sistemas están diseñados para activarse una única vez, y su funcionalidad solo puede ser evaluada de forma completa mediante ensayos destructivos, donde la unidad queda inutilizable tras la prueba. Este tipo de ensayos, aunque más costosos en términos de materiales y limitantes desde el punto de vista estadístico debido al tamaño muestral reducido, son los únicos capaces de simular condiciones reales de uso y ofrecer datos directos sobre los modos de fallo más probables. En muchos casos, son imprescindibles para validar la seguridad operativa de los dispositivos antes de su despliegue o almacenamiento prolongado.

Las empresas del ámbito militar muestran un creciente interés en la combinación de ambas metodologías, especialmente en el ámbito de la defensa, donde la complejidad de los sistemas y la necesidad de minimizar los errores en el campo operativo justifican estrategias de inspección híbridas. Esta aproximación dual permite, por ejemplo, utilizar técnicas no destructivas para preseleccionar

muestras aparentemente estables, y luego aplicar ensayos destructivos sobre ellas para confirmar hipótesis de fallo o validar comportamientos anómalos detectados.

En el caso concreto de la munición de 9×19 milímetros Parabellum, los ensayos destructivos han demostrado ser esenciales para determinar umbrales térmicos críticos, tolerancia a la humedad o a la salinidad, y la resistencia del fulminante demostrando ser esenciales para determinar umbrales térmicos críticos, tolerancia a la humedad o a la salinidad, y la resistencia del fulminante y de la pólvora ante ambientes contaminados. entrada [23]. Estos estudios han permitido establecer límites operativos seguros y diseñar protocolos de almacenamiento adaptados a diferentes entornos. Por tanto, en el contexto militar, los ensayos destructivos no son una alternativa, sino una necesidad metodológica, especialmente cuando se busca garantizar la confiabilidad de dispositivos que no pueden fallar en el momento de su uso.

2.8 Estudios de confiabilidad en municiones

En el análisis de sistemas de armamento, el estudio de la confiabilidad en municiones de pequeño y mediano calibre como son los casos de los cartuchos de 9×19 milímetros Parabellum, 5.56×45 milímetros OTAN y 7.62×51 milímetros OTAN representa un campo emergente de creciente interés, especialmente en contextos donde la exposición prolongada a condiciones ambientales extremas puede comprometer el rendimiento funcional de estos dispositivos [24]. A diferencia de otras plataformas de armas complejas, como misiles o sistemas de artillería, estas municiones suelen pasar años almacenadas antes de su uso, y no existe un protocolo estandarizado de revisión funcional previo al empleo. Esto convierte el análisis de su confiabilidad en un aspecto crítico desde el punto de vista de la logística militar, la seguridad operativa y la toma de decisiones estratégicas.

El cartucho de 9×19 milímetros, por ejemplo, es ampliamente utilizado por las Fuerzas Armadas y cuerpos de seguridad a nivel mundial debido a su equilibrio entre tamaño, capacidad, retroceso y penetración. Sin embargo, sus componentes internos particularmente la pólvora y el fulminante son sensibles a factores como la humedad, temperaturas extremas, salinidad, y variaciones químicas del entorno, como ambientes con pH ácido o básico. Estudios experimentales en este campo han demostrado que la exposición prolongada a estos agentes puede reducir significativamente la energía de salida, provocar fallos en la ignición del estopín o alterar la combustión de la pólvora [25]. En casos más extremos, se ha observado oxidación en la cápsula, desprendimiento del proyectil o hinchamiento de la vaina, lo que impide su inserción segura en la recámara.

En cuanto al 5.56×45 mm, cartucho estándar de fusiles de asalto como el M4 o el HK G36, la problemática es aún más sensible debido a la presión generada y la alta velocidad de salida que caracteriza a esta munición. Cualquier variación mínima en el grano de pólvora o en el sellado del fulminante puede modificar la presión interna y generar disfunciones balísticas o incluso fallos mecánicos en el arma. Estudios técnicos desarrollados por centros de pruebas militares han explorado los efectos de la humedad ambiental combinada con ciclos térmicos, detectando pérdida de estanqueidad y riesgo de ignición parcial [26].

En el caso del 7.62×51 mm, usado en ametralladoras medias, fusiles de precisión o fusiles de tirador selecto, los estudios de confiabilidad se centran especialmente en la estabilidad estructural de la vaina y la resistencia del proyectil a la deformación. Las altas exigencias energéticas de esta munición requieren una integridad perfecta de los componentes, especialmente si se utilizan en condiciones de presión barométrica variable (como en operaciones aerotransportadas o de montaña) o en escenarios con alta salinidad, donde se ha documentado un incremento del desgaste por corrosión [27].

2.9 Normativas y estándares militares aplicables al análisis de fiabilidad de municiones

El desarrollo, almacenamiento y uso de municiones en el entorno militar está regulado por un conjunto de normas técnicas y estándares militares que aseguran tanto la seguridad operacional como la homogeneidad en la fabricación, trazabilidad y validación de estos productos. Estas normativas son establecidas por organizaciones nacionales como puede ser el Departamento de Defensa de EE.UU. o el mismo Ministerio de Defensa español e internacionales como es el caso de la OTAN o la ISO en ciertas aplicaciones duales y constituyen la base doctrinal y técnica sobre la cual se definen los parámetros de fiabilidad, pruebas ambientales y ciclos de vida útil de las municiones.

Una de las referencias más destacadas a nivel internacional es la MIL-STD-810 H, publicada por el Departamento de Defensa de EE.UU. Este estándar establece los procedimientos para ensayos ambientales que simulan condiciones reales de operación, como son el calor seco, el frío extremo, los ciclos de humedad, la niebla salina, las vibraciones, los choques, la presión baja y otros factores reseñables [28]. En el contexto del presente trabajo, esta norma resulta especialmente relevante, ya que sienta las bases del diseño de pruebas de vida acelerada, ALT, recomendando cómo definir los perfiles de estrés, la duración de las exposiciones y los criterios de evaluación de fallo. Por ejemplo, establece protocolos detallados para evaluar cómo reacciona una munición expuesta a +71 °C durante 24 horas o sometida a ciclos de temperatura de -40 °C a +60 °C, lo cual es comparable a los tratamientos experimentales planteados en este Trabajo de Fin de Grado.

Por otro lado, la MIL-STD-1168 regula la marcación, codificación y embalaje de municiones, asegurando su correcta trazabilidad en función del lote de producción, tipo de propulsante, fecha de fabricación, y condiciones de almacenamiento [29]. Esta normativa es vital para la gestión de la fiabilidad a lo largo del tiempo, ya que permite identificar correlaciones entre fallos y series defectuosas o almacenamientos inadecuados. Además, establece los principios del etiquetado por colores, niveles de sensibilidad y compatibilidad de almacenamiento que forman parte del ciclo logístico militar.

En el ámbito de la OTAN, destaca la AOP-38 (Allied Ordnance Publication), que define las condiciones ambientales de almacenamiento y transporte de municiones y explosivos. Esta norma incluye aspectos como ventilación, humedad relativa, temperatura promedio, rotación de inventario y recomendaciones de vida útil máxima según el tipo de munición. Su aplicación se traduce en el establecimiento de límites de obsolescencia operativa, recomendaciones de inspección periódica y condiciones mínimas para su uso seguro en zonas de operaciones.

Complementariamente, existen documentos técnicos STANAG, Standardization Agreements, relacionados con la evaluación de municiones en situaciones de estrés, como el STANAG 4170, que trata sobre la seguridad de los materiales explosivos bajo condiciones extremas [30]. Estos estándares son clave para definir los criterios de validación técnica previa al despliegue operativo, especialmente en misiones internacionales bajo mando OTAN.

Finalmente, en el ámbito nacional español, el Ministerio de Defensa adopta e integra muchas de estas normativas mediante documentos PECAL (Publicaciones Españolas de Calidad) y requisitos específicos del Ejército de Tierra, la Armada o el Ejército del Aire. Estas normas exigen que los productos suministrados a las Fuerzas Armadas cumplan con condiciones de fiabilidad verificadas mediante ensayos ambientales representativos y certificaciones técnicas homologadas [31]. Por todo ello, los estándares militares no solo ofrecen un marco regulador, sino que constituyen una herramienta metodológica esencial para el diseño de experimentos de fiabilidad, especialmente cuando se trata de dispositivos de un solo uso, como la munición, donde el margen de error debe ser prácticamente nulo. El cumplimiento de estas normativas garantiza que los resultados del estudio no sólo sean

técnicamente válidos, sino también alineados con los requisitos operativos reales que rigen la Defensa nacional e internacional.

2.10 Diseños Factoriales

Los diseños factoriales constituyen una herramienta fundamental dentro del Diseño de Experimentos (DOE), ampliamente utilizada para estudiar el comportamiento de sistemas complejos bajo la influencia simultánea de múltiples factores. A diferencia de los experimentos mono-factoriales, donde solo se evalúa el efecto individual de una variable, los diseños factoriales permiten analizar también las interacciones entre factores (Figura 2-9), lo que resulta especialmente crítico en entornos como el industrial o el militar, donde el efecto combinado de ciertas condiciones ambientales puede generar resultados no predecibles al considerar los factores de forma aislada [32].

En un diseño factorial, todos los niveles de cada factor se combinan con todos los niveles de los demás factores. Por ejemplo, si se consideran dos factores, A y B, cada uno con dos niveles (alto y bajo), el diseño factorial completo tendrá $2 \times 2 = 4$ combinaciones de tratamientos. En general, si hay k factores con n niveles cada uno, el número total de combinaciones viene dado por:

$$N = n^k$$

En el ámbito de sistemas críticos, como la evaluación de armamento, estos diseños permiten maximizar la información obtenida con un número reducido de pruebas, siendo también adaptables en su versión fraccionada cuando las combinaciones posibles son demasiado elevadas.

2.10.1 Conceptos Claves en el Diseño Factorial

Factores y Niveles: Un factor es una variable independiente manipulada en el experimento, mientras que un nivel es un valor específico que toma dicho factor. En este estudio, los factores incluyen la temperatura, la salinidad y el pH, mientras que los niveles pueden ser condición ambiental estándar o extrema.

Tratamientos: Se refiere a las combinaciones específicas de niveles de los factores. En este caso, cada cartucho será sometido a una combinación única de temperatura, salinidad y pH.

Efectos Principales e Interacciones: El efecto principal de un factor se refiere al impacto promedio sobre la variable de respuesta cuando dicho factor varía, ignorando los otros factores (Figura 2-10). Las interacciones ocurren cuando el efecto de un factor depende del nivel de otro factor, como el caso de la corrosión por salinidad que podría intensificarse a altas temperaturas.

Estas tres variables nos dejan un modelo estadístico para un diseño factorial de tres factores (A, B, C) el cual se expresa como:

$$Y_{ijkl} = \mu + a_i + \beta_j + \gamma_k + (a\beta)_{ij} + (a\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (a\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:

Y_{ijkl} : Variable de respuesta

μ : Media global

$\alpha_i, \beta_j, \gamma_k$: Efectos principales de los factores temperatura, salinidad y pH.

$(\alpha\beta)_{ij}, (\alpha\gamma)_{ik}, (\beta\gamma)_{jk}$: Efectos de interacción entre dos factores.

$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$: Interacción de los tres factores.

ε_{ijkl} : Error experimental

Obsérvese que tanto "Y" como "ε" contienen un cuarto subíndice, el cual al tratarse de experimentos que se repiten n veces muestra en qué repetición del experimento nos encontramos y el error asociado a ese momento exacto del experimento.

2.10.2 Evaluación de resultados

Dado que el análisis de varianza (ANOVA) no será utilizado en este proyecto, esto se debe a que los datos obtenidos no siguen una distribución gaussiana, lo que podría comprometer la validez de sus resultados. ANOVA asume normalidad en los grupos analizados y homogeneidad de variaciones, condiciones que no se cumplen en este estudio. En su lugar, se optará por métodos estadísticos más adecuados para tratar distribuciones no normales y evaluar de manera precisa el impacto de los factores ambientales. Para determinar el impacto de los factores evaluados se aplicarán:

- Comparaciones gráficas: Se representarán los resultados mediante diagramas de dispersión y gráficos de tendencia para visualizar el efecto de cada factor.
- Análisis de tendencias: Se estudiará cómo varía la respuesta de la munición (por ejemplo, su resistencia a la corrosión) en función de la combinación de los factores.
- Regresión lineal y diferencias porcentuales: Se empleará un modelo de regresión simple para estimar la influencia de cada variable independiente sobre la respuesta.
- Desviación estándar y propagación de incertidumbre: Se calcularán las desviaciones estándar de los tratamientos para evaluar la estabilidad de los datos obtenidos.

Mediante estos métodos se identificará de manera efectiva qué factores tienen un impacto significativo sin la necesidad de realizar análisis de varianza, asegurando la validez de las conclusiones obtenidas.

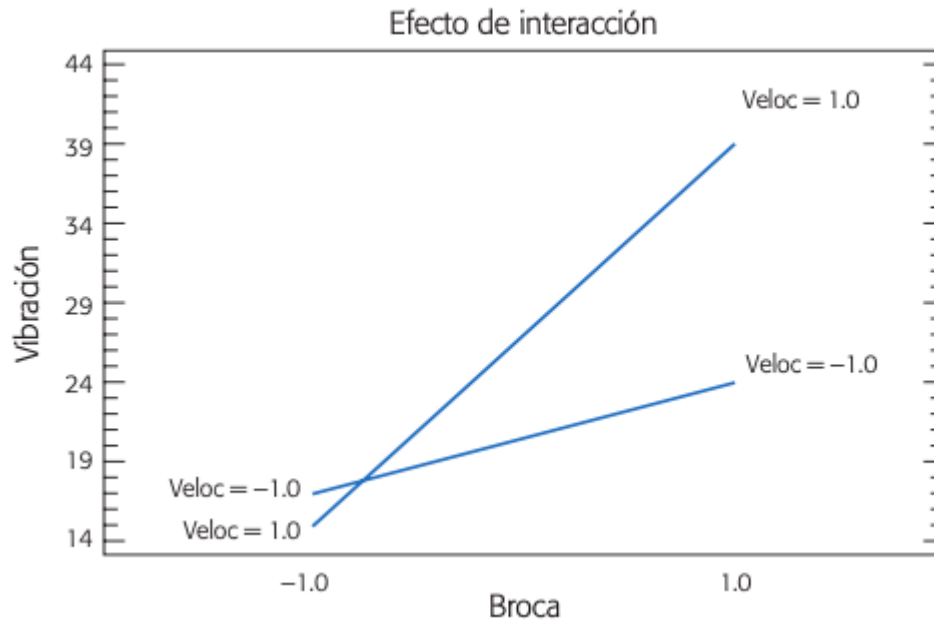


Figura 2-9 Ejemplo de interacción

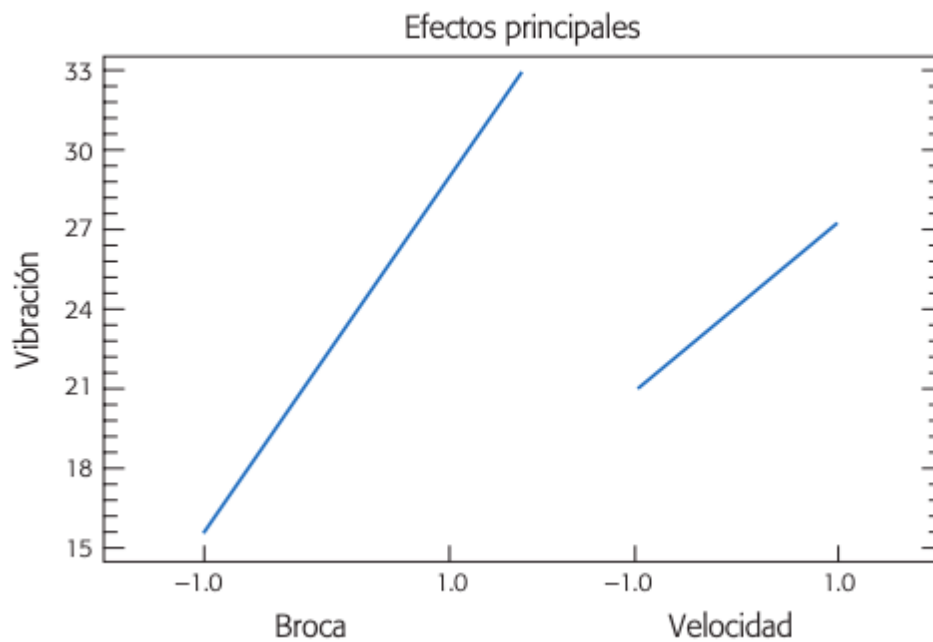


Figura 2-10 Ejemplo de efectos principales

2.12 Necesidad de estandarizar métodos experimentales en munición militar

A pesar de los avances en modelización estadística, normativas técnicas y pruebas empíricas, la estandarización de los métodos de evaluación para la fiabilidad de municiones de pequeño calibre sigue siendo limitada, especialmente en el caso de cartuchos como el 9 × 19 milímetros Parabellum.

Esta situación dificulta la comparación de resultados entre diferentes centros de pruebas, países y fabricantes. Instituciones como la OTAN han promovido acuerdos como el STANAG 4170 y la AOP-38, pero aún no existe un marco metodológico homogéneo que combine adecuadamente pruebas de vida acelerada, muestreo destructivo y análisis estadísticos robustos aplicados a dispositivos de un solo uso.

En este contexto, el presente trabajo pretende contribuir al desarrollo de una línea metodológica coherente, que pueda ser replicada y adaptada a diferentes condiciones de almacenamiento y uso, fortaleciendo así la capacidad de análisis de fiabilidad en entornos militares exigentes.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Análisis y selección de los factores

El presente estudio se enfocó en el diseño de experimentos de vida acelerada para evaluar cómo distintos factores ambientales afectan la integridad y el rendimiento de cartuchos de munición calibre 9 × 19 milímetros Parabellum. Tras considerar las condiciones operacionales típicas de la Infantería de Marina y del Ejército español, se seleccionaron tres factores de estrés principales para estudiar: temperatura, salinidad y pH del entorno. Estos factores corresponden a condiciones ambientales comunes que pueden degradar la munición en escenarios reales. Por ejemplo, un combatiente desplegado en un teatro de operaciones podría enfrentar temperaturas extremas como los encontrados en desiertos, estibas al sol en buques, o incendios cercanos, ambientes salinos en operaciones anfibia o clima marítimo con aire salino y exposición a agentes químicos o terrenos de pH extremo creados a través de derrames de combustibles, suelos ácidos o lluvias ácidas en zonas industriales.

Además de su relevancia operativa, dichos factores fueron elegidos porque representan mecanismos de degradación complementarios: la temperatura puede acelerar reacciones químicas y degradar la pólvora; la salinidad promueve la corrosión metálica afectando en nuestro caso a la vaina y al fulminante sumado a la absorción de humedad y ambientes de pH extremo ácidos o básicos pueden corroer metales y desestabilizar compuestos químicos sensibles. Considerados de forma conjunta, abarcan un espectro amplio de estrés ambiental.

La planificación experimental desarrollada en este Trabajo de Fin de Grado establece las bases metodológicas para una serie de pruebas controladas en las que la munición será sometida a estas condiciones, tanto de manera aislada como en combinación. Cabe destacar que este trabajo constituye una etapa inicial dentro del proyecto integral EIDUD, de modo que también se prevé realizar pruebas preliminares a pequeña escala. Dichas pruebas servirán para ajustar parámetros como por ejemplo, rangos exactos de temperatura o concentración salina adecuados y validar los protocolos antes de su implementación en un programa experimental a gran escala. Gracias a este enfoque iterativo, se busca asegurar que los ensayos definitivos proporcionen datos útiles y confiables sin incurrir en riesgos innecesarios para el personal o el material.

Por lo tanto, los factores seleccionados temperatura, salinidad, pH reflejan las condiciones más relevantes y potencialmente dañinas para la munición en escenarios operativos extremos. No solo interesa comprender el impacto individual de cada variable sobre los cartuchos, sino también sentar las bases para analizar sus interacciones en situaciones realistas donde estas adversidades pueden

concurrir simultáneamente. Con estos factores definidos, se procedió al diseño detallado del plan experimental que permitirá una evaluación rigurosa.



Figura 3-1 Imagen de militares españoles operando en climas extremos (fuente propia)



Figura 3-2 militares españoles operando en ambientes de pH no neutro y ambientes salinos (fuente Casa Real y Minisdef)

3.2 Diseño de Experimentos

Una vez seleccionados los factores de estudio, se procedió a realizar un diseño en los experimentos a llevar a cabo, partiendo de la base de los 1000 cartuchos del calibre mencionado que serán proporcionados.

Esta segmentación se ha realizado de manera estratégica, asegurando que cada condición ambiental sea evaluada en distintos niveles de intensidad y duración. Asimismo, se ha reservado un grupo de control, que servirá como referencia para comparar el comportamiento de los cartuchos no expuestos a condiciones adversas con aquellos que sí han sido sometidos a estrés ambiental.

La distribución de los cartuchos dentro del experimento permite evaluar los efectos de cada factor de manera aislada y en combinación. Con el fin de obtener un análisis detallado, los cartuchos se dividieron de forma que se lograra la exposición a diferentes rangos de temperatura, un contacto con medios salinos, tanto por inmersión en soluciones de distinta concentración como por exposición a ambientes húmedos controlados y por último influencia del pH, mediante pruebas en líquidos ácidos y exposición a vapores corrosivos. Para terminar con una combinación de los tres factores anteriores, simulando condiciones ambientales más complejas, en las que los cartuchos puedan estar expuestos simultáneamente a temperaturas extremas, altos niveles de salinidad y variaciones de pH, replicando entornos operativos adversos como zonas costeras de clima cálido, áreas industriales con alta contaminación o regiones con cambios climáticos bruscos.

Para garantizar la fiabilidad de los resultados, se han diseñado repeticiones dentro de cada prueba y se han incluido periodos de exposición prolongados, que permitirán analizar cómo varían los efectos de estos factores en escenarios de almacenamiento o transporte prolongado.

A lo largo del proceso experimental, se llevaría a cabo un riguroso registro de cada prueba, documentando visualmente los cambios observados en los cartuchos a medida que avanzaba la exposición a las distintas condiciones ambientales. Para ilustrar estos efectos de manera clara, se tomarán fotografías en diferentes etapas del experimento, mostrando la evolución de la degradación en los cartuchos a lo largo del tiempo.



Figura 3-3 Comparación Cartuchos degradados por agentes externos y cartuchos en perfecto estado(fuente propia)

3.2.1 La Temperatura

Para examinar el efecto de la temperatura, se han destinado 250 cartuchos. Estos se someterán a temperaturas elevadas muy por encima de las habituales de almacenamiento, con variaciones también en el tiempo de exposición. En concreto, se han establecido tres niveles de temperatura extremos: 100 °C, 150 °C y 200 °C. Estas temperaturas fueron seleccionadas con base en condiciones

ambientales límite que podrían alcanzarse en escenarios operativos o accidentes: por ejemplo, 100 °C equivale aproximadamente a la temperatura en el interior de un vehículo cerrado expuesto al sol en clima desértico o a munición cercana a una fuente de calor intenso; 150 °C representa una situación de fuego indirecto o proximidad a incendios sin alcanzar aún el punto de ignición de la pólvora, y 200 °C se aproxima a umbrales críticos donde existe riesgo de autoignición de los compuestos explosivos si la exposición es prolongada.

Cada uno de estos niveles térmicos se combinará con distintos tiempos de exposición para evaluar tanto efectos agudos como crónicos del calor. Por ejemplo, se contemplan exposiciones cortas de 1 hora para simular situaciones transitorias de altas temperaturas, y exposiciones más largas de varias horas, en concreto de 3 y 6 horas. Los cartuchos se colocarán en la mufla de laboratorio con control preciso de temperatura al alcanzar el tiempo fijado, se dejarán enfriar a temperatura ambiente de forma natural antes de proceder a su evaluación. Se destinan 15 cartuchos por franja horaria y franja de temperatura

Adicionalmente, se incluye en el diseño un grupo de 45 cartuchos sometidos a una temperatura de -14°C, el mínimo alcanzable por el equipo disponible, lo que permite simular condiciones de frío extremo, como aquellas presentes localidades de climas invernales, esta experimentación será llevada a cabo en las mismas franjas horarias que las mencionadas anteriormente. Junto con esta prueba, se realizará una evaluación más dinámica mediante ciclos de temperatura, en los cuales las municiones serían alternadas entre -14°C y 200°C, replicando situaciones de transporte a través de distintas zonas climáticas o cambios bruscos de temperatura ambiental, se destinan 45 cartuchos para estas temperaturas.

Durante y después de la exposición térmica, se observarán posibles cambios físicos en los cartuchos como pueden ser la decoloración, las filtraciones de sellado o exudación de compuestos. Tras el periodo de enfriamiento, cada cartucho será probado mediante pruebas de fuego en galerías de tiro para medir su rendimiento balístico a través de la velocidad inicial y verificar si ocurren fallos de ignición. Estos ensayos destructivos posteriores permitirán determinar si la temperatura extrema causó degradación suficiente para aumentar la tasa de los cartuchos que no detonan o de las detonaciones con retardo, o incluso para reducir la energía balística del disparo. Los resultados de los cartuchos sometidos a 100, 150 y 200 °C se compararán entre sí con el grupo de control estos son cartuchos almacenados a temperatura ambiente bajo condiciones estándar para cuantificar la pérdida de prestaciones o fiabilidad en función de la temperatura alcanzada.

Para complementar el análisis, se consideró la posibilidad de exposiciones prolongadas, sometiendo un subconjunto de 45 cartuchos a períodos de 12 y 24 horas, permitiendo así evaluar el efecto de una exposición térmica sostenida. Esta parte del estudio resulta especialmente relevante para comprender cómo la temperatura puede afectar a la estabilidad de los cartuchos a lo largo del tiempo.

3.2.2 Salinidad

Otro aspecto importante en el estudio es la influencia de ambientes salinos en la integridad de los cartuchos. Para ello, se han destinado 250 cartuchos a pruebas de exposición a salinidad en distintas formas: ya sea mediante inmersión directa en soluciones salinas, exposición a niebla salina o simulando condiciones ambientales de alta salinidad. Estas pruebas tienen como objetivo evaluar el comportamiento de los cartuchos ante la corrosión y deterioro que podrían sufrir en ambientes marinos o en áreas con alta concentración de sal, lo cual es crucial para garantizar su durabilidad y desempeño en condiciones extremas:

Por un lado, se realizarán pruebas de inmersión en solución salina, subgrupos de 90 cartuchos serán sumergidos en soluciones de cloruro de sodio, NaCl, de distinta concentración. Para estas

concentraciones, se utilizará agua salina al 3,5% , porcentaje que simula el agua de mar estándar además de una solución más concentrada del 10% que represente condiciones de salinidad extrema encontrada en lagunas salinas. A todo esto se añade una inmersión en solución salina al 35%, concentración encontrada en el ambiente salino más extremo de la Tierra, el Mar Muerto. Estas inmersiones se llevarán a cabo durante períodos controlados de 1 hora, 6 horas y 24 horas manteniendo la temperatura ambiente constante. Este método permite evaluar la corrosión por contacto directo con agua salada en partes críticas como la junta del fulminante y la boca de la vaina. Se repartirán 10 cartuchos por cada concentración y por cada franja horaria determinada.

Siguiendo la experimentación con una exposición a niebla salina por parte de otros 90 cartuchos siguiendo protocolos similares a las norma mencionada MIL-STD-810H, se colocarán cartuchos en una cámara de niebla salina, en tres niveles de concentración de cloruro sódico en solución, con el objetivo de simular distintos grados de severidad ambiental. El primer nivel, correspondiente a una solución del 1% de NaCl, representa una exposición ligera a ambientes costeros urbanos o salpicaduras puntuales. El segundo nivel, con una concentración del 5%, se basa en el estándar internacional marcado por la norma mencionada, utilizado para simular una atmósfera marina activa típica de zonas portuarias o exposición prolongada al aire marino. Por último, el nivel más severo corresponde a una solución del 10% , empleada para representar condiciones salinas extremas, como podrían encontrarse en cubiertas metálicas sin mantenimiento o ambientes similares al del Mar Muerto. Estas tres concentraciones permiten analizar cómo varía la degradación de la munición en función de la intensidad del entorno salino, cubriendo desde situaciones operativas habituales hasta escenarios límite en términos de corrosión acelerada, para ello se establecen las mismas franjas horarias anteriormente mencionadas.

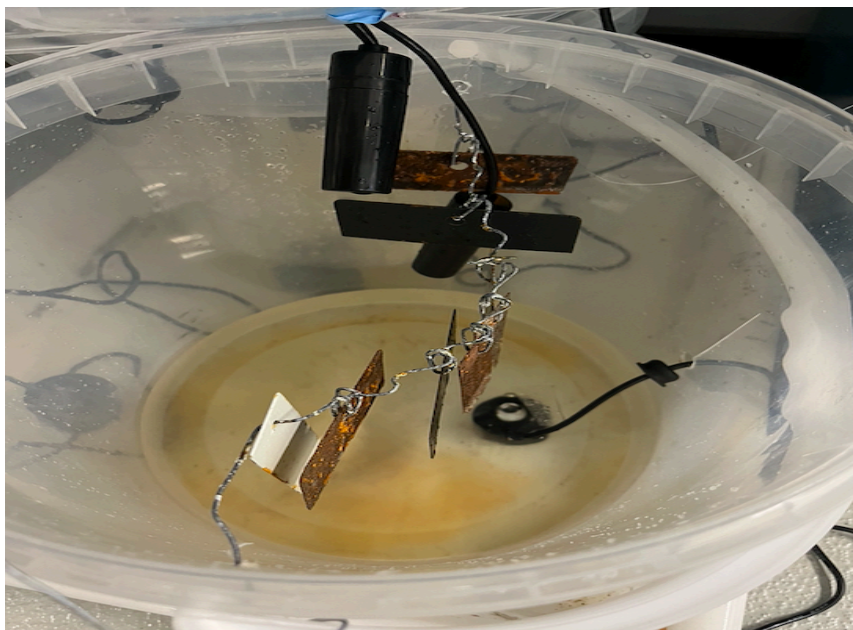


Figura 3-4 ejemplo de cámara salina a utilizar (fuente propia)

Además como último experimento para analizar la salinidad se proponen 70 cartuchos para evaluar el impacto de la humedad relativa en la corrosión de los cartuchos. Para ello, se utilizarán cámaras de ambiente controlado con niveles de humedad del 60%, 80% y 100%. Sometiéndolos durante 24, 72 y 168 horas. Este procedimiento permitirá analizar cómo la combinación de humedad y salinidad influye en la degradación de los cartuchos, reproduciendo condiciones que podrían encontrarse en almacenes cercanos a ambientes marinos o en zonas con alta condensación.

En todos los casos anteriores, tras la exposición salina los cartuchos serán secados cuidadosamente a temperatura ambiente. Se inspeccionarán visualmente para documentar el grado de corrosión: se espera desde ligeras manchas o pátina blanquecina en el latón, hasta corrosión verde o picaduras profundas en los casos más severos. Luego, se procederá a disparar las municiones en la galería de tiro, registrando si hubo fallos debido a que el fulminante corroído no detonase, causando un fallo de fuego y midiendo la velocidad y precisión obtenidas. Estas mediciones indicarán en qué medida la salinidad afectó la integridad del cartucho debido a la corrosión de la vaina o contaminación de la pólvora y su desempeño balístico. Asimismo, se analizará si la resistencia a la salinidad varía según el tipo de exposición inmersión, niebla o una atmósfera salina lo cual aportará información sobre cuál es el modo más dañino y sobre posibles medidas de mitigación como podrían ser sellantes o recubrimientos protectores.

3. 2.3 Ph

El tercer factor ambiental considerado es el pH del entorno, para lo cual se asignan otros 250 cartuchos. Se investigará cómo la exposición a ambientes ácidos o fuertemente básicos afecta a la munición. Las situaciones reales que motivan este factor incluyen desde zonas industriales con atmósferas ácidas debido a emisiones de gases contaminantes que pueden generar lluvia ácida, derrames de sustancias químicas en almacenes, o incluso la exposición a suelos muy alcalinos. Para ello se plantean los siguientes ensayos:

Para comenzar a analizar este factor se propone la inmersión de 90 cartuchos en soluciones ácidas donde a través de preparar soluciones de pH ácido mediante ácido sulfúrico o nítrico diluidos a pH entre 2 y 3 en estas disoluciones se sumergirán cartuchos por intervalos determinados de 1 hora, 3 horas y 24 horas. Esto emula un contacto directo con líquidos corrosivos, para evaluar principalmente la resistencia de la vaina y fulminante frente a la corrosión ácida. También se propone probar la inmersión en una solución básica con pH's entre 11 y 12, adquirible mediante hidróxido de sodio diluido para cubrir el otro extremo, aunque los entornos fuertemente alcalinos son menos comunes que los ácidos en términos de exposición militar.

Siguiendo con exposiciones a vapores corrosivos donde se colocarán otros 90 cartuchos en un recipiente cerrado junto con una sustancia que emita vapores ácidos, sustancias como ácido acético o el ácido clorhídrico, estos cartuchos no tendrán contacto directo con el líquido. De esta forma, se simula la atmósfera corrosiva que podría haber en un almacén contaminado. Se controlará la concentración de vapor y el tiempo. En el caso del HCl Soluciones entre 1% y 5% producen vapores intensos en entornos cerrados mientras que el CH₃COOH en una disolución del 10–20% en volumen es capaz de generar vapores perceptibles. Por otro lado, repitiendo las franjas horarias anteriormente comentadas, se obtendrán resultados reseñables para lograr un ataque químico apreciable en la superficie de los cartuchos, en la unión del fulminante y posibles efectos en la composición del mismo.

Finalmente a través de un cambio del pH en humedad similar al caso de la salinidad, se analizarán los últimos 70 cartuchos de esta sección. Empleando una cámara donde la humedad contenida tenga un pH controlado mediante el añadido de gases ácidos al aire húmedo. Este experimento replicará condiciones de lluvia ácida donde la humedad condensada sobre los cartuchos tiene pH bajo y puede causar corrosión acelerada. A su vez el tiempo de exposición en este campo se tasa en las tres franjas anteriormente mencionadas.

Tras estos tratamientos, los cartuchos se neutralizarán mediante un lavado con agua destilada en el caso de inmersiones ácidas, para remover los residuos y se secarán completamente. Se documentarán las evidencias de corrosión o ataque químico, las soluciones ácidas pueden producir manchas, descascarillado y oxidación severa del metal. Posteriormente, como en los casos anteriores, se procederá a la prueba de disparo de cada cartucho. Aquí se pondrá especial atención a fallos de

fuego creados a raíz del encendido del fulminante, dado que los compuestos primarios son muy sensibles a la contaminación química, un ambiente ácido podría neutralizar parcialmente la mezcla detonante del fulminante, llevando a que el cartucho no detone al ser percutido. También se observarán posibles variaciones en la velocidad de salida, aunque es de esperar que el principal modo de fallo bajo estrés químico sea que el cartucho no se dispare frente a una degradación gradual del rendimiento.

3.2.4 Combinación:

Finalmente, se han planificado ensayos en los que los cartuchos serán expuestos simultáneamente a combinaciones de los tres factores anteriores, simulando condiciones ambientales complejas en las que coexisten múltiples estreses. A este bloque se destinan los 200 cartuchos restantes, subdivididos a su vez en varios escenarios representativos. Considerando combinaciones como las expuestas a continuación:

Un escenario en una costa tropical donde las cajas de munición metálicas se pudieran exponer a una radiación solar directa durante largos periodos de tiempo podría hacer que el metal alcanzase una temperatura alta oscilando entre los 60 y 70 °C. Esto sumado a una humedad o salinidad elevada debido a la presencia costera, sería simulado a través de niebla salina al 5% ya que supone un rango medio de la salinidad presente en dichos entornos. A esto se le sumaría una atmósfera ligeramente ácida con un pH cercano al 5 asumible debido a descomposiciones orgánicas o ligeras lluvias ácidas naturales. Con toda esta combinación se imitaría unas condiciones demandantes para una zona costera cálida donde la munición almacenada, o portadas por el combatiente podrían sufrir corrosión salina mientras está a temperatura moderadamente alta. Para este experimento se designarán 70 cartuchos y un tiempo de exposición de 24 horas, 48 horas y 72 horas para observar resultados que comprometan la integridad funcional del cartucho.

Otro escenario replicable sería el de una zona industrial cálida a través de temperaturas altas transmitidas por la maquinaria fijando esta en 100 grados sumado a vapores ácidos industriales de pH cercano al 4 y salinidad más leve fijada en un 2.5 %. En este escenario la munición está sometida a calor en presencia de contaminación química, como podría ocurrir en un depósito cercano a incendio de productos químicos, y se destinarían otros 70 cartuchos, con las mismas franjas horarias que las comentadas en el escenario anterior.

Por último un escenario altamente demandante imitando un clima extremo variable sería un entorno interesante de replicar, mediante ciclos de temperatura de frío intenso a un calor reseñable. En cuanto a frío estamos limitados por los medios disponibles, y esta temperatura se fijaría en -14 °C. En cuanto a la temperatura alta fijando esta en 80 °C sería suficiente para apreciar degradación en la pólvora presente en los cartuchos. A todo esto se le podría sumar una humedad condensante al 80 o 90% y siendo esta humedad salina en un 5% buscando una degradación real del cartucho. Las variaciones bruscas pueden crear condensación salina repetida sobre la munición, combinando corrosión y estrés mecánico por dilatación o contracción. Esto simulará escenarios de alta montaña con sal de deshielo o tránsito de municiones almacenadas a través de ambientes cálidos y fríos. Los últimos 60 cartuchos destinados para esta fase serían los sometidos a este estrés con franjas horarias más amplias de 24 horas, 72 horas y por último 168 horas.

El criterio de éxito de estos ensayos combinados será detectar la sinergia o interacciones entre factores, comprobando si la corrosión por sal se agrava cuando la temperatura es alta indicado a través de la interacción temperatura y salinidad, o si un cartucho expuesto a ambos sal y ácido sufre más daño que los daños por separado. Tras las exposiciones combinadas, los cartuchos se examinarán y dispararán de igual forma que en los casos anteriores. Se espera que estos escenarios combinados representen los peores casos en términos de degradación, ya que estresan simultáneamente varios aspectos del cartucho de forma estructural, química y corrosiva.

Para garantizar la fiabilidad de los resultados en este plan multifactorial, en cada combinación de factores se incluyen muestras replicadas mediante varios cartuchos por condición. Esto permitirá aplicar análisis estadísticos y estimar la variabilidad experimental. Adicionalmente, se han previsto algunos periodos de exposición prolongados en ciertos subgrupos, más allá de lo inicialmente planificado, con el fin de observar si los efectos se acentúan de forma no lineal con el tiempo, exponiendo algunos cartuchos al doble de tiempo que otros en la misma condición, para ver si el deterioro progresivo sigue una tendencia clara.

A lo largo de todo el proceso experimental, se llevará a cabo un registro minucioso de cada prueba. Esto incluye la documentación visual mediante fotografías en distintas etapas de la exposición, de modo que se pueda apreciar la evolución de la degradación como la corrosión creciente, o la decoloración, en los cartuchos con el tiempo. De esta forma en el informe final se podrá comparar imágenes de cartuchos antes y después de los ensayos para ilustrar los efectos observados. Se espera poder mostrar un cartucho severamente oxidado y con depósitos salinos tras la niebla salina, al lado de uno en perfecto estado del grupo control, evidenciando el contraste. Estas evidencias cualitativas complementarán los datos cuantitativos de rendimiento obtenidos en las pruebas de fuego.

Una vez realizadas todas las pruebas descritas tanto las individuales de cada factor como las combinadas, se dispondrá de un conjunto de datos completo que relaciona las condiciones ambientales con el comportamiento de la munición. Este conjunto de datos incluirá, para cada cartucho probado: la condición de estrés a la que fue sometido siendo este el nivel de cada factor, si el cartucho funcionó correctamente o falló, y medidas del rendimiento balístico a través de la velocidad de salida. Con esta información, se podrá llevar a cabo el análisis estadístico multifactorial: calculando los porcentajes de fallo bajo cada condición, estimando la influencia de cada factor en la probabilidad de fallo, y detectando interacciones significativas. Adicionalmente, se podrán ajustar modelos de fiabilidad; por ejemplo, estimar los parámetros de una distribución Weibull para la vida de los cartuchos en función de la temperatura, o utilizar modelos para relacionar la probabilidad de fallo con cada factor. Eventualmente, combinando los resultados de las distintas condiciones, se espera construir un modelo probabilístico capaz de predecir la vida útil de esta munición en diversos entornos de almacenamiento, extrapolando a condiciones normales a partir de los datos acelerados.

El diseño experimental que se propone es un diseño amplio que abarca desde pruebas aisladas de temperatura, salinidad y pH hasta escenarios combinados complejos, con suficiente número de muestras y replicación para asegurar conclusiones sólidas. La inclusión de un grupo de control formado por 50 cartuchos permite cuantificar la degradación relativa respecto a condiciones estándar, y la planificación de mediciones posteriores mediante las pruebas de fuego garantiza que los efectos observados se traducirán en parámetros de desempeño reales. Este desarrollo experimental, aplicado a los cartuchos 9 × 19 milímetros Parabellum, proporcionará datos valiosos no solo para validar la fiabilidad de esta munición en particular, sino también, en un plano más general, para mejorar los criterios de almacenamiento y mantenimiento de municiones en las Fuerzas Armadas españolas, así como para alimentar futuros estudios de modelización de fiabilidad en dispositivos de un solo uso.

3.3 Ensayos

Una vez definidos los factores a estudiar y los distintos tratamientos experimentales, es necesario analizar el tipo de ensayo más adecuado para evaluar el comportamiento de los cartuchos. Dado que se trata de dispositivos de un solo uso, el estudio requiere una combinación de enfoques destructivos y observacionales, tal y como se expone a continuación.

El objetivo principal de un ensayo es estudiar y entender cómo un dispositivo o material se comporta bajo diferentes condiciones, identificando los mecanismos que llevan a su fallo, el momento en que este ocurre ya sea en términos de tiempo o ciclos de uso y la gravedad del mismo traducido en tasa de fallos.

En función del efecto que producen sobre el objeto analizado, los ensayos pueden dividirse en dos categorías principales: destructivos y no destructivos. Los ensayos destructivos implican someter al material o dispositivo a condiciones extremas, como fuerzas intensas, hasta que se produce su colapso o fallo. Este tipo de pruebas provoca un daño irreversible en el objeto, alterando sus propiedades y haciéndolo inservible para su uso posterior. Un ejemplo clásico de ensayo destructivo es someter un material estructural a tracción hasta que se fracture [33].

Por otro lado, los ensayos no destructivos permiten examinar las características y propiedades de un objeto sin causarle daño alguno, manteniendo su integridad y funcionalidad. Técnicas como la inspección por ultrasonidos o rayos X son comunes en este tipo de pruebas, ya que permiten detectar defectos internos, como grietas o porosidades, sin alterar la estructura o composición del material. Ambos tipos de ensayos tienen implicaciones significativas en términos de costos y tiempo. Los ensayos destructivos suelen ser más costosos, ya que requieren la destrucción del material analizado, lo que implica la necesidad de reponerlo. No obstante, son indispensables en industrias donde la seguridad y la resistencia de los componentes son críticas, como en la aeronáutica o la construcción. Por su parte, los ensayos no destructivos son más económicos y permiten evaluar el objeto sin comprometer su utilidad, lo que los hace ideales para inspecciones rutinarias o controles de calidad [34].

La elección entre un ensayo destructivo y no destructivo dependerá de los objetivos del estudio, el tipo de material o dispositivo analizado, y las consideraciones económicas y prácticas asociadas a cada caso. Ambos enfoques son herramientas valiosas para garantizar la fiabilidad y seguridad de los materiales y componentes en diversas aplicaciones industriales.

3.3.1 Estadística descriptiva e Incertidumbre

Para garantizar la validez de los resultados obtenidos en el experimento, se aplican herramientas estadísticas que permiten cuantificar la variabilidad, establecer tendencias y evaluar la incertidumbre asociada a las mediciones. A continuación, se presentan los fundamentos de la estadística descriptiva utilizada en este trabajo, así como los criterios de clasificación de la incertidumbre aplicados.

La estadística descriptiva es una rama de la estadística cuyo objetivo principal es organizar, resumir y presentar los datos de manera comprensible. A diferencia de la estadística inferencial, que busca realizar generalizaciones sobre una población, la estadística descriptiva se limita a describir y presentar las características de un conjunto de datos específico, proporcionando una visión clara y concisa de los mismos [35].

Una de las herramientas más comunes en estadística descriptiva son las medidas de tendencia central, que nos permiten identificar el valor central o representativo de los datos. Entre estas medidas, se encuentra la media ($\bar{x}$), que se obtiene sumando todos los valores ($x_1, x_2, \dots, x_n$) y dividiendo entre el número total de observaciones (n):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Otra medida importante es la mediana, que es el valor central cuando los datos están ordenados. Si el conjunto de datos tiene un número impar de valores, la mediana es el valor que queda en el medio; si tiene un número par, se calcula como el promedio de los dos valores centrales. Además,

la moda es el valor que más veces se repite en el conjunto de datos y es útil para identificar los valores más comunes en un conjunto.

Por otro lado, las medidas de dispersión nos indican qué tan extendidos o agrupados están los datos alrededor de la media. Una de las medidas más simples es el rango (R), que se obtiene restando el valor mínimo (x_{min}) al valor máximo (x_{max}):

$$R = x_{max} - x_{min}$$

Sin embargo, el rango no proporciona información sobre la distribución intermedia de los valores. La varianza (σ^2) mide la dispersión de los datos respecto a la media, calculando el promedio de los cuadrados de las diferencias entre cada valor (x_i) y la media ($\bar{x}$):

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Finalmente, la desviación estándar (σ) es la raíz cuadrada de la varianza y se expresa en las mismas unidades que los datos, lo que facilita su interpretación:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

La desviación estándar proporciona una medida más accesible de la dispersión de los datos alrededor de la media.

Existen también medidas de posición que permiten ubicar un valor dentro de un conjunto de datos. Los cuartiles dividen el conjunto de datos en cuatro partes iguales. El primer cuartil (Q_1) deja el 25% de los datos por debajo de él, el segundo cuartil (Q_2) es la mediana y el tercer cuartil (Q_3) deja el 75% de los datos por debajo. Los percentiles son similares, pero dividen los datos en 100 partes, y permiten un análisis más detallado de la distribución.

Finalmente, la distribución de frecuencia organiza los datos en intervalos o clases, mostrando cuántos valores caen dentro de cada clase. Esto se representa visualmente mediante gráficos como histogramas y diagramas de cajas (box plots), que permiten identificar de manera visual la forma en que se distribuyen los datos, los valores atípicos y las concentraciones de los mismos.

En cualquier estudio experimental, la incertidumbre es un factor determinante que influye en la validez de los resultados obtenidos. En el análisis de la munición 9 × 19 milímetros Parabellum, es fundamental considerar y gestionar adecuadamente la incertidumbre para garantizar que las conclusiones reflejen fielmente el comportamiento de la munición bajo diferentes condiciones ambientales.

La incertidumbre puede clasificarse en dos tipos principales [36]:

- Incertidumbre Tipo A: Se deriva de la variabilidad estadística de los datos y se cuantifica mediante repetición de mediciones, y análisis de la desviación estándar. En este estudio, la variabilidad en la velocidad de salida del proyectil o en el tiempo de ignición del fulminante podría ser un ejemplo de esta categoría.

- Incertidumbre Tipo B: Relacionada con errores sistemáticos, como los asociados a la precisión de los equipos de medición o a condiciones incontrolables del entorno. Un caso relevante en esta investigación como se verá más adelante es la posible desviación en la medición de temperatura dentro del horno donde se exponen los cartuchos.

Para minimizar la incertidumbre y mejorar la fiabilidad del estudio, se implementarán estrategias como el uso de equipos calibrados, la repetición de pruebas para obtener una base de datos más robusta y el uso de análisis estadísticos avanzados como la propagación de errores y el cálculo de intervalos de confianza.

Esta gestión de la incertidumbre también tiene una relación directa con el muestreo, ya que una selección inadecuada de los cartuchos de prueba podría introducir sesgos que comprometan la validez del estudio. Por ello, el siguiente apartado aborda la estrategia de muestreo adoptada en este análisis experimental.

3.3.2 El muestreo

Una vez establecidas las herramientas estadísticas y los parámetros de incertidumbre, es necesario definir una estrategia de muestreo que garantice la representatividad y validez de los resultados. En el caso de la munición 9×19 milímetros Parabellum, se han aplicado diferentes técnicas de muestreo con el fin de captar adecuadamente la variabilidad de los factores ambientales y minimizar los posibles sesgos experimentales.

El muestreo es un proceso fundamental en el diseño de experimentos, ya que permite seleccionar una parte representativa de la población de estudio para obtener conclusiones aplicables al conjunto total. En el caso del análisis de la munición de 9×19 milímetros Parabellum, el muestreo debe garantizar que los cartuchos elegidos reflejen con precisión las condiciones de fabricación y las variaciones ambientales a las que estarán sometidos.

Existen diferentes estrategias de muestreo que pueden aplicarse en este estudio. Una de las más sencillas es el muestreo aleatorio simple, en el que cada cartucho tiene la misma probabilidad de ser seleccionado. Esta técnica es útil cuando la munición proviene de un mismo lote de fabricación, garantizando que las pruebas sean equitativas y no estén influenciadas por diferencias en el proceso de producción [\[37\]](#).

En casos donde se desea analizar el efecto de distintas condiciones ambientales, resulta más adecuado el muestreo estratificado. Este método consiste en dividir la población en diferentes categorías o estratos, en nuestro caso podrían ser cartuchos almacenados en ambientes secos frente a aquellos expuestos a humedad o salinidad. De cada grupo se selecciona una cantidad representativa de cartuchos, lo que permite evaluar si existen diferencias significativas en su desempeño.

Otra alternativa es el muestreo sistemático, que consiste en seleccionar cartuchos a intervalos regulares dentro del lote. Este método es útil cuando se necesita una muestra homogénea distribuida de manera uniforme.

Finalmente, el muestreo por conglomerados es útil cuando los cartuchos han sido almacenados o transportados en grupos distintos. En lugar de seleccionar unidades individuales, se eligen grupos completos y se analizan como conjunto, permitiendo estudiar cómo influyen las condiciones de almacenamiento en la calidad de la munición.

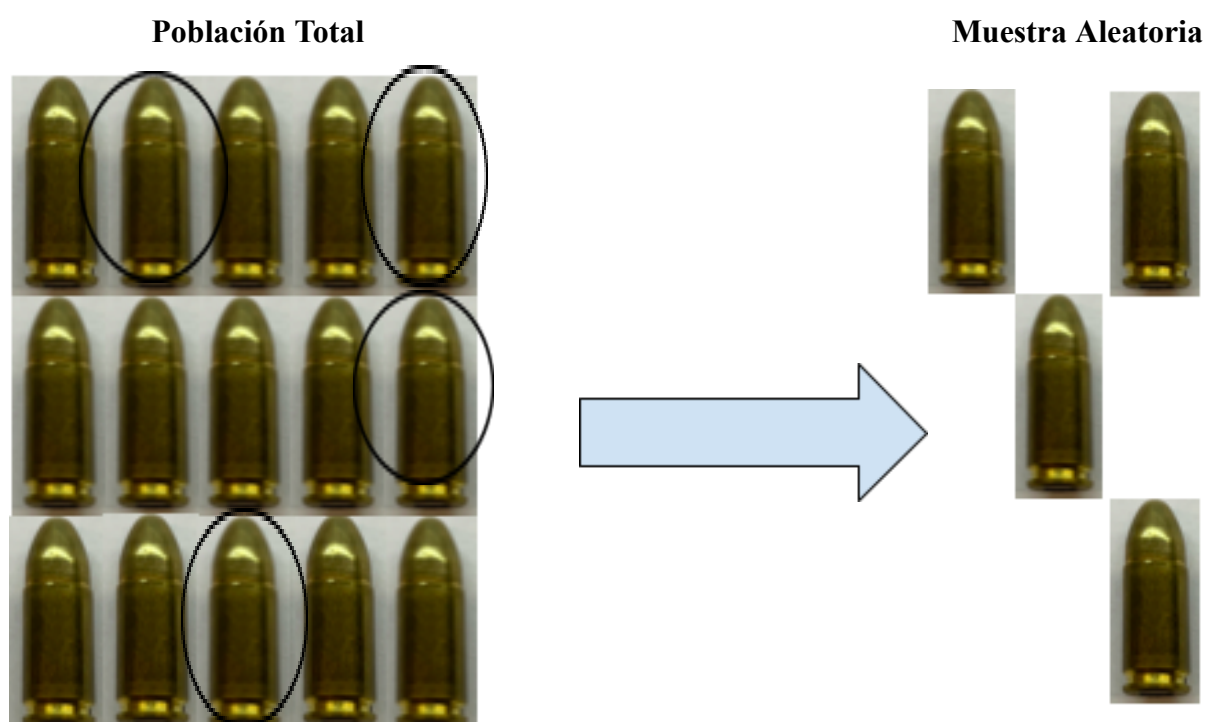


Figura 3-6 Ejemplo de la toma de una muestra aleatoria para la realización de un ensayo (fuente propia)

Determinar el tamaño de la muestra es un paso fundamental en cualquier estudio experimental, ya que afecta directamente a la precisión y confiabilidad de los resultados. En este análisis, el número de cartuchos seleccionados debe ser suficiente para captar la variabilidad en las mediciones y minimizar el margen de error.

El tamaño de la muestra se calcula en función de tres factores principales: la variabilidad esperada en los datos, el nivel de confianza deseado y la precisión requerida. Para estimarlo, se utiliza la fórmula estadística:

$$n = \left(\frac{Z \cdot \sigma}{E} \right)^2$$

Donde:

- "n" es el número de muestras necesarias.
- "Z" es el valor crítico de la distribución normal, que depende del nivel de confianza elegido (por ejemplo, 1.96 para un 95% de confianza).
- "σ" representa la desviación estándar de los datos.
- "E" es el margen de error permitido.

Para garantizar la robustez estadística de los resultados, cada experimento se repetirá varias veces y se analizará la variabilidad en los datos obtenidos. Un tamaño de muestra adecuado permitirá obtener conclusiones más precisas sobre cómo los factores ambientales afectan la munición de 9 × 19 milímetros Parabellum y contribuirá a mejorar las recomendaciones sobre su almacenamiento y uso en condiciones operativas reales.

3.4 Análisis de componentes y decisión

Al diseñar este estudio, nos encontramos con un desafío fundamental: los cartuchos a experimentar están compuestos por múltiples elementos, y cada uno de ellos podría verse afectado de manera diferente por las condiciones ambientales. En particular, la degradación de un cartucho podría atribuirse tanto a la afectación del estopín como al posible efecto creado en la pólvora que se encuentra en el interior del cartucho. Sin embargo, para mantener el enfoque del experimento, se necesitaba asegurar que la pólvora en su interior permaneciera intacta y no influenciada por los factores ambientales evaluados. Para ello, se diseñó una prueba específica que nos permitiera demostrar la estanqueidad de la pólvora en su interior y, de esta forma, descartar su influencia en los resultados generales del estudio.

Para llevar a cabo esta evaluación, se seleccionó un conjunto de cartuchos representativos de los empleados en el experimento principal y se sometieron a un ensayo de inmersión en agua durante un período prolongado de 10 días. La elección de este tiempo de exposición no fue arbitraria; se estableció con el propósito de representar una condición extrema de almacenamiento o exposición a ambientes húmedos, mucho más severa de lo que un cartucho podría experimentar en escenarios operativos reales. De este modo, si la pólvora lograba mantenerse seca en estas circunstancias, se podría suponer que la humedad ambiental y la salinidad no tendrían un impacto significativo en su integridad durante las pruebas experimentales, aún así una vez realizados los tests de vida acelerados se comprobará a través de la velocidad de salida de los proyectiles si la pólvora en el interior de dichos cartuchos ha sufrido deterioro presentando una velocidad menor a la presentada por el grupo de control.

Para asegurar la rigurosidad del procedimiento, los cartuchos fueron completamente sumergidos en un recipiente lleno de agua dulce, a una temperatura media de 24 grados celsius además de evitar cualquier contacto con aire por parte de los cartuchos que pudiera influir en la evaporación o absorción de la humedad. Durante los 10 días de inmersión, se mantuvieron bajo observación periódica para verificar la ausencia de burbujas de aire o signos de deterioro visible en la estructura de la vaina o el estopín.

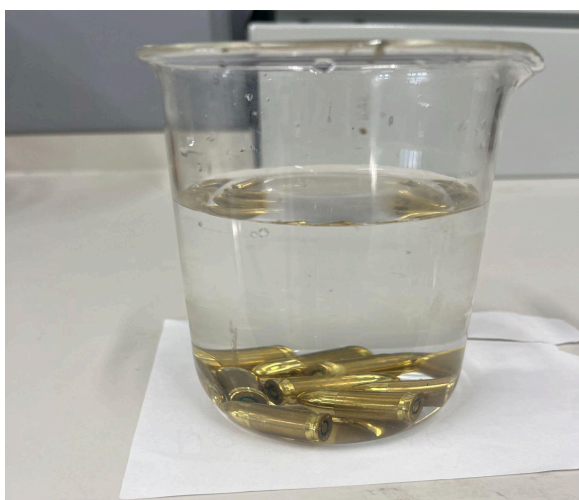


Figura 3-7 Cartuchos sumergidos (fuente propia)

Finalizado el período de inmersión, se extrajeron los cartuchos del agua y se procedió a su inspección. En primer lugar, se realizó un análisis visual para detectar posibles signos de corrosión, deformaciones o cualquier indicio de deterioro en la estructura de la vaina. Posteriormente, se seleccionaron varios cartuchos y se procedió a la extracción de la pólvora de su interior. Para ello, se

utilizaron herramientas especializadas que garantizaron la integridad de las muestras durante el proceso.

Para llevar a cabo esta apertura de forma controlada y sin comprometer la integridad del proyectil ni alterar las características físicas de la pólvora, se empleó un martillo de inercia, herramienta especialmente diseñada para el desmontaje seguro de munición. Este dispositivo funciona mediante el principio de conservación del momento lineal: se introduce el cartucho en una cámara roscada que sujeta firmemente la base de la vaina, y tras aplicar una serie de impactos controlados contra una superficie rígida, el proyectil es expulsado por efecto de la inercia, separándose del resto del cartucho sin emplear fuerza directa sobre sus componentes. Este procedimiento permitió conservar tanto la forma del proyectil como la carga propulsora intactas, facilitando su inspección posterior y la comparación con cartuchos no tratados. A diferencia de otros métodos mecánicos más invasivos, el uso del martillo de inercia asegura que no se generen deformaciones estructurales ni contaminaciones físicas en los elementos desmontados, lo cual es especialmente relevante cuando se requiere preservar las condiciones originales para un análisis físico-químico posterior.



Figura 3-8 Martillo de Inercia y cartuchos desmontados (fuente propia)

Durante el proceso, se aplicaron medidas de seguridad específicas, como el uso de protecciones visuales y auditivas, además de la manipulación individualizada de cada cartucho. El trabajo se realizó en un entorno controlado y con ventilación, minimizando cualquier riesgo asociado a la ignición accidental del fulminante o de la pólvora, por improbable que fuera. Esta metodología permitió realizar un desmontaje fiable y repetible, condición indispensable en experimentos con componentes sensibles y sistemas de un solo uso.

Una vez desmontado cada cartucho, se procedió a la clasificación de sus componentes, separando proyectil, vaina, pólvora y fulminante. Durante esta fase, se prestó especial atención a la base del proyectil, zona donde suelen acumularse restos de sales y donde pueden iniciarse procesos de

corrosión por capilaridad. También se inspeccionó la zona del cuello de la vaina, evaluando posibles deformaciones por presión interna o pérdidas de estanqueidad. En el caso del fulminante, se observó su integridad física, la presencia de residuos externos y posibles desplazamientos o pérdidas de fijación.

La pólvora extraída fue depositada cuidadosamente en recipientes secos, para evitar la absorción de humedad durante la manipulación. A continuación, se realizó una evaluación táctil y visual directa para detectar cualquier indicio de degradación. Se examinó su coloración, textura superficial, homogeneidad del grano y presencia de grumos o zonas apelmazadas. En todas las muestras analizadas, se comprobó que la pólvora mantenía una estructura granulada uniforme, sin signos de apelmazamiento ni alteraciones evidentes en su aspecto físico, cabe resaltar que si se contara con un higrómetro, se podría medir dicha humedad de la pólvora directamente. Para complementar esta inspección, se seleccionaron pequeñas cantidades de muestra y se realizaron pruebas de ignición controladas en un entorno seguro, utilizando una base cerámica ignífuga y un sistema de encendido a distancia. La combustión se produjo de forma inmediata, con llama limpia, sin residuos anómalos ni retardo de encendido, lo que confirmó la ausencia de humedad y la conservación de las propiedades energéticas del propelente. Este procedimiento de validación cruzada entre inspección visual, sensorial y prueba funcional permitió descartar cualquier influencia significativa del medio externo, en este caso el agua, sobre la pólvora contenida en los cartuchos.



Figura 3-9 Cartuchos desmontados y pólvora seca (fuente propia)

Los resultados obtenidos confirmaron de manera concluyente que la pólvora contenida en los cartuchos no había absorbido humedad durante los 10 días de inmersión. Todas las muestras estaban completamente secas y no presentaban signos de alteración. Este resultado permitió descartar cualquier interferencia de la humedad en la pólvora a lo largo de las pruebas experimentales. Con esta verificación, se pudo establecer con certeza que los factores ambientales evaluados en el estudio, temperatura, salinidad y pH, afectarían exclusivamente a la estructura de la vaina y al estopín, sin alterar la calidad de la pólvora en el interior del cartucho.

El efecto combinado que pueden ofrecer la temperatura y el agua, especialmente a temperaturas cambiantes, se verá reflejado en la experimentación multifactorial y permitirá confirmar o rechazar la hipótesis planteada. En consecuencia, la prueba de estanqueidad demostró que los cartuchos empleados en el estudio poseen un sellado hermético efectivo, lo que les permite resistir la exposición prolongada a ambientes húmedos, siempre que se mantengan a temperatura ambiente, sin comprometer

su funcionalidad. Esta conclusión refuerza la validez de los experimentos llevados a cabo en el proyecto, asegurando que cualquier degradación observada en los cartuchos expuestos a los factores ambientales analizados sea atribuible exclusivamente a dichos factores, y no a la penetración de humedad en la pólvora.

3.5 Límite superior

Uno de los objetivos clave del estudio fue determinar el umbral de temperatura a la que los cartuchos del calibre seleccionado alcanzan su punto de detonación espontánea cuando son sometidos a un incremento progresivo de temperatura en un entorno controlado. Si bien las advertencias de los fabricantes señalizadas en las cajas de munición indican que los cartuchos pueden volverse peligrosos a partir de los 60 °C, nuestra hipótesis era que el margen de seguridad real era significativamente mayor. Para demostrarlo, diseñamos un experimento en el que expusimos cartuchos a temperaturas elevadas dentro de una mufla, permitiéndonos registrar la temperatura exacta a la que ocurren las detonaciones. Pero para ello era necesario tomar ciertas medidas de seguridad para asegurar la integridad de los equipos y nuestra propia.

3.5.1 Diseño del Sarcófago de Seguridad

Dado que el experimento involucra la detonación potencial de municiones en condiciones de calor extremo, la seguridad fue considerada desde el inicio como la prioridad principal en el diseño experimental. Someter cartuchos de 9 × 19 milímetros a temperaturas elevadas en el interior de una mufla implica una serie de riesgos, entre ellos la proyección violenta de fragmentos metálicos, la generación repentina de ondas de choque y la posible fuga de gases inflamables que podrían dañar el equipo o poner en peligro al personal cercano. Para mitigar estos riesgos, se diseñó un sarcófago blindado a medida, con la capacidad de resistir y contener cualquier explosión sin comprometer la integridad estructural del horno ni alterar las condiciones térmicas internas del ensayo. Esta solución permitió realizar los experimentos de manera repetida, controlada y bajo condiciones de seguridad adecuadas, sin comprometer los resultados ni la operatividad del sistema.

El sarcófago fue construido a partir de placas de acero de 1 centímetro de espesor, un material seleccionado por su elevada resistencia mecánica, buena conductividad térmica y capacidad de absorción de impactos. Las placas fueron unidas mediante soldadura perimetral continua, formando una estructura cúbica completamente cerrada, exceptuando la tapa, sin puntos débiles visibles. Este diseño proporciona una contención total de los cartuchos durante la exposición a altas temperaturas y garantiza que, en caso de detonación, la energía generada se disipe dentro del volumen cerrado del sarcófago. Además, se tuvo en cuenta que el acero conservará su integridad estructural en el rango de temperatura operativa de la mufla, lo que hizo que su comportamiento ante la fatiga térmica fuera también un criterio de selección.



Figura 3-10 Autor del trabajo fin de grado soldando placas de acero para crear el sarcófago (fuente propia)



Figura 3-11 Sarcófago (fuente propia)

Además, para aumentar su resistencia a la corrosión y mejorar su durabilidad a largo plazo, la superficie del sarcófago fue recubierta con una capa de zinc en spray, actuando como barrera protectora frente a la oxidación derivada de la exposición prolongada a altas temperaturas y ambientes húmedos. Este recubrimiento se aplicó de forma uniforme tras finalizar el soldado de la estructura, permitiendo cubrir tanto las superficies planas como las zonas de unión y los cordones de soldadura. Previamente, todas las caras del sarcófago fueron pulidas manualmente, eliminando rebabas, irregularidades y restos de escoria metálica generados durante el proceso de corte y soldadura. Este tratamiento superficial no solo mejora su estética y manejabilidad, sino que también reduce el riesgo de microfisuras por acumulación de tensión en puntos críticos. Como resultado, se obtuvo una

superficie metálica más estable, resistente a la abrasión y con mayor vida útil operativa, apta para ensayos repetitivos sin pérdida de integridad estructural.



Figura 3-12 Sarcófago terminado con capa de Zinc (fuente propia)

La tapa del sarcófago no se encuentra unida de forma fija a la estructura principal, lo que permite su apertura y cierre para introducir o retirar los cartuchos entre ensayos. Sin embargo, esta característica requiere un sistema adicional de sujeción que asegure la hermeticidad y contención durante la exposición térmica. Para ello, se utilizaron bridas metálicas de acero inoxidable de 30 centímetros de longitud, que rodean y fijan firmemente la tapa al cuerpo del sarcófago. Estas bridas fueron seleccionadas por su resistencia mecánica y estabilidad térmica, incluso a altas temperaturas, garantizando que la tapa no se desplace ante una posible detonación interna. Su uso proporciona un cierre fiable, reforzando la seguridad del sistema sin comprometer su operatividad. Además para reforzar aún más la seguridad del experimento, el sarcófago fue introducido en una segunda caja de acero diseñada para contener cualquier escape de gases dentro del horno. Esta doble protección aseguraba que las explosiones no afectasen la estructura interna de la mufla y evitaba la acumulación de gases combustibles en su interior, reduciendo el riesgo de explosiones secundarias.



Figura 3-13 Sarcófago con bridas metálicas y base de la caja de seguridad (fuente propia)

3.5.2 Procedimiento experimental

Una vez implementadas todas las medidas de seguridad, se procedió a la ejecución del experimento. Se preparó una serie de cartuchos, incluyendo munición parabellum con el componente Full Metal Jacket y cartuchos sin esta protección. Los cartuchos fueron introducidos individualmente en el sarcófago blindado y este, a su vez, se colocó dentro de la mufla.



Figura 3-14 Mufla Nabertherm (fuente propia)

Destacar que para utilizar la mufla, se deberá establecer la temperatura que queremos alcanzar además de el tiempo en el que queremos que la alcance, aunque el dispositivo asegura que dicha temperatura se alcanzará de manera lineal, posteriormente se demostrará que no es así totalmente, siendo las temperaturas inferiores alcanzadas a mayor velocidad que las temperaturas más elevadas. Por último se deberá de establecer el tiempo que se quiere mantener dicha temperatura en el interior de la mufla, en nuestro caso estos tiempos fueron desde las 3 horas hasta las 24 horas en las pruebas más extendidas en el tiempo.

El proceso de calentamiento se realizó de manera gradual, incrementando la temperatura progresivamente a la máxima velocidad que ofrece la mufla para identificar el punto en el que cada cartucho alcanza su temperatura crítica de detonación. Se registró la temperatura dentro de la mufla en todo momento, permitiendo establecer los valores de temperatura a los que ocurrían las explosiones.

La experimentación incluyó un seguimiento del incremento de temperatura dentro de la mufla, con mediciones registradas cada 30 segundos. Los datos obtenidos muestran que el aumento de temperatura no fue completamente lineal, sino que siguió una tendencia de aceleración progresiva hasta estabilizarse en valores superiores a los 600 °C.

Inicialmente, en el minuto 0:00, la temperatura dentro de la mufla era de 98 °C. A medida que avanzaba el calentamiento, se observó un incremento progresivo: a los 5 minutos, la temperatura había alcanzado 406 °C, mientras que a los 10 minutos se situaba en 528 °C. El incremento continuó hasta que, en el minuto 18.5, la temperatura alcanzó los 602 °C, momento en el que ocurrió la cuarta detonación, registrándose una temperatura final de 606 °C en el minuto 19.

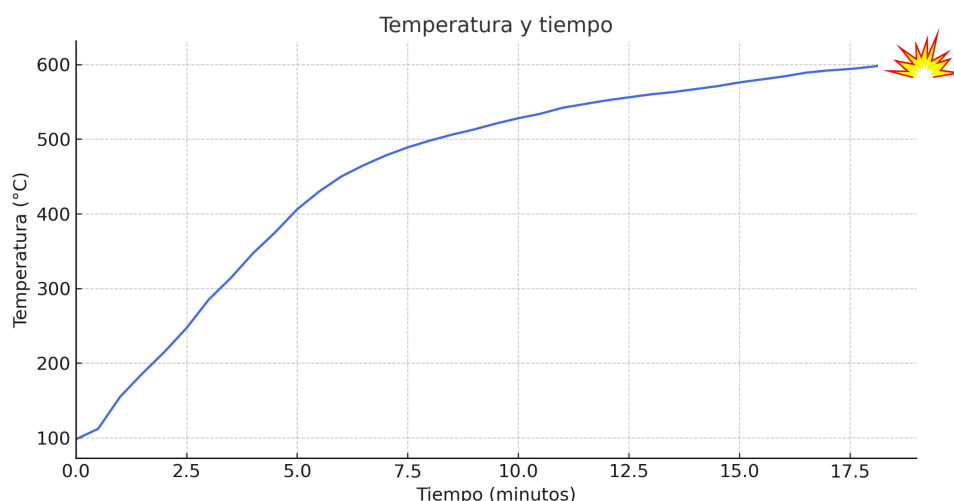


Tabla 1 Incremento de la temperatura con respecto al tiempo dentro de la mufla (fuente propia)

En todo momento durante la experimentación, se garantizó el cumplimiento de las medidas de seguridad establecidas, utilizando los equipos de protección individual, EPI, requeridos para cada fase del proceso. Se llevaban gafas de seguridad y protección auditiva para prevenir riesgos físicos y acústicos, mientras que, para la manipulación del sarcófago y la extracción de este de la mufla, se emplearon guantes térmicos resistentes a altas temperaturas. Adicionalmente, se siguieron protocolos para desempeñar un trabajo seguro, a través de una supervisión constante y la delimitación del área de operaciones para minimizar cualquier riesgo asociado a la manipulación de los cartuchos en la mufla.

3.6 Grupo de control

Como parte fundamental de este estudio, se llevaron a cabo pruebas de disparo con un grupo de cartuchos que no fueron sometidos a ningún tipo de tratamiento ambiental. Estas pruebas tuvieron como finalidad obtener una referencia base que permitiera comparar el desempeño de la munición en condiciones óptimas con los resultados obtenidos en los experimentos donde los cartuchos fueron expuestos a factores ambientales adversos.



Figura 3-15 Pruebas de fuego Grupo de Control (fuente propia)

Las pruebas del grupo de control se realizaron en el campo de tiro de la Escuela Naval Militar, donde se dispararon un total de 40 cartuchos, midiendo la velocidad de salida de cada proyectil en metros por segundo (m/s). Para garantizar la precisión de las mediciones, se utilizó un cronógrafo Caldwell Ballistic que proporciona una alta precisión, instrumento que permite registrar con exactitud la velocidad de los proyectiles en el momento en que atraviesan su sensor.



Figura 3-16 Cronógrafo Caldwell Ballistic empleado (fuente propia)

3.6.1 Condiciones de la Prueba

En cualquier experimento en el que se busque evaluar el desempeño balístico de una munición, es fundamental minimizar las posibles fuentes de error que puedan afectar la medición de los parámetros clave, en este caso, la velocidad de salida del proyectil.

Para lograr esto, se tomó la decisión de realizar los disparos utilizando un revólver, en lugar de una pistola semiautomática con corredera. Esta elección se basó en la necesidad de reducir al máximo las variaciones mecánicas que podrían afectar la velocidad de salida de los proyectiles y, por lo tanto, introducir ruido en los datos obtenidos.

En las pistolas semiautomáticas, el sistema de corredera y el mecanismo de retroceso pueden influir en la presión interna generada dentro de la recámara durante el disparo. La interacción entre la corredera y el muelle recuperador puede producir ligeras variaciones en el momento en que la bala es impulsada por los gases generados por la combustión de la pólvora, lo que puede generar diferencias en la velocidad de salida.

Además, en las pistolas semiautomáticas, la aguja percutora puede impactar el fulminante con diferentes intensidades dependiendo de múltiples factores mecánicos, lo que podría afectar la ignición de la pólvora y, en consecuencia, la presión generada dentro de la vaina. Estas pequeñas variaciones

pueden traducirse en una dispersión adicional de los valores de velocidad, dificultando la obtención de datos precisos.

El uso de un revólver elimina estos factores, ya que en este tipo de arma la munición permanece fija en el tambor y no experimenta ciclos de alimentación. Esto permite que la ignición de la pólvora y la generación de presión en la recámara ocurran de manera más uniforme en cada disparo, garantizando mediciones más precisas y reduciendo las fuentes de error en el experimento.



Figura 3-17 Revólver utilizado durante las pruebas de fuego (fuente propia)

Finalizada la fase de diseño experimental, se procedió a organizar la distribución de los cartuchos según los distintos factores y niveles establecidos, quedando estructurado el plan de ensayo para su futura ejecución. Como parte inicial del trabajo práctico, se llevó a cabo el registro completo del grupo de control, compuesto por 50 cartuchos almacenados en condiciones ambientales estándar, sin ningún tipo de exposición a factores externos. Este grupo servirá como referencia comparativa frente a los resultados que se obtengan tras la aplicación de los distintos tratamientos ambientales en fases posteriores del proyecto. El diseño experimental establecido contempla tanto la exposición individual como combinada a temperatura, salinidad y pH, así como el análisis posterior mediante ensayo destructivo y modelización estadística. En el capítulo siguiente se detallan las conclusiones y resultados de las pruebas realizadas sobre el grupo de control e hipótesis desarrolladas a través de la experimentación con el techo de seguridad de temperatura.

3.7 Ensayo preliminar de envejecimiento térmico a 100 °C

Como fase exploratoria dentro de la planificación experimental del proyecto mencionado, se llevó a cabo un ensayo preliminar con el fin de estudiar el efecto del envejecimiento térmico prolongado sobre la funcionalidad balística de la munición.

Para ello, se seleccionó un subconjunto de 30 cartuchos pertenecientes al mismo lote del grupo de control, asegurando así la homogeneidad de referencia. Los cartuchos fueron sometidos a una temperatura constante de 100 °C durante 24 horas en la mufla del laboratorio, con el objetivo de simular situaciones operacionales como almacenamientos prolongados en entornos calurosos, estibas expuestas al sol o condiciones internas de vehículos militares en climas extremos como se ha mencionado.

Finalizada la fase de calentamiento, los cartuchos fueron enfriados a temperatura ambiente y posteriormente trasladados a la galería de tiro, donde se procedió a la ejecución de pruebas de fuego. La medición de la velocidad de salida se realizó utilizando el mismo cronógrafo digital, que permitió obtener registros individuales por cada disparo. Esta prueba, aunque de carácter preliminar, aporta datos de interés sobre la posible degradación de los componentes internos del cartucho, en particular el fulminante y la pólvora, bajo condiciones de estrés térmico subcrítico.

Con esta primera aproximación experimental se busca, además, verificar la viabilidad del protocolo operativo, detectar posibles limitaciones en los métodos de captura de datos, y ajustar parámetros de control de cara a las fases sucesivas del plan experimental global. Los resultados obtenidos fueron analizados estadísticamente y se comentan con mayor detalle en el capítulo de validación y resultados.

A modo de resumen del grueso del trabajo se adjunta la Tabla 2 la cual recoge de forma estructurada todos los experimentos planificados para este estudio. Se detallan los factores ambientales evaluados (temperatura, salinidad, pH y combinaciones), las condiciones específicas aplicadas, las franjas horarias de exposición y el número de cartuchos asignados a cada caso. A su vez en color blanco se marca los experimentos ya realizados durante este Trabajo de Fin de Grado.

Factor de estudio	Condición aplicada	Duración (h)	Nº cartuchos
Grupo de control	Condiciones estándar	NQR	50
Temperatura	100 °C	24	30
Temperatura	100, 150 y 200 °C	1	15 x condición de temperatura
Temperatura	100, 150 y 200 °C	3	15 x condición de temperatura
Temperatura	100, 150 y 200 °C	6	15 x condición de temperatura
Temperatura	(-) 14 °C	1, 3, 6	15 x franja horaria
Temperatura	Intervalo desde (-) 14 °C a 200 °C	1, 3, 6	15 x franja horaria
Temperatura	200 °C	12, 24	12 x franja horaria
Salinidad (inmersión)	3.5% NaCl	1, 6, 24	10 x franja horaria
Salinidad (inmersión)	10% NaCl	1, 6, 24	10 x franja horaria
Salinidad (inmersión)	35% NaCl	1, 6, 24	10 x franja horaria
Salinidad (niebla)	1% NaCl	1, 6, 24	10 x franja horaria
Salinidad (niebla)	5% NaCl	1, 6, 24	10 x franja horaria
Salinidad (niebla)	10% NaCl	1, 6, 24	10 x franja horaria
Salinidad (humedad salina)	60%, 80 % y 100% HR	24, 72, 168	20 x franja horaria
pH (inmersión ácida)	pH 2–3 (ácido)	1, 3, 24	15 x franja horaria
pH (inmersión básica)	pH 11–12 (básico)	1, 3, 24	15 x franja horaria
pH (vapores ácidos)	Vapores/HCl 1%	1, 3, 24	10 x franja horaria
pH (vapores ácidos)	Vapores/HCl 5%	1, 3, 24	10 x franja horaria
pH (vapores ácidos)	Vapores acético/ 15 %	1, 3, 24	10 x franja horaria
pH (atmósfera húmeda ácida)	pH ácido en humedad	1, 3, 24	20 x franja horaria
Combinado: Costa tropical	Temp. 60–70 °C + Sal 5% + pH 5	24, 48, 72	23 x franja horaria
Combinado: Zona industrial	Temp. 100 °C + Sal 2.5% + pH 4	24, 48, 72	23 x franja horaria
Combinado: Clima extremo	Ciclo -14 °C a 80 °C + 5% sal + 90%	24, 72, 168	20 x franja horaria

Tabla 2 Resumen Diseño de las pruebas que se llevarán a cabo en el proyecto.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados y Observaciones

Los resultados obtenidos confirmaron que la temperatura de detonación de los cartuchos era considerablemente más alta que los 60 °C advertidos en las cajas de munición, lo que demuestra que existe un amplio margen de seguridad en su almacenamiento y manipulación en condiciones normales.

El primer cartucho sin proyectil Full Metal Jacket alcanzó su punto de detonación a una temperatura de 661 °C, lo que estableció una referencia inicial para las siguientes pruebas. Este resultado nos permitió contar con un valor base sobre el cual comparar el comportamiento de otros cartuchos bajo las mismas condiciones experimentales.

A medida que el experimento avanzó, observamos que la temperatura de detonación de los cartuchos Parabellum presentaba ligeras variaciones en relación con los valores previamente registrados. La tercera detonación se produjo a 637 °C, mientras que la cuarta detonación ocurrió a 606 °C. Estas diferencias en los valores de temperatura pueden atribuirse a una serie de factores que influyen en la respuesta térmica de los cartuchos cuando son expuestos a un calor extremo.

Posteriormente, al evaluar un cartucho del tipo Parabellum, este fue sometido a un calentamiento progresivo dentro de la mufla hasta que finalmente detonó a 650 °C. Sin embargo, es importante destacar que este cartucho había sido, previo a su detonación, sometido a un período de enfriamiento de tres minutos dentro del horno, esto nos hizo ver que los cartuchos no solo detonaban al llegar a cierta temperatura, sino que a su vez al estar sometidos a altas temperaturas un largo periodo de tiempo este hacía que la detonación a su vez se produjese por lo que pasamos a darle un segundo enfoque a esta parte de la experimentación tratando de encontrar lo que pudo haber influido en su comportamiento térmico y en el momento exacto de su detonación.

Lo que a priori se extraía de la información ofrecida por los datos proporcionados en la experimentación sobre el comportamiento térmico dentro del sarcófago eran las posibles diferencias en la composición y fabricación de los cartuchos, ya que pequeñas variaciones en los materiales utilizados en las vainas, fulminantes y pólvora podrían haber influido en la temperatura exacta a la que se produjo la ignición.

Otro factor relevante es la distribución del calor dentro del sarcófago blindado, ya que el acero del contenedor podría haber actuado como un amortiguador térmico, absorbiendo y distribuyendo el

calor a diferentes ritmos. Esto podría haber generado pequeñas variaciones en la forma en que cada cartucho se calentó, provocando que algunos alcanzase su punto crítico de detonación a temperaturas ligeramente más bajas que otros. Además, se podría considerar el efecto de la presión interna generada dentro de la vaina durante el proceso de calentamiento. Conforme la temperatura aumentaba, la pólvora y el gas contenido dentro de los cartuchos se expandían, aumentando la presión interna de la vaina. Dado que la velocidad de calentamiento no fue completamente uniforme, se podría dictar que algunos cartuchos hubiesen acumulado presión de manera más acelerada, lo que explicaría por qué la última detonación ocurrió a 606 °C, una temperatura más baja que la primera registrada en 661 °C.

Una de las primeras conclusiones fue que a pesar de estas variaciones en los valores de temperatura registrados, lo que había quedado demostrado con total claridad era que los cartuchos de 9 × 19 milímetros parabellum poseían un margen de seguridad extremadamente alto en lo que respecta a su estabilidad térmica. Incluso en las peores condiciones de almacenamiento y exposición al calor que podrían darse en entornos operativos, es altamente improbable que un cartucho alcance temperaturas cercanas a los 600 °C, lo que confirmaba que su diseño permitía soportar niveles de temperatura mucho mayores a los indicados en las advertencias de fábrica. Pero se procedió a realizar una segunda experimentación a través de registrar detonaciones a temperaturas más bajas pero manteniendo dichas temperaturas en el tiempo.

4.2 Segundo Enfoque

Con el objetivo de explorar este nuevo enfoque en la investigación, se decidió modificar las condiciones experimentales y evaluar la influencia de temperaturas inferiores a 600°C en el tiempo de detonación de los cartuchos. Se sospechaba que al mantener temperaturas más bajas durante un período prolongado, se podrían registrar detonaciones. Para ello, se realizaron pruebas en las que se registraron los tiempos y temperaturas correspondientes a cada detonación.

Durante la experimentación, se lograron identificar cinco detonaciones que ocurrieron en distintos momentos y diferentes temperaturas, lo que permitió analizar la relación entre el tiempo de exposición térmica y la respuesta de los cartuchos. A medida que avanzaba la prueba, se registraron datos de temperatura y tiempo para cada evento de detonación, con el objetivo de establecer un patrón en su comportamiento.

La primera detonación tuvo lugar a los 18 minutos y 26 segundos, la mufla tardó en alcanzar una temperatura de 550 °C 16 minutos y 30 segundos. Al mantener dicha temperatura, a los 2 minutos y cuatro segundos se produjo la detonación. Este suceso inicial permitió confirmar que, bajo estas condiciones térmicas, los cartuchos pueden detonar en un tiempo relativamente corto. Posteriormente, se fijó la temperatura de 400 °C con un nuevo cartucho, dicha temperatura se alcanzó a los 6 minutos y la segunda detonación se registró a los 22 minutos y 30 segundos, evidenciando que, con una variación en la temperatura y el tiempo de exposición, los cartuchos seguían mostrando una respuesta inestable frente a temperaturas elevadas durante largos tiempos de exposición.

A diferencia de los dos primeros eventos, la tercera detonación, fijada en 350 °C y alcanzada en 4 minutos por la mufla, se presentó significativamente más tarde, ocurriendo a los 34 minutos y 30 segundos. Este resultado sugiere que algunos cartuchos pueden requerir un período más prolongado de exposición al calor antes de alcanzar su umbral crítico de ignición, lo que indica que la temperatura por sí sola no es el único factor determinante, sino que también influye la duración de la exposición térmica y posiblemente la composición del cartucho o su nivel de confinamiento.

Conforme avanzó la experimentación, se registraron dos detonaciones adicionales. La cuarta tuvo lugar a los 42 minutos y 14 segundos, habiéndose fijado la temperatura en 300 °C mientras que la quinta y última se produjo a los 62 minutos y 30 segundos a una temperatura de 250 °C. En estos

casos, las temperaturas oscilaron en un rango que iba desde los 250°C hasta los 550°C, lo que demuestra que, aunque la temperatura pueda ser un factor clave, la acumulación de calor a lo largo del tiempo también juega un papel fundamental en la ocurrencia de la detonación.

Los resultados obtenidos en la experimentación sugieren que la ignición de los cartuchos no depende exclusivamente de alcanzar un valor fijo de temperatura, sino que está influenciada por una combinación de factores, entre los que destacan la temperatura y el tiempo de exposición al calor. A lo largo de las pruebas, se pudo observar que algunos cartuchos alcanzaron su punto de detonación de manera relativamente rápida al exponerse a temperaturas más elevadas, mientras que otros requirieron tiempos de calentamiento más prolongados, incluso cuando la temperatura se mantenía en valores inferiores.

Este comportamiento indica que el fenómeno de la ignición y posterior detonación no responde a un único umbral térmico absoluto, sino que se trata de un proceso dinámico en el que la cantidad total de calor absorbido por el cartucho a lo largo del tiempo juega un papel determinante. Es decir, no solo es importante la temperatura máxima alcanzada, sino también el tiempo durante el cual el material ha estado sometido a temperaturas elevadas, permitiendo una acumulación progresiva de energía térmica dentro de la estructura del cartucho. Asimismo, estos resultados evidencian la existencia de variables adicionales que podrían influir en la ocurrencia de las detonaciones, tales como la composición de la pólvora utilizada, el grado de confinamiento del cartucho, la presencia de posibles impurezas en los materiales y la distribución del calor dentro de la estructura del mismo. En algunos casos, la detonación ocurrió en tiempos relativamente cortos tras alcanzar temperaturas cercanas a los 550°C, mientras que en otros, incluso con temperaturas en el rango de los 250°C a 400°C, los cartuchos terminaron por detonar tras un periodo de exposición más prolongado.



Figura 4-1 Estado de los cartuchos tras detonar (fuente propia)

A su vez, en la última detonación se observó tras un análisis visual que el cartucho presentaba un estado diferente al encontrado en el resto de detonaciones.

Específicamente, el cartucho ubicado a la izquierda en la disposición experimental mostró signos claros de haber experimentado la explosión del fulminante y posterior ignición de la pólvora contenida en su interior, haciendo que su aspecto sea similar al observado tras un disparo con arma de fuego. Este fenómeno sugiere que el estopín alcanzó la temperatura suficiente para iniciar su proceso de combustión progresiva, liberando gases y energía térmica. Por otro lado, el resto de los cartuchos presentes en la prueba sí experimentaron la detonación completa, incluyendo la activación del estopín.

Esto indica que en estos casos, tanto la pólvora como el componente iniciador alcanza las condiciones críticas de temperatura y presión requeridas para desencadenar una explosión completa.

El comportamiento diferenciado observado en el cartucho de la izquierda puede explicarse por la diferencia en los umbrales de temperatura requeridos para la deflagración de la pólvora y la detonación del estopín. La pólvora, al estar compuesta por materiales que favorecen una combustión progresiva a temperaturas relativamente bajas, puede comenzar a quemarse en un rango de aproximadamente 180°C a 400°C, generando una explosión violenta al encontrarse confinada además de alcanzar una presión suficiente. En cambio, el estopín requiere temperaturas más bajas y en los casos de funcionamiento regular, una onda de choque o una presión intensa para iniciar su reacción explosiva.

La detonación del estopín en este cartucho específico podría estar relacionada con varios factores, como una distribución desigual del calor dentro del cartucho, una posible disipación térmica que permitió alcanzar la temperatura crítica en la zona del estopín, o incluso una variabilidad en la composición y sensibilidad del propio material iniciador.

Este hallazgo es significativo, ya que sugiere que, en condiciones de exposición térmica prolongada, es posible que algunos cartuchos experimenten la iniciación del estopín además de la deflagración de la pólvora sin llegar a detonar la vaina completamente. Este comportamiento es relevante en el estudio ya que permite comprender mejor los factores que influyen en la transición de una simple deflagración a una detonación completa.

Esto resalta la complejidad del proceso de deflagración y detonación bajo las condiciones experimentales establecidas, sugiriendo que la estabilidad térmica de los cartuchos está sujeta a múltiples factores interdependientes. La capacidad de un cartucho para resistir la ignición durante períodos más extensos antes de detonar a temperaturas más altas podría estar relacionada con la eficiencia en la disipación del calor, la variabilidad en la sensibilidad del compuesto explosivo y las condiciones particulares de cada prueba. Estos hallazgos brindan una comprensión más profunda sobre el comportamiento térmico de los cartuchos y su respuesta a ambientes de alta temperatura, proporcionando información clave para futuras investigaciones sobre su estabilidad y seguridad en diferentes escenarios operativos.

Finalmente, se llevó a cabo una última prueba en la que se sometió un cartucho a una temperatura constante de 200°C durante un período superior a dos horas. A pesar del tiempo extendido bajo estas condiciones, no se registró ninguna detonación ni signos de ignición, lo que permitió establecer que, por debajo de este umbral de temperatura, los cartuchos no presentan riesgo de detonación incluso cuando la exposición térmica es prolongada.

Este resultado llevó a fijar un techo de temperatura en 200°C, es decir, el valor máximo en el que los cartuchos pueden permanecer sin experimentar una reacción explosiva, independientemente de la duración de la exposición. Este hallazgo es relevante, ya que proporciona un criterio adicional para la evaluación de la seguridad térmica de los cartuchos en distintos entornos y permite definir límites operativos más precisos en su almacenamiento y manipulación, a su vez es un aspecto clave a la hora del diseño de experimentos en la realización de test de vida acelerados para estos cartuchos.

4.3 Relación entre la Temperatura, la masa de pólvora y energía de deflagración

La pólvora sin humo utilizada en municiones militares está compuesta principalmente por nitrocelulosa y, en algunos casos, nitroglicerina. Su temperatura de ignición está comprendida entre 170 y 200°C, lo que indica que a 250°C su estabilidad química se ve comprometida. Bajo condiciones normales de disparo, la temperatura de combustión alcanza valores entre 2500 y 2700°C, generando

una presión y una velocidad de salida del proyectil controladas por el diseño del arma y la munición. Sin embargo, en este experimento, la expansión de gases y la disipación térmica redujeron la temperatura efectiva de combustión a un rango estimado de 1200°C a 1700°C.

En un arma de fuego, la pólvora se quema en un volumen confinado dentro de la recámara y el cañón, lo que maximiza la presión y la temperatura al limitar la expansión de los gases. En cambio, en este experimento, aunque el cartucho estaba sellado, el horno no replicaba el confinamiento hermético de una recámara. Esto permitió que los gases se expandieran dentro del horno, disipando calor y reduciendo la eficiencia de combustión.

Basándonos en la primera ley de la termodinámica:

$$\Delta U = Q - W$$

Donde ΔU es el cambio de energía interna, Q el calor transferido y W el trabajo realizado por el sistema. Al expandirse los gases se puede asumir $W > 0$, la energía interna y por tanto la temperatura a su vez disminuye. Esta afirmación se ve reforzada por estudios previos sobre la degradación térmica de la nitrocelulosa que han demostrado que, al superar los 200°C, la energía liberada durante la combustión disminuye debido a la descomposición parcial de la estructura molecular de la pólvora [38].

Por otro lado, para explicar el motivo de la explosión posterior a la deflagración, para los proyectiles estudiados de 8 gramos y una velocidad de 360 m/s necesitan una cantidad de pólvora fijada entre 0,35 a 0,5 gramos.

$$E_{\text{cinética}} = \frac{1}{2} \times 0,008 \times 360^2 = 518,4 \text{ J}$$

Relacionando dicha Energía cinética con la energía química de la pólvora empleada, de 4,500kJ/kg. Dicha energía viene definida como:

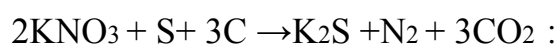
$$Q = \frac{E_{\text{cinética}}}{\eta \times m} = \frac{0,20 \times 4500000}{518,4} = 0,58 \text{ g}$$

Asumiendo un 20 % de eficiencia frente al 25% estimado en condiciones normales, este factor de necesitar una carga de pólvora mayor frente a una carga estándar de 0,45 g, explica cómo la energía útil fue insuficiente, generando una deflagración inestable que derivó en detonación.

Pasando a la presión generada en el interior del cartucho, a través de la ecuación de los gases ideales, para $m = 0,45 \text{ g}$, una temperatura de combustión estimada en 1500 °C, y un volumen de 0,8 cm³ además de calcular los moles;

Moles de gas generados: $n = \frac{0,45}{297} \times 6 = 0,0091$ (considerando 6 moles de gas por 297 g de nitrocelulosa).

Aplicando la expresión de los gases ideales obtenemos que:



$$P = \frac{n \times R \times T}{V} = \frac{0,0091 \times 8,134 \times 1800}{8 \times 10^{-7}} = 275 \text{ MPa}$$

Este valor supera el límite SAAMI, Sporting Arms and Ammunition Manufacturers Institute, fijado en 235 MPa, lo que sugiere que esta sobrepresión aumentó la temperatura y la velocidad de combustión, transformando la deflagración controlada en una onda de choque supersónica traducido en una detonación, observada en el estado final de la vaina. El confinamiento del cartucho y la degradación térmica de la pólvora agravaron el efecto, creando un sistema inestable donde la energía liberada no pudo disiparse, desencadenando una explosión violenta.

A su vez, un cálculo interesante, es la presión a través de la fórmula empírica de Saint Robert. Esta estima la presión máx (P_{max}) en un sistema cerrado basado en la masa de pólvora, el volumen (V_{vaina}) del cartucho y la temperatura de combustión, a través de la siguiente relación:

$$P_{max} = k \times \left(\frac{\text{masa pólvora}}{V_{vaina}} \right)^a \times \left(\frac{T_1}{T_{ideal}} \right);$$

$$P = 300 \times \left(\frac{0,45}{0,8} \right)^{1,1} \times \left(\frac{1800}{2800} \right) = 195 \text{ Mpa}$$

Siendo:

El valor 1800°C equivale a la temperatura estimada de la deflagración y 2800°C a la temperatura de referencia media de una deflagración en condiciones normales, a su vez a y k equivalen a constantes empíricas, en caso de la pólvora 1,1 y 300 $\frac{\text{MPa}}{(\text{g} \times \text{cm}^3)^a}$ respectivamente.

De este cálculo extraemos que la fórmula de Saint-Robert es un modelo empírico diseñado para condiciones normales de combustión, es decir, cuando la pólvora se quema de manera controlada en un arma de fuego. Sin embargo, en este experimento, la pólvora fue expuesta a 250°C durante un período prolongado, lo que alteró su estabilidad química y aumentó su reactividad. La presión real calculada con la ley de los gases ideales, 275 MPa, excede claramente el límite SAAMI de 235 MPa, mientras que la fórmula de Saint-Robert predijo 195 MPa, subestimando la presión real. Esto se debe a que el modelo no considera efectos térmicos prolongados ni la degradación química de la pólvora, lo que explica su falta de precisión en este caso, por lo que la fórmula de Saint Robert no es aplicable en condiciones extremas como las de este experimento.

Por último, apoyándonos en la ecuación de Vieille;

$$v_{comb} = a \times P^n;$$

v_{comb} = Velocidad de combustión de la pólvora en mm/s.

a = Coeficiente empírico que depende del tipo de pólvora, para la pólvora sin humo equivale a 1,5 medido en $\frac{\text{mm}}{\text{s} \times \text{MPa}^n}$

P = Presión dentro del cartucho en MPa.

n = Exponente de presión, que para pólvora sin humo suele estar entre 0,5 y 0,8 tomando $n=0,7$ como valor intermedio.

Donde en condiciones normales basada en la P fijada por SAAMI:

$$v_{comb} = 1,5 \times (235)^{0,7} = 62,58 \text{ mm/s.}$$

En nuestro caso, a través de la presión calculada anteriormente;

$$v_{comb} = 1,5 \times (275)^{0,7} = 72,32 \text{ mm/s.}$$

En condiciones normales de disparo, la pólvora se quema a una velocidad de aproximadamente 62,58 mm/s, pero en el experimento, donde la presión aumentó hasta 275 MPa, la velocidad de combustión se elevó a 72,32 mm/s, representando un incremento del 15,6%. Este aumento en la velocidad de combustión hizo que la pólvora se consumiera más rápidamente, lo que a su vez generó un incremento adicional de la presión interna, creando un ciclo de realimentación que favoreció la transición de deflagración a detonación. Como resultado, la combustión se tornó inestable y descontrolada, provocando una explosión violenta del cartucho dentro del horno, lo que confirma que el exceso de presión generó un fenómeno de combustión fuera de los parámetros normales de seguridad.

Por tanto es reseñable contemplar que los cartuchos están diseñados para soportar presiones dentro de un rango seguro, pero cuando se excede este umbral, pueden explotar en lugar de liberar los gases de manera controlada. En condiciones normales, la pólvora se quema progresivamente mediante deflagración, pero el confinamiento extremo y el aumento de presión pueden inducir una transición a detonación, donde la pólvora explota instantáneamente en lugar de arder de forma gradual. Esta liberación súbita e incontrolada de gases a altas presiones no solo puede comprometer la integridad estructural del arma, sino que, en un entorno como el horno, puede provocar una explosión inesperada del cartucho con consecuencias.

Todo lo mencionado se ve reforzado a través del siguiente gráfico donde se muestra los resultados de las detonaciones de los cartuchos bajo condiciones controladas, donde se registró la temperatura de la mufla a lo largo del tiempo y el punto en el que se producen detonaciones. Se puede observar que a medida que la temperatura aumentaba, los cartuchos con pólvora comenzaron a detonar en un rango de 300°C a 606°C, mientras que el fulminante, primero, presentó una detonación a 250°C tras un tiempo prolongado de exposición. La gráfica destaca una zona de experimentación válida, donde los fenómenos observados permiten estudiar la degradación térmica y el comportamiento de la pólvora bajo calor extremo. Además, se distingue una zona segura, en la que no se registraron detonaciones durante el experimento. Estos datos refuerzan la conclusión de que la exposición prolongada al calor genera una inestabilidad creciente en la pólvora, aumentando la probabilidad de transición de deflagración a detonación. En particular, se confirma que el calentamiento sostenido en un entorno confinado puede provocar sobrepresiones críticas que llevan a explosiones violentas, tal como lo predicen los modelos termodinámicos empleados en este mencionados.

La siguiente gráfica (Figura 4-2) resultados obtenidos durante la exposición de cartuchos de 9 × 19 milímetros Parabellum a temperaturas crecientes en mufla, bajo condiciones controladas en el laboratorio. En el eje vertical se muestra la temperatura interna de la mufla en grados Celsius, mientras que el eje horizontal indica el tiempo transcurrido en minutos desde el inicio del experimento. A lo largo de la curva, se indican los puntos de detonación espontánea tanto de la pólvora como del fulminante, acompañados de sus correspondientes rangos de temperatura y tiempo de activación. Las zonas marcadas como "SECURE AREA" y "VALID EXPERIMENTATION AREA" delimitan los márgenes operativos seguros y los intervalos útiles para el diseño de pruebas sin riesgo de detonación accidental. La primera zona abarca las temperaturas inferiores a 200 °C, donde no se observó activación tras dos horas de exposición. En la segunda zona, entre 200 y 450 °C, se realizaron los ensayos acelerados válidos sin comprometer la seguridad estructural del sistema. A partir de 450 °C, la frecuencia y rapidez de las detonaciones aumentó considerablemente, indicando umbrales críticos para

la estabilidad del cartucho. Estos resultados son esenciales para establecer protocolos térmicos fiables en pruebas de vida acelerada.

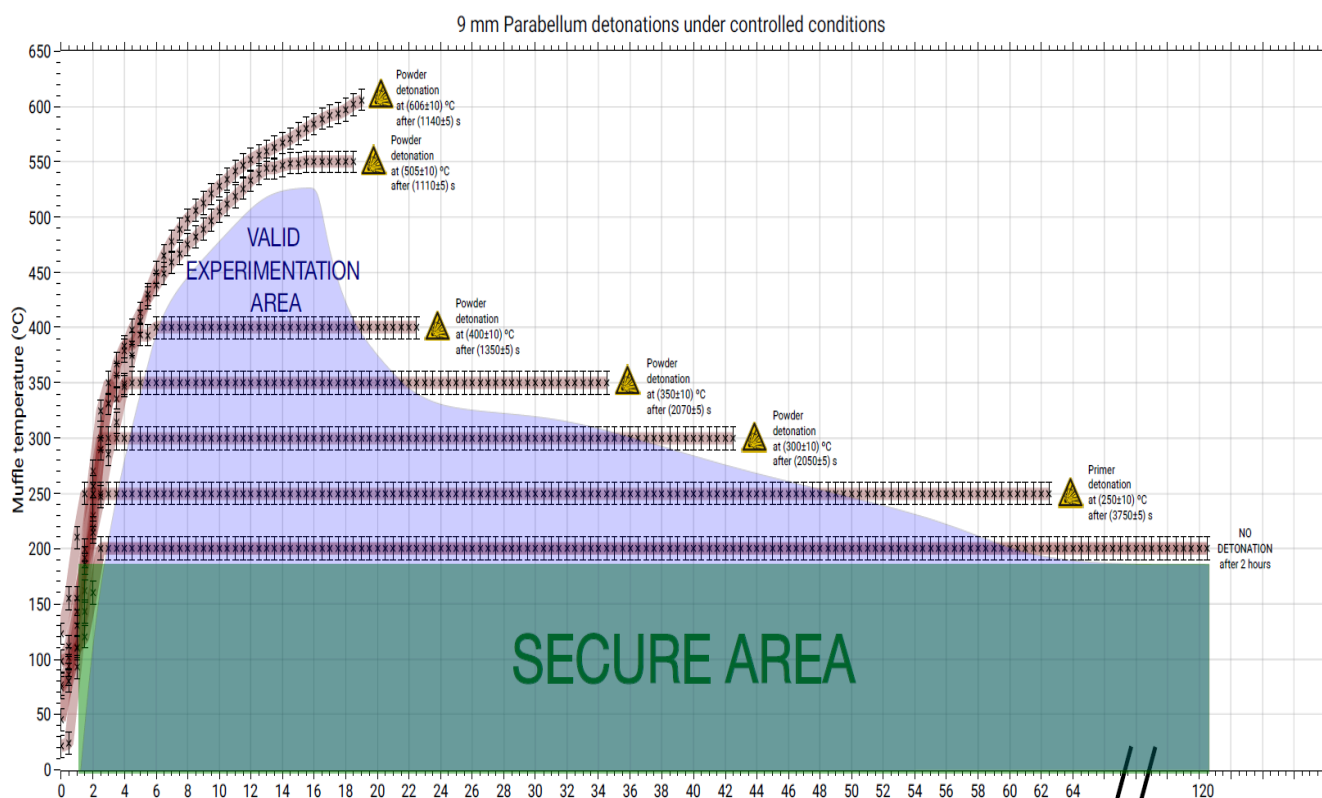


Figura 4-2 detonación de cartuchos y zona segura de operación (fuente propia)

4.4 Análisis y comparación

Los primeros resultados obtenidos en la experimentación permitieron concluir que los cartuchos analizados contaban con un coeficiente de seguridad térmica sumamente alto, lo que sugería que su estabilidad ante temperaturas elevadas era considerablemente mayor de lo que indicaban las especificaciones del fabricante. Mientras que las advertencias en las cajas señalaban que estos podían volverse peligrosos a partir de los 60°C, las pruebas realizadas en un primer momento parecían demostrar que la temperatura real de detonación se encontraba en un rango entre 606°C y 661°C. Esto indicaba que existía un margen de seguridad más de diez veces superior a lo estipulado, reforzando la idea de que los cartuchos podían soportar condiciones de calor extremo sin representar un riesgo inminente de detonación espontánea.

Además, la implementación de un sarcófago blindado y una caja de seguridad secundaria permitió llevar a cabo la experimentación sin incidentes, asegurando un entorno de prueba controlado y seguro. Esto no solo sirvió para validar la resistencia térmica de los cartuchos, sino que también resaltó la importancia de aplicar protocolos de seguridad estrictos al trabajar con municiones en escenarios de alta temperatura. En definitiva, los primeros hallazgos brindaron una perspectiva optimista sobre la estabilidad térmica de los cartuchos, sugiriendo que su umbral de detonación era mucho más alto de lo que se pensaba y que su uso y almacenamiento eran seguros en condiciones normales.

Sin embargo, al modificar la metodología experimental para evaluar el efecto de temperaturas inferiores a 600°C en el tiempo de detonación de los cartuchos, los nuevos resultados obtenidos ofrecieron un panorama más complejo que obligó a reconsiderar algunas de las conclusiones iniciales. La hipótesis planteada en esta segunda fase de pruebas sugiere que si bien los cartuchos podrían

resistir temperaturas elevadas sin detonar inmediatamente, la acumulación progresiva de calor en su estructura podría generar una ignición retardada, incluso si la temperatura aplicada era relativamente baja.

Durante la experimentación, se logró confirmar esta hipótesis mediante la identificación de cinco detonaciones que ocurrieron a distintas temperaturas y en diferentes momentos. En la primera prueba, cuando la mufla alcanzó los 550°C en 16 minutos y 30 segundos y se mantuvo constante en dicha temperatura, la detonación ocurrió después de apenas 2 minutos y 4 segundos. Este resultado se alineaba con los datos anteriores y reforzaba la idea de que los cartuchos, cuando expuestos a temperaturas muy elevadas, podrían detonar en un tiempo relativamente corto.

Sin embargo, en pruebas posteriores en las que se fijaron temperaturas más bajas, la detonación ocurrió tras períodos de exposición mucho más prolongados. Por ejemplo, cuando la temperatura se inició en 400°C, esta se alcanzó en 6 minutos y la detonación tuvo lugar recién a los 22 minutos y 30 segundos. En la siguiente prueba, con una temperatura de 350°C, la mufla alcanzó este valor en solo 4 minutos, pero la detonación no se registró hasta los 34 minutos y 30 segundos. Este mismo patrón se repitió en las pruebas a 300°C y 250°C, donde las detonaciones se produjeron a los 42 minutos y 14 segundos y los 62 minutos y 30 segundos, respectivamente.

Estos resultados plantean un desafío para las conclusiones iniciales, ya que indicaban que la estabilidad térmica de los cartuchos no dependía únicamente de alcanzar una temperatura crítica específica, sino que estaba influenciada por la combinación de la temperatura y el tiempo de exposición. Aunque en la primera fase del estudio se había determinado que los cartuchos no detonaron de manera espontánea hasta alcanzar valores cercanos a los 606°C, la segunda fase de experimentación demostró que podía hacerlo a temperaturas mucho más bajas si se les mantenía expuestas al calor durante el tiempo suficiente.

Este hallazgo sugiere que el coeficiente de seguridad térmica estimado en la primera fase de la experimentación de los cartuchos no es absoluto y varía en función del contexto en el que se encuentren. Mientras que es cierto que un cartucho no detonará de forma inmediata al alcanzar los 60°C, tampoco se puede afirmar que su umbral de ignición sea exclusivamente superior a los 600°C. La acumulación de calor a lo largo del tiempo demuestra ser un factor crucial en el comportamiento de los cartuchos bajo condiciones extremas, evidenciando que incluso temperaturas moderadas pueden llegar a provocar detonaciones si la exposición es lo suficientemente prolongada.

Esto tiene importantes implicaciones en términos de almacenamiento y transporte, ya que los cartuchos que se encuentren en ambientes de alta temperatura durante largos períodos podrían alcanzar un punto crítico sin necesidad de una fuente de calor extrema. En situaciones como incendios o exposición prolongada a calor radiante en espacios confinados, la posibilidad de una ignición retardada se vuelve un factor de riesgo a considerar.

Por lo tanto, si bien las primeras pruebas indicaban que los cartuchos eran altamente resistentes a temperaturas extremas en exposiciones breves, los nuevos resultados evidenciaron que su estabilidad térmica no es inmutable y que el tiempo de exposición al calor juega un papel tan determinante como la temperatura en sí. Esto obliga a reconsiderar la interpretación inicial del margen de seguridad y analizar el comportamiento térmico de los cartuchos desde una perspectiva más dinámica, en la que no solo se evalúe la temperatura máxima soportada, sino también la forma en que el calor se acumula en su estructura con el tiempo.

4.5 Registro de Datos y Análisis de Resultados del grupo de control

Durante las pruebas de fuego del grupo de control, se registraron las velocidades de salida de los proyectiles disparados, obteniendo un mínimo de 352 m/s y un máximo de 397 m/s. La media aritmética de las velocidades registradas fue de 379.425 m/s, lo que representa el valor promedio de velocidad de salida de los proyectiles en condiciones normales.

El rango de velocidades registradas, es decir, la diferencia entre la velocidad máxima y la mínima, fue de 45 m/s. Este valor nos indica el nivel de variabilidad presente en los disparos y nos permite evaluar qué tan homogéneo es el rendimiento de la munición.

Para analizar la dispersión de los datos, se calculó la desviación estándar, obteniéndose un valor de 9.66 m/s. Este parámetro mide cuánto se desvían los valores de velocidad con respecto a la media. En este caso, el valor obtenido sugiere que, aunque existen ligeras variaciones entre los disparos, la velocidad de salida de los proyectiles se mantiene dentro de un margen relativamente constante.

Adicionalmente, se calcularon diferentes tipos de incertidumbre, fundamentales para determinar la precisión y confiabilidad de las mediciones:

- Incertidumbre Tipo A: 9.66 m/s, correspondiente a la variabilidad estadística de los datos obtenidos.
- Incertidumbre Tipo B: 0.67 m/s, asociada a la precisión nominal del cronógrafo utilizado para la medición (0.25% de la velocidad promedio).
- Incertidumbre Combinada: 9.68 m/s, que representa la combinación de las incertidumbres tipo A y B.

Estos cálculos son fundamentales para evaluar la calidad y confiabilidad de los datos obtenidos ya que un valor alto de incertidumbre indicaría que las mediciones presentan una gran variabilidad y que los resultados podrían no ser completamente representativos. En este caso, la incertidumbre es relativamente baja, lo que sugiere que los valores obtenidos son confiables y que las variaciones registradas son inherentes a la munición en sí, más que a fallos en el procedimiento de medición.

El siguiente diagrama de caja o box-plot (Figura 4-3) representa la distribución de velocidades de salida de 40 cartuchos pertenecientes al grupo de control, disparados sin haber sido sometidos a ningún tratamiento ambiental. La variable analizada es la velocidad del proyectil en metros por segundo. La media obtenida fue de 379.43 m/s, con una mediana de 381.50 m/s, lo que indica una distribución ligeramente sesgada hacia valores inferiores. El rango intercuartílico, IQR, de 13.50 m/s refleja una dispersión moderada entre el primer y tercer cuartil. Se observa la presencia de un único valor atípico por debajo del rango inferior, lo que sugiere un disparo con menor potencia, aunque no representa un comportamiento generalizado. La caja engloba la mayoría de los datos, situando el grueso de los disparos entre 370 y 385 m/s aproximadamente. Este gráfico establece una referencia fundamental de comportamiento balístico estable, sobre la cual se compararán los efectos de los distintos tratamientos aplicados en fases futuras del experimento. Así, el grupo de control proporciona un punto de partida estadísticamente válido para evaluar desviaciones significativas derivadas del envejecimiento acelerado por factores ambientales.

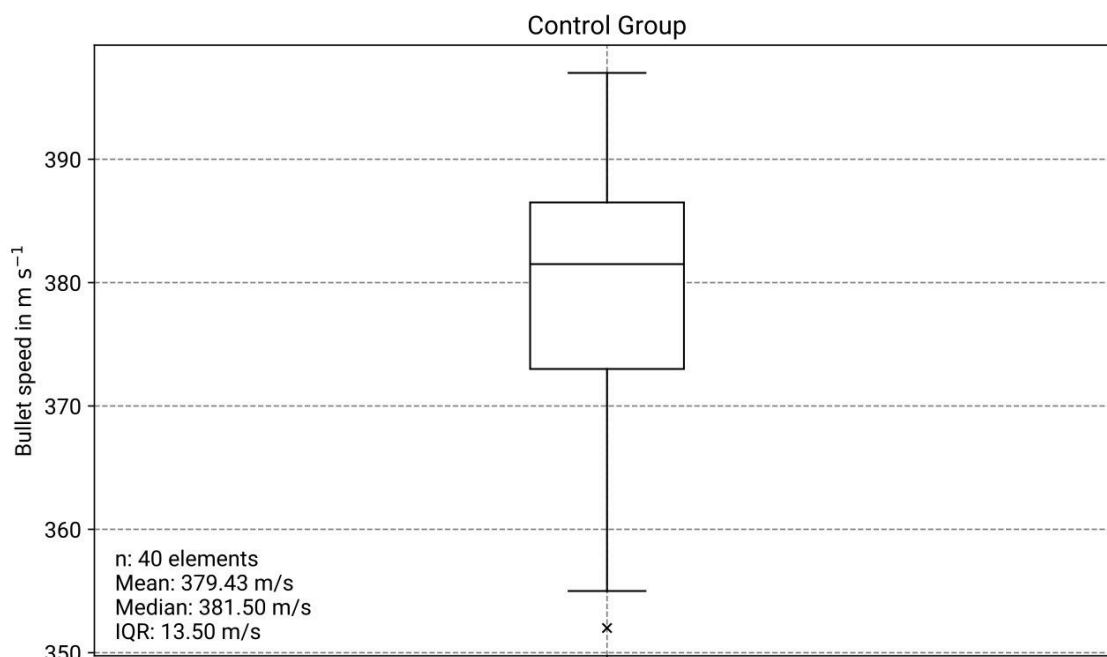


Figura 4-3 Box plot Grupo de control(fuente propia)

Por otro lado, la siguiente gráfica (Figura 4-4) muestra la distribución de frecuencias de las velocidades de salida medidas a su vez en el grupo de control. El eje horizontal representa los intervalos de velocidad del proyectil, en metros por segundo, mientras que el eje vertical indica el número de cartuchos que alcanzaron cada rango. Se observa una concentración clara de datos en el intervalo de 388 a 390 m/s, que agrupa el mayor número de disparos en concreto 8, seguido por el intervalo que va desde 384 a 386 m/s, con 5 registros. Esta acumulación sugiere una tendencia central alrededor de los 385–390 m/s, en consonancia con la media y mediana obtenidas.

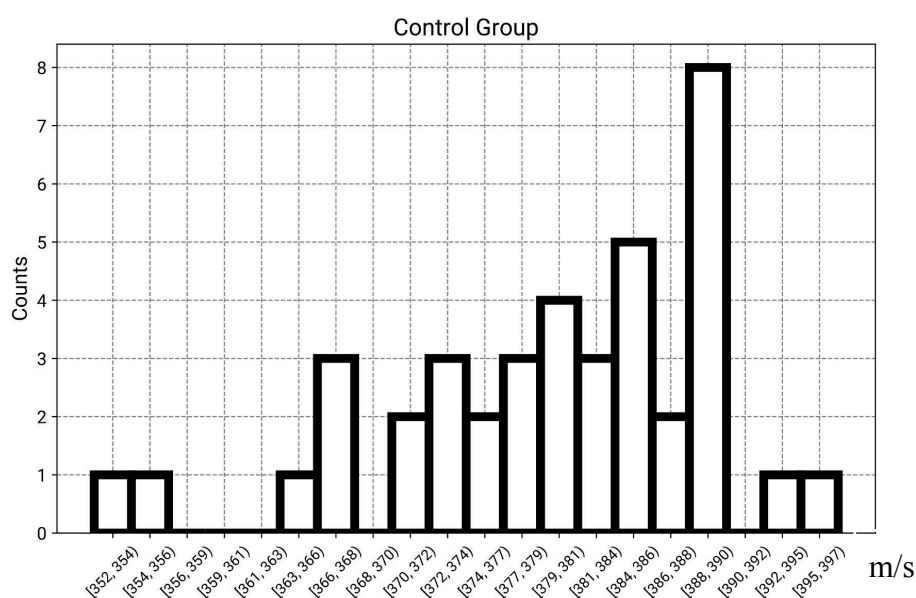


Figura 4-4 Histograma Grupo de control(fuente propia)

Los valores extremos en los rangos inferiores a 360 m/s y superiores a 392 m/s son muy poco frecuentes, lo que indica una distribución centrada y relativamente simétrica, con escasa dispersión. Este comportamiento refuerza la validez del grupo de control como referencia estable para detectar

desviaciones en futuras fases del estudio, cuando se analicen los efectos de los tratamientos ambientales sobre la velocidad del proyectil.

La estimación de incertidumbre en las mediciones balísticas se realizó considerando tanto la dispersión estadística entre cartuchos, incertidumbre tipo A, como las características del instrumento de medida, tipo B. Este valor, relativamente bajo respecto a la media, permite afirmar que las mediciones realizadas son fiables y que cualquier desviación en los grupos tratados podrá atribuirse con fundamento al efecto de los factores ambientales ensayados.

4.5.1 Interpretación de los Resultados

El análisis de la velocidad de salida de los proyectiles proporciona varias conclusiones relevantes. En primer lugar, el valor promedio de 379.4 ± 9.7 (incertidumbre combinada) m/s se encuentra dentro del rango esperado para cartuchos del calibre seleccionado en condiciones normales, lo que confirma que la munición empleada cumple con los estándares de rendimiento.

La desviación estándar de 9.7 m/s indica que, aunque existen ligeras variaciones entre los disparos, estas se encuentran dentro de un margen aceptable. Esta variabilidad puede estar influenciada por factores como diferencias en la carga de pólvora de cada cartucho, la consistencia en la fabricación de las vainas o pequeñas variaciones en la presión interna generada en cada disparo.

Otro punto importante es la diferencia entre la incertidumbre tipo A y la incertidumbre tipo B. El hecho de que la incertidumbre asociada a la precisión del cronógrafo sea mucho menor que la incertidumbre estadística de los datos confirma que la principal fuente de variabilidad en la medición proviene de la munición en sí, y no del instrumento de medición. Esto refuerza la idea de que las variaciones observadas en los valores de velocidad son inherentes al rendimiento de los cartuchos y no un error instrumental.

Analizando se puede establecer que los datos no siguen una distribución gaussiana. Además de que el valor más correcto de velocidad de salida del proyectil con el grupo de control es $v = (379.4 \pm 9.7)$ m/s.

4.5.2 Conclusiones para el grupo de control

Las pruebas realizadas con el grupo de control han sido necesarias para establecer una referencia sobre el rendimiento de los cartuchos en condiciones óptimas sin haberse visto afectados por agentes externos. La elección de un revólver como plataforma de disparo resultó necesaria para reducir errores mecánicos los cuales podrían haberse visto reflejados en las mediciones si se hubiera elegido una pistola con corredera como arma de fuego, ya que con el revólver el único factor mecánico que aparece a la hora de realizar el disparo es el que ofrece la aguja percutora, en el caso de una pistola aparecen numerosos componentes que podrían haber afectado en las mediciones, asegurando que los datos obtenidos reflejan con la mayor exactitud posible el desempeño real de la munición.

Los análisis estadísticos han confirmado que la munición presenta un rendimiento estable y predecible, con una dispersión de velocidad baja y una incertidumbre controlada. Estos resultados servirán como base para evaluar cómo los diferentes factores ambientales analizados en este estudio afectan la velocidad de salida de los cartuchos.

Estos datos serán necesarios para futuras comparaciones con los experimentos en los que la munición haya sido sometida a condiciones adversas, permitiendo determinar los efectos de factores ambientales como la temperatura, la salinidad y el pH.

4.6 Resultados Prueba preliminar envejecimiento térmico a 100 °C

Como parte de la fase inicial, se procedió al análisis del comportamiento balístico de los 30 cartuchos previamente expuestos a una temperatura constante de 100 °C durante 24 horas. Esta prueba, enmarcada en el grupo de condiciones térmicas controladas, tuvo por objetivo verificar si una exposición sostenida a temperatura elevada, sin alcanzar niveles de ignición, podía inducir variaciones en el comportamiento de los cartuchos como se había supuesto.

Tras la exposición térmica, se ejecutaron los disparos en la galería, utilizando el cronógrafo, con el fin de registrar la velocidad de salida de cada proyectil y contrastarla con la línea base establecida por el grupo de control. Los resultados obtenidos muestran una amplia dispersión de valores, con velocidades registradas que oscilan entre 217 y 1400 m/s, muy por encima de la dispersión normal esperada en este tipo de munición, que habitualmente se encuentra en el rango de 370–390 m/s.

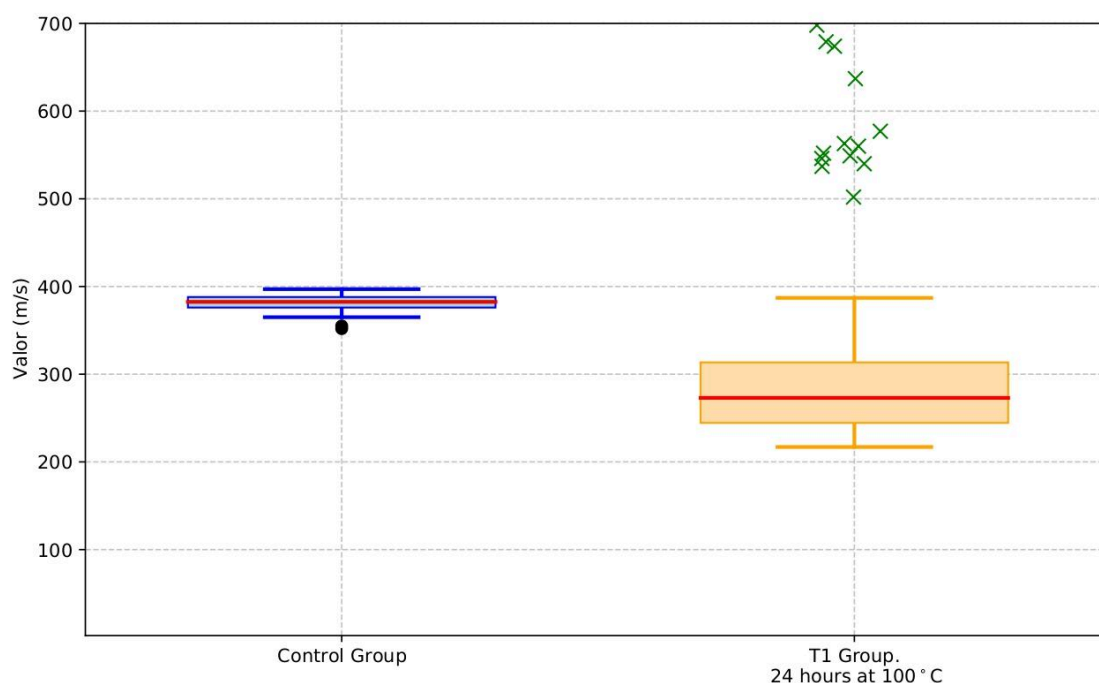


Figura 4-5 Boxplot Prueba preliminar (fuente propia)

El análisis gráfico mediante boxplot (Figura 4-5) revela una clara acumulación de valores extremos y atípicos, incluyendo registros superiores a 700 m/s y un máximo puntual de 1400 m/s. Estos valores se consideran no físicamente plausibles para el tipo de cartucho empleado, ya que superarían con creces la energía balística generada por una carga estándar de propelente. Estos resultados no reflejan el comportamiento real del proyectil, sino que se atribuyen a interferencias electromagnéticas durante la medición con el sistema de cronografía empleado. Dichos errores pueden producirse por desalineaciones ópticas, interferencias de señal o reflexiones internas, especialmente cuando se dispara en entornos cerrados con elementos metálicos cercanos o iluminación deficiente.

No obstante, y pese a las anomalías detectadas, este ensayo ha permitido validar que la munición mantenía su funcionalidad básica tras el tratamiento térmico, es decir, no se registraron fallos de encendido ni detonaciones parciales. Sin embargo, debido a la dispersión de los datos, no se puede llegar a determinar con fiabilidad si ha existido una pérdida real de rendimiento en términos de potencia o regularidad balística, pero sí que se podría plantear la hipótesis de que la pólvora se vió

afectada ya que 17 de los 30 disparos sí que presentan un comportamiento esperado donde el rendimiento de la pólvora bajó dejando valores cerca de 100 metros por segundo menores que en el caso del grupo de control.

En consecuencia, se ha acordado repetir esta prueba en condiciones de disparo mejoradas, con control riguroso de las condiciones electromagnéticas, alineación óptica precisa del sensor y, si es posible, el uso de equipos redundantes de medida. Este ensayo queda registrado como parte del avance secuencial del proyecto EIDUD, aportando lecciones valiosas sobre los desafíos asociados a la medición precisa en escenarios de pruebas reales.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Este Trabajo de Fin de Grado se enmarca como la primera fase dentro de un proyecto más amplio, EIDUD, anteriormente mencionado, y por tanto se centra en el diseño experimental detallado, la planificación de ensayos ambientales y la validación preliminar mediante grupo de control. En el momento de cierre de esta memoria, no se han ejecutado aún los ensayos completos sobre los cartuchos tratados con los distintos factores de envejecimiento mencionados, la salinidad, la temperatura y el pH, por lo que los resultados experimentales presentados corresponden únicamente al grupo no sometido a tratamiento. La fase de obtención de datos completos y su análisis comparativo están previstos como parte del desarrollo futuro del proyecto, utilizando la infraestructura y el diseño establecidos en este trabajo.

5.1 Conclusiones Principales

Los estudios realizados en este Trabajo Fin de Grado han permitido cumplir el objetivo central de diseñar experimentos que permitan caracterizar preliminarmente la fiabilidad de la munición de 9 × 19 milímetros Parabellum bajo condiciones ambientales extremas. En primer lugar, se corroboró que, en ausencia de estrés externo, estos cartuchos presentan un comportamiento altamente confiable, el grupo de control no registró fallos de ignición ni anomalías balísticas significativas, y las velocidades de salida mostraron una dispersión acotada y acorde con las especificaciones del fabricante. Este resultado reafirma la calidad del lote de munición analizado y proporciona una línea base estadística sólida con la cual comparar cualquier degradación inducida por factores ambientales.

En relación con la resistencia a entornos extremos, las pruebas de calor permitieron determinar un umbral de seguridad térmica mucho mayor al esperado inicialmente. Mientras que la documentación técnica advertía de riesgos a temperaturas relativamente bajas, 60 °C, las detonaciones espontáneas no ocurrieron hasta alcanzar aproximadamente valores que van desde los 606 a los 661 °C en situaciones de calentamiento rápido. Este amplio margen, más de diez veces superior al citado en las advertencias indica que, bajo exposiciones breves, los cartuchos pueden soportar temperaturas muy elevadas sin explotar. No obstante, las pruebas complementarias introdujeron una conclusión crítica, la temperatura no actúa sola, sino en combinación con el tiempo de exposición. A temperaturas más moderadas, los cartuchos detonaron cuando permanecieron suficiente tiempo bajo calor, evidenciando que incluso ambientes no letales de inmediato pueden volverse peligrosos con la exposición prolongada. En términos operativos, esto significa que un incendio de larga duración en un almacén de municiones, aun si la temperatura máxima no es extrema, podría desencadenar explosiones una vez transcurrido cierto tiempo.

Respecto a los factores salinos y de pH, aunque en este trabajo no se alcanzó a completar la fase experimental completa para todos los niveles, dado que se trata de una fase preliminar del proyecto global EIDUD, se han establecido bases muy concretas para su estudio. Se diseñaron protocolos detallados de inmersión en soluciones salinas de distintas concentraciones, exposición a niebla salina y ambientes húmedos, así como inmersiones en ácidos fuertes y atmósferas corrosivas. Estos protocolos, junto con las pruebas piloto realizadas, indican que es posible generar en laboratorio condiciones aceleradas de corrosión comparables a años de almacenamiento en climas marítimos o entornos industriales. Si bien los resultados cuantitativos finales de degradación por salinidad y pH se obtendrán en fases posteriores, ya se han podido observar algunas tendencias en las inspecciones visuales: como la formación de pátinas de óxido y depósitos cristalinos tras exposiciones salinas prolongadas, o la fragilización incipiente de componentes metálicos tras contacto con ambientes ácidos. Estas evidencias apuntan a que, tal y como se anticipó en la selección de factores, la corrosión inducida por sal y ácido puede comprometer la integridad de la munición especialmente en la zona de la vaina y el fulminante, aumentando la probabilidad de fallos de ignición o pérdida de rendimiento balístico.

En síntesis, las conclusiones principales que se derivan de este TFG son:

- La munición 9×19 milímetros Parabellum analizada mantiene un desempeño fiable en condiciones estándar, con variaciones balísticas mínimas y coherentes con un producto de calidad. Esto proporciona confianza en el uso operativo de estos cartuchos mientras no hayan sufrido envejecimiento o maltrato ambiental.
- Existe un amplio margen de seguridad térmica inmediata, los cartuchos no detonan espontáneamente sino hasta alcanzar temperaturas del orden de $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ o superiores si el calentamiento es rápido. Esto supera con creces las situaciones de calor más severas que cabría esperar en escenarios militares ordinarios como sería la exposición solar intensa o deflagraciones cercanas entre otras, lo cual es una garantía importante de seguridad en almacenamiento y transporte.
- Sin embargo, la acumulación de calor en el tiempo reduce ese margen de seguridad. Aun sin llegar a temperaturas tan extremas, una exposición prolongada de decenas de minutos a horas a calor moderado puede provocar la combustión interna de la pólvora y la detonación. Esta conclusión enfatiza la necesidad de controlar no solo la temperatura máxima sino también la duración de la exposición a altas temperaturas cuando se almacenan municiones.
- Se ha verificado la susceptibilidad de la munición a la corrosión en ambientes salinos y ácidos, al menos cualitativamente. Los cartuchos expuestos a niebla salina mostrarán signos visibles de corrosión en la superficie, y aquellos sometidos a atmósferas ácidas desarrollarán manchas y residuos químicos. Aunque en esta fase no se dispararon aún esos cartuchos a tratar, es de esperar que dichas condiciones adversas incrementen la tasa de fallos o afecten a la velocidad de salida en comparación con el grupo de control.
- El enfoque metodológico adoptado de un diseño factorial multifactorial con grupo de control y replicación ha demostrado ser adecuado y efectivo. Los datos obtenidos permitieron contrastar hipótesis y entender mejor cómo interactúan las variables de envejecimiento. Asimismo, el uso de herramientas estadísticas como el análisis de incertidumbre, aportó rigurosidad al tratamiento de resultados, aumentando la fiabilidad de las conclusiones extraídas.

Teniendo todo lo mencionado anteriormente en cuenta, este Trabajo de Fin de Grado aporta un primer paso sólido hacia la caracterización integral de la vida útil de los cartuchos 9×19 milímetros Parabellum en entornos extremos. Las evidencias recopiladas confirman algunas expectativas como es

la alta calidad de la munición o la importancia de la corrosión y revelan aspectos nuevos como es el efecto crítico del tiempo en la seguridad térmica. Estos resultados cumplen con los objetivos propuestos inicialmente y sientan las bases para continuar con investigaciones más exhaustivas en el marco del proyecto EIDUD, encaminadas a mejorar la fiabilidad de dispositivos de un solo uso para la defensa.

5.2 Limitaciones del Trabajo

Si bien los objetivos planteados se han alcanzado en gran medida, es importante reconocer las limitaciones de la presente investigación, las cuales ofrecen oportunidades de mejora en trabajos futuros. En primer lugar, este estudio representó una fase preliminar centrada en el diseño experimental y en pruebas piloto con el grupo de control y ensayos térmicos. Debido al tiempo disponible y a la naturaleza del TFG, no fue posible ejecutar la totalidad del plan experimental con los 1000 cartuchos en todas las combinaciones de factores previstas. Por tanto, los resultados relativos a salinidad y pH son hasta ahora principalmente cualitativos o inferidos, y carecemos aún de datos cuantitativos completos sobre cómo estos factores afectan las métricas balísticas en términos de porcentajes de fallos de fuego o velocidades de salida. Esta limitación en el alcance experimental implica que las conclusiones sobre corrosión y degradación química deban considerarse tentativas hasta ser confirmadas con la ejecución total de las pruebas.

Relacionado con lo anterior, otra limitación radica en el tamaño muestral efectivo de algunas pruebas realizadas. Aunque se planificó un número amplio de cartuchos por condición, las detonaciones espontáneas por calor, se observaron en un número relativamente reducido de muestras con unos pocos cartuchos en cada escenario de temperatura-tiempo. Idealmente, sería deseable contar con más repeticiones para esas pruebas de umbral térmico, de modo de afinar la estimación estadística del punto de ignición. La escasez de cartuchos disponibles para repetir estos ensayos extremos hace que los valores obtenidos se tomen como referencias indicativas, pero sin poder asignarles intervalos de confianza estrechos. En futuros estudios, destinar más unidades a cada nivel de temperatura permitirá aplicar métodos estadísticos de fiabilidad con mayor robustez.

Asimismo, las condiciones controladas de laboratorio difieren en algunos aspectos de los escenarios reales, lo cual es otra limitación a considerar. En las pruebas de corrosión se utilizarán soluciones puras de NaCl o ácidos específicos, mientras que en entornos reales la munición podría enfrentarse a mezclas complejas de contaminantes, barro, variaciones de temperatura concurrentes, vibraciones, y otros factores limitantes. Si bien se ha intentado simular de forma acelerada los factores más influyentes, siempre habrá cierta divergencia entre las condiciones de envejecimiento acelerado y el envejecimiento natural. Esto implica que los modelos de vida extrapolados a partir de los datos acelerados deberán validarse finalmente con experiencia real o ensayos de larga duración para asegurar su fidelidad.

Otra limitación a mencionar es la instrumentación disponible y la resolución de las mediciones. Aunque el cronógrafo empleado tiene una buena precisión, medidas más sofisticadas como podría ser el empleo de sensores piezoeléctricos en la recámara para medir presión durante el disparo, o cámaras de alta velocidad para analizar la salida del proyectil, podrían brindar información adicional sobre cómo exactamente afecta la degradación al desempeño y no solo la velocidad final, sino la curva de combustión. Este TFG se centró en variables fáciles de obtener en campo velocidad de boca, y funcional y no funcional, dejando fuera otras variables balísticas como la precisión de impacto o la dispersión en el blanco por razones de simplicidad. La exclusión del análisis de la precisión en el tiro es una limitación, ya que es posible que la corrosión o deformación de un cartucho afecte la trayectoria del proyectil aunque su velocidad no varíe mucho. En futuros trabajos podría contemplarse evaluar también la precisión en tiro de los cartuchos envejecidos, completando así el panorama de efectos.

Por último, deben señalarse las limitaciones logísticas y de seguridad que influyeron en el trabajo. Algunas condiciones extremas como los ciclos térmicos drásticos o las atmósferas ácidas concentradas requieren equipos especializados y protocolos estrictos que limitarán el número de pruebas simultáneas por razones de seguridad. Esto ralentizará el proceso experimental y obligará a priorizar ciertos ensayos. Del mismo modo, el manejo de sustancias peligrosas como ácidos fuertes o aerosoles salinos y el riesgo inherente de trabajar con munición activa imponen un marco muy controlado que, si bien necesario, puede restar flexibilidad a la exploración de condiciones. Aun así, todas estas limitaciones serán abordadas procurando minimizar su impacto, y se documentan aquí para transparencia y para guiar mejoras en investigaciones sucesivas.

Resumiendo todo lo mencionado las limitaciones del presente trabajo se refieren principalmente al alcance acotado de la fase experimental cuantitativa, al tamaño muestral reducido en algunos ensayos críticos, a las diferencias entre las simulaciones aceleradas y la realidad, a la ausencia de ciertas mediciones complementarias como la precisión de tiro y a los condicionantes prácticos de seguridad y logística. Reconocer estas limitaciones permite enmarcar correctamente las conclusiones y, sobre todo, establece los puntos concretos donde deberá hacerse hincapié en las futuras investigaciones para completar y reforzar lo aquí conseguido.

5.3 Líneas Futuras de Trabajo

Derivado de las conclusiones y limitaciones antes expuestas, se identifican diversas líneas futuras de investigación y desarrollo que darían continuidad natural a este trabajo:

- La ejecución completa del plan experimental, la prioridad inmediata es llevar a cabo los ensayos planificados con los factores de salinidad y pH utilizando el resto de cartuchos disponibles. Esto implicará sumergir, exponer y posteriormente disparar los cartuchos según las combinaciones de niveles definidas como son las soluciones salina al 3.5%, 10% y 35% en distintos tiempos, o la atmósfera ácida. Los datos obtenidos en base a tasas de fallo, variaciones de velocidad tras corrosión, complementarán el presente estudio y permitirán cuantificar qué factor degrada más la munición y en qué medida. En especial, sería valioso determinar, por ejemplo, a partir de qué nivel de corrosión salina comienza a aumentar significativamente la probabilidad de fallo de fuego, o cuánto se reduce la velocidad de salida tras X horas en ambiente ácido. Estos resultados consolidarán la validez del diseño experimental propuesto y completarán el panorama de fiabilidad bajo todos los factores considerados.
- El Modelado estadístico de la fiabilidad, con los datos completos, permitirá construir un modelo probabilístico de vida útil de la munición. Una línea futura específica es ajustar modelos de distribución de Weibull para estimar la vida media y vida característica de los cartuchos bajo diferentes condiciones. Por ejemplo, utilizando los tiempos hasta detonación obtenidos en las pruebas térmicas, podría determinarse la energía de activación aparente o parámetro de Arrhenius que rige la ignición por calor, extrapolando así el comportamiento a temperaturas inferiores durante lapsos más largos. De igual modo, con los datos de corrosión se pueden construir curvas de degradación que relacionen la pérdida de velocidad o la probabilidad de fallo con indicadores de daño como sería, porcentaje de superficie oxidada. Integrando todos estos aspectos, el objetivo a largo plazo sería desarrollar un modelo de fiabilidad multivariable, donde a cada combinación de condiciones, temperatura, humedad/salinidad y pH, se le asocie una probabilidad de fallo o una reducción esperada de rendimiento. Este modelo sería de gran utilidad práctica para estimar la vida útil garantizada de la munición en distintos entornos de almacenamiento.
- La validación en condiciones reales, aunque los ensayos acelerados proporcionan información valiosa en poco tiempo, es recomendable emprender también pruebas de exposición real más

prolongada. Una posible línea futura sería almacenar lotes de cartuchos durante meses o años en ambientes controlados que emulen condiciones reales como sería un almacén costero sin climatizar o un polvorín en zona desértica con altas temperaturas diurnas, e ir monitoreando su estado y desarrollo con el tiempo. Comparar los resultados de estos estudios de larga duración con las predicciones del modelo acelerado permitirá calibrar y validar dicho modelo. Esto asegurará que las conclusiones extraídas del enfoque acelerado se sostienen en la práctica y permitirá afinar factores de aceleración.

- La ampliación a otros tipos de munición y dispositivos, si bien este TFG se centró en cartuchos del calibre mencionado, los métodos desarrollados son aplicables a otros dispositivos de un solo uso como serían, los iniciadores, los detonadores, u otros calibres de munición. Un camino a seguir sería extender el estudio a municiones de distinto calibre o distinto fabricante, para comprobar si las tendencias de degradación observadas son generales o específicas de un determinado diseño. Del mismo modo, podría evaluarse la pólvora en aislamiento sin el cartucho completo para entender su degradación química pura frente a temperatura o humedad, lo cual aporta información complementaria. En el marco del proyecto EIDUD, se podría incluir también la fiabilidad de artificios pirotécnicos, bengalas, etc., usando un enfoque experimental similar. Esto contribuiría a generar una nube de datos amplia sobre cómo envejecen distintos dispositivos de uso militar, todo bajo un mismo paraguas metodológico.
- Las medidas de mitigación y mejoras de diseño, es otra línea de trabajo que consiste en, una vez identificados los factores más dañinos, explorar soluciones que aumenten la vida útil de la munición frente a dichos factores. Por ejemplo, si se confirma que la salinidad elevada produce corrosión rápida en las vainas, podría investigarse la efectividad de aplicar recubrimientos protectores o selladores poliméricos a los cartuchos, y luego someter cartuchos recubiertos y no recubiertos a niebla salina para cuantificar la diferencia. Similarmente, podrían evaluarse distintos embalajes o métodos de almacenaje y comparar cómo cada uno reduce o no el impacto de humedad y ambiente ácido sobre la munición. Estas investigaciones tendrían un carácter más ingenieril y aplicado, buscando recomendaciones concretas para las Fuerzas Armadas sobre cómo almacenar munición para maximizar su vida útil. Incluso se podría proponer mejoras en el diseño del propio cartucho y realizar ensayos comparativos que muestren si dichas modificaciones incrementan la resistencia al envejecimiento.
- La Consideración de factores adicionales, si bien el presente estudio cubrió temperatura, corrosión salina y química, existen otros factores que también pueden influir en la fiabilidad de municiones y que podrían incluirse en trabajos futuros. Por ejemplo, el estrés mecánico a través de vibraciones por transporte o impactos, no ha sido abordado aquí. Experimentos complementarios podrían someter cartuchos a vibraciones prolongadas o choques mecánicos repetitivos simulando el transporte en vehículos militares antes de probarlos en mediante pruebas de fuego, para evaluar si tales solicitudes producen desajustes o degradación. Otro factor es la radiación solar UV y el clima, que podrían afectar más a componentes poliméricos o embalajes que a la munición metálica en sí, pero que conviene analizar en escenarios de almacenaje al aire libre. En definitiva, expandir el ámbito de estudio a una matriz de envejecimiento aún más completa dará una visión 360° de la fiabilidad.

En conclusión, las líneas futuras de trabajo se enfocan tanto en completar y validar lo iniciado como en ampliar el horizonte hacia mejoras prácticas a través de protección de municiones, nuevos factores y otros dispositivos. La continuidad de este proyecto permitirá no solo profundizar en el conocimiento científico-técnico de la degradación de municiones, sino también ofrecer recomendaciones concretas para gestionar mejor el ciclo de vida de estos dispositivos críticos, incrementando la seguridad y eficacia de las operaciones donde se empleen.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Libro: Baqués Quesada, J., & Fojón Lagoa, P. (Año). *La realidad geopolítica de España. Hacia el estatus de actor estratégico* . Editorial.
- [2] Pack, S. W. (2015). *Accountability of military equipment in an operational environment: An exploratory case study* (Publication No. 3707404) [Doctoral dissertation, University of Phoenix]. ProQuest Dissertations & Theses Global. Disponible en: <https://www.proquest.com/docview/3707404>
- [3] Machado-Fernández, J. R. (2018). Modelación de las distribuciones Weibull y log-normal para aplicaciones de radar. *Ciencias Holguín*. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/1815/181556120003/html/>
- [4] Quintanilla Casas, B. (2017). *Estadística en variables con censura: aplicación a datos medioambientales*. Open Access UOC. Disponible en: <https://openaccess.uoc.edu/handle/10609/63786>
- [5] Castilla, E. (2009). *Inferencia estadística robusta basada en divergencias para dispositivos de un solo uso*. SEIO. Disponible en: https://www.seio.es/wp-content/uploads/2022/05/Marzo2022_Tesis.pdf
- [6] García, C. (2020). *Las Fuerzas Armadas Españolas en el siglo XXI* . CESEDEN.
- [7] Muñoz, F. G. (2002). *La Infantería de Marina, una fuerza para el siglo XXI*. Disponible en :<https://arbor.revistas.csic.es/index.php/arbor/article/view/1124>
- [8] Barnes, F. (2018). *Cartuchos del mundo* . Libros Gun Digest.
- [9] Muñoz-Granados, O. (2019). Balística. *Vida Científica: Boletín de la Escuela Preparatoria No. 4*, 14, 54–55 disponible en: <https://repository.uaeh.mx/revistas/index.php/prepa4/article/view/4205/6067>
- [10] Pradere Pensado, JC, García Gómez, A., Padrón Valdés, F., & Coca Machado, JL (2016). Paciente con lesiones por terminal balística. *Revista Cubana de Cirugía*, 55. disponible en : <https://www.medigraphic.com/pdfs/cubcir/rcc-2016/rcc161h.pdf>
- [11] Libro: Mintegi Larrazá, MA. (2021) *Parabellum de 9 mm* . Editorial (Erein Argitaletxea, S.A).
- [12] Dockery, Kevin. *Future Weapons*. New York: Berkley Hardcover, 2013.
- [13] Ejército de Tierra. (s.f.). *Materiales - Ejército de Tierra*. Ministerio de Defensa de España. Recuperado el [4/02/2025], disponible en: <https://ejercito.defensa.gob.es/materiales>.

- [14] Barrett, P. M. (2012). *Glock: El ascenso de las armas en Estados Unidos*. Google Books. disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=RIkXLYOZJf8C&oi=fnd&pg=PA1&dq=navy+seals+change+Glock+17+for+glock+45&ots=IgXTrUd2C3&sig=963P-Xu022wIRI2TmcCg1hK31JM#v=onepage&q&f=false>
- [15] Defensa.com. (2024, 9 de agosto). *La G45 y su nuevo cañón GLOCK Marksman Barrel (GMB)*. Recuperado el [4/02/2025], de <https://www.defensa.com/España>
- [16] 9 x 19 mm Parabellum FMJ 8g-124g . Disponible en : https://www.yugoimport.com/sites/default/files/documents/2024-04/9%20x%2019%20mm%20PARABELLUM%20FMJ%208g-124g_0.pdf
- [17] González, EMC (2021). *Inferencia estadística robusta basada en divergencias para dispositivos de un sólo uso* [Tesis doctoral, Universidad de Granada]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/580445668.pdf>
- [18] U.S. Department of Defense. (2019). *Test method standard: Environmental engineering considerations and laboratory tests* (MIL-STD-810H). Defense Logistics Agency. Disponible en: https://quicksearch.dla.mil/qsDocDetails.aspx?ident_number=35978
- [19] Libro de :Balakrishnan, N. (2021). *Pruebas de vida útil acelerada de dispositivos de un solo uso: Recopilación y análisis de datos* . Wiley. disponible en: <https://www.wiley.com/en-us/Accelerated%2BLife%2BTesting%2Bof%2BOne-shot%2BDevices%3A%2BData%2BCollection%2Band%2BAnalysis-p-9781119664000>
- [20] Departamento de Defensa. (2001). *Análisis de dispositivos de un solo uso* (STARS Vol. 7, N.º 4). Centro de Análisis de Confiabilidad. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA391207>
- [21] Maria acuña (2016). *Ingeniería de confiabilidad* . Editora Alfaomega Grupo. https://books.google.com/books/about/Ingenier%C3%ADa_de_confiabilidad.html?id=DhD1DwAAQBAJ
- [22] Basantes Baños, MV, & Claudio Pérez, MA (2014). *Detección de discontinuidades superficiales y subsuperficiales en materiales ferromagnéticos en el Centro de Ingeniería y Mantenimiento de Aviones Militares* [Tesis de grado, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio UTC. <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/1581>
- [23] Plonsky, B. (2015). *Rayos X para la industria: los ensayos no destructivos contribuyen a aumentar la competitividad militar* . Boletín de la OIEA. https://www.iaea.org/sites/default/files/5610_sp_rayosx.pdf
- [24] Pérez Salom, R. (2008). La nueva convención sobre las municiones en racimo. *Revista Española de Derecho Internacional*, 60(2), 291–321. Disponible en: <https://www.jstor.org/stable/44298922>
- [25] Ferreira, C., Ribeiro, J., Almada, S., Rotariu, T., & Freire, F. (2016). Reducción del impacto de las municiones: una evaluación comparativa del ciclo de vida de cuatro tipos de municiones de 9 mm. *Science of the Total Environment*, 563–564, 977–987. disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716309135?casa_token=wwGu2HEeu88AAAAA:16V5jCS1WQvPJ-UUV2i_kQAwIOVGpC9Na9hVEf3AbAG1Lqd1iqyuYd4Nqhi4OASF0Bpy9uWl

- [26] U.S. Army Environmental Command. (2010). Life-cycle environmental assessment (LCEA) cartridge 5.56mm. <https://www3.epa.gov/region1/eco/drinkwater/capecod/adminrecord/2010-Final-LCEA-5-56mm-M855A1.pdf>
- [27] General Dynamics Ordnance and Tactical Systems - Canada. (2020). Small caliber ammunition solutions for reduced range. Disponible en: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-AVT-335/MP-AVT-335-17.pdf>
- [28] U.S. Department of Defense. (2019). *Test Method Standard: Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests (MIL-STD-810H)*. Defense Logistics Agency. Disponible en: https://quicksearch.dla.mil/qsDocDetails.aspx?ident_number=35978
- [29] STANAG2953 Disponible en : <https://govtribe.com/file/government-file/w52p1j20r0005-b08-att-0010-stanag-2953-identification-of-ammunition-dot-pdf>
- [30] NATO Standardization Office. (2014). *AOP-38: Environmental Criteria for Storage and Transport of Military Ammunition and Explosives*. NATO Standardization Document Database. Disponible en : <https://nso.nato.int/nso/>
- [31] NATO Standardization Office. (2020). *STANAG 4170: Principles for the Safety Assessment of Munitions*. Disponible en <https://nso.nato.int/nso/>
- [32] Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. . Editorial McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A.
- [33] Saif Valdéz, (2019). *Análisis comparativo entre ensayos destructivos y no destructivos de la resistencia del hormigón con diferentes métodos de dosificación* [Tesis de grado]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. disponible en repositorio.puce.edu.ec .
- [34] Fernández Mayta, CA (2018). *Evaluación estructural mediante ensayos destructivos y no destructivos* [Tesis de grado]. Universidad Nacional José. Disponible en: <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/2727>
- [35] Fernández, S. F., Sánchez, J. M. C., Córdoba, A., & Largo, A. C. (2002). *Estadística descriptiva*.
- [36] Evans, M. J. (2018). *Probabilidad y estadística: la ciencia de la incertidumbre*.
- [37] Vivanco, M. (2005). *Muestreo estadístico: Diseño y aplicaciones*.
- [38] Ladero, R. R., Ruiz, C. G., López, M. L., et al. (2009). La nitrocelulosa en explosivos: propiedades y caracterización química. *Anales de Química de la Real Sociedad Española de Química*, 105(3), 123-130. disponible en : <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3111619>

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

Este trabajo, orientado a mejorar la fiabilidad de la munición de pequeño calibre en condiciones extremas, tiene varias implicaciones que trascienden el plano puramente técnico y afectan esferas sociales, económicas y ambientales.

Implicaciones sociales: Garantizar la fiabilidad de los cartuchos de 9 × 19 milímetros Parabellum en todo tipo de entornos redundante directamente en la protección del personal militar y de seguridad, así como potencialmente en la de la población civil. Un armamento más fiable significa que los soldados y agentes y cuerpos de seguridad del estado pueden confiar en que sus equipos funcionarán correctamente cuando sea necesario, reduciendo el riesgo de accidentes o fallos en situaciones críticas. A través de minimizar la probabilidad de un fallo de fuego evita situaciones de peligro en enfrentamientos armados en los que un fallo podría poner en riesgo la vida del usuario y de sus compañeros. Además, desde la perspectiva ciudadana, unos estándares altos de fiabilidad en municiones almacenadas en arsenales disminuyen la probabilidad de accidentes catastróficos derivados de explosiones involuntarias o incendios que pudieran afectar a instalaciones militares cercanas a núcleos urbanos. En un sentido más amplio, este tipo de estudios fomentan una cultura de la seguridad en el ámbito de la defensa, demostrando el compromiso de las Fuerzas Armadas con la investigación orientada a preservar vidas y evitar daños colaterales. También cabe destacar la implicación en la formación y adiestramiento. Conociendo las condiciones que degradan la munición permite entrenar al personal en condiciones óptimas de almacenamiento y manejo además de concientizar sobre no dejar munición expuesta al sol, agua de mar o a químicos. Esto empodera a los usuarios finales con conocimiento para mantener su material en buen estado, reforzando la seguridad colectiva.

Implicaciones económicas: La fiabilidad y vida útil de la munición tienen un impacto económico significativo en la gestión de recursos de defensa. Si gracias a estudios como el presente se logran extender los periodos de almacenamiento seguro de las municiones determinando que cierto lote puede almacenarse 5 años más en clima controlado sin riesgo notable, implicaría un ahorro económico a través de reducir la necesidad de desechar o renovar stock con frecuencia, optimizando el ciclo de vida de un producto costoso. Inversamente, si se descubre que bajo ciertas condiciones los cartuchos fallan prematuramente, se pueden evitar gastos mayores al retirar a tiempo ese lote defectuoso antes de que cause daños o pérdidas como pueden ser accidentes en polígonos de tiro o desperfectos en armas por cartuchos defectuosos. El conocimiento generado permite afinar las políticas de mantenimiento mediante la inversión en mejores empaquetamientos o almacenes climatizados pudiendo justificar económicamente al compararlo con el coste de reponer munición dañada. También hay implicaciones en el ámbito industrial, los resultados de este estudio pueden retroalimentar a los fabricantes de munición, orientándolos sobre qué mejoras introducir en sus productos para hacerlos más resistentes como podrían ser barnices anticorrosión en las vainas. Si la industria adopta dichas mejoras, se producirán municiones más duraderas, lo que aumenta el valor del producto y podría reducir a largo plazo los costes de logística militar. En resumen, invertir en fiabilidad redundante en una gestión económica más eficiente, cada cartucho rendirá mejor y por más tiempo, y los recursos se destinarán de forma óptima a mantener la capacidad operativa.

Implicaciones medioambientales: La temática de este TFG se vincula con el medio ambiente de dos formas principales. Por un lado, al extender la vida útil y asegurar la calidad de la munición, se evita la generación innecesaria de residuos peligrosos. Las municiones caducadas o degradadas deben ser destruidas, lo que supone gestionar residuos de pólvora, metales pesados como el plomo, el cobre del proyectil, o compuestos del fulminante y materiales potencialmente tóxicos. Si gracias a una mejor

conservación se reduce la tasa de eliminación de munición, indirectamente se está disminuyendo la carga contaminante asociada a su destrucción. Por otro lado, este trabajo implica someter cartuchos a agentes agresivos ácidos y salinos, ello obliga a manejar estos productos químicos con cuidado. Las implicaciones ambientales aquí radican en la necesidad de disponer correctamente de soluciones salinas saturadas, baños ácidos usados y restos de munición corroída, para evitar vertidos que puedan dañar los ecosistemas. Durante la ejecución de los ensayos, se seguirán protocolos para neutralizar los ácidos empleados como podría ser a través de bases para llevarlos a pH neutro antes de su eliminación, y para recolectar los efluentes de niebla salina, minimizando cualquier impacto ambiental. Asimismo, cualquier resto de pólvora o fulminante proveniente de los cartuchos ensayados se tratará como residuo peligroso, almacenado y entregado a un gestor autorizado. Esto subraya la importancia de incorporar la gestión medioambiental en la investigación de defensa, incluso experimentos a pequeña escala deben contemplar el ciclo de vida completo de los materiales empleados. A un nivel más estratégico, conocer cómo afectan factores ambientales a la munición también ayuda a prever posibles consecuencias ecológicas en caso de conflictos o maniobras, por ejemplo, la munición almacenada en climas tropicales húmedos podría degradarse y liberar contaminantes lentamente en el suelo si no se supervisa. Con estudios como este, se pueden establecer mejores prácticas para minimizar dichos impactos. En conclusión, las implicaciones ambientales de este trabajo destacan la necesidad de ser responsables en el uso y descarte de materiales peligrosos, y muestran cómo mejorar la fiabilidad de los dispositivos puede a su vez reducir la huella ambiental asociada a su ciclo de vida.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado, enmarcado en un contexto de defensa y armamento, invita a realizar una reflexión ética y social sobre la naturaleza y propósito del mismo. A continuación se abordan estos aspectos, considerando tanto la responsabilidad profesional del ingeniero como el impacto social del trabajo.

Reflexión ética: Desde el punto de vista ético, trabajar en la mejora de la fiabilidad de municiones plantea un dilema aparente, ya que se está contribuyendo al perfeccionamiento de un elemento destinado, en última instancia, a fines bélicos o de fuerza. Sin embargo, es importante reconocer que la ética de la ingeniería en este contexto se centra en minimizar el daño y maximizar la seguridad. Mejorar la fiabilidad de un cartucho no significa promover la violencia, sino asegurarse de que, dado que existen y se usan estos dispositivos, lo hagan de la forma más segura y controlada posible. Un arma o munición poco fiable puede causar daños no intencionados por malfunciones o accidentes que son éticamente inaceptables. Por tanto, este trabajo se alinea con el principio ético de no maleficencia, ya que busca reducir riesgos para los usuarios y terceros. Además, el investigador ha mantenido en todo momento una postura de responsabilidad ética durante la realización del proyecto, se han seguido estrictos protocolos de seguridad para proteger a las personas involucradas en los ensayos incluido el personal ajeno al trabajo del laboratorio, y se han gestionado correctamente los residuos peligrosos generados, evitando daño al entorno. También se ha procedido con honestidad científica, documentando tanto resultados favorables como desfavorables, y reconociendo las limitaciones del estudio. En el ámbito de la defensa, ética y eficacia van de la mano cuando se trata de protección de la tropa, dotar a los profesionales de herramientas confiables es un imperativo moral para minimizar situaciones de indefensión o accidentes. Así, este trabajo contribuye éticamente al proporcionar conocimiento que puede ser usado para salvaguardar vidas, reduciendo fallos inesperados de munición y para establecer estándares más seguros en el manejo de armamento.

Reflexión social: En el plano social, cabe considerar cómo investigaciones como esta encajan en la relación entre las Fuerzas Armadas, la industria de defensa y la sociedad civil. Por un lado, existe a veces cierto desconocimiento o distancia de la sociedad hacia los trabajos científicos que se realizan en el ámbito militar. Este TFG pone de relieve que en las instituciones de defensa no solo se entrena o se opera armamento, sino que también se lleva a cabo investigación e innovación científica de alto nivel, con rigor metodológico y con beneficios tangibles. Comunicar estos avances, publicando en revistas o presentando en congresos puede ayudar a acercar la comunidad científica-militar a la sociedad, mostrando transparencia y apertura. Por otro lado, mejorar la fiabilidad de las municiones impacta en la sociedad al garantizar que los cuerpos y fuerzas de seguridad del estado puedan cumplir su labor con menores riesgos colaterales. Un policía o militar que dispone de equipamiento fiable es, en teoría, más seguro para la población a la que protege, pues se reducen las probabilidades de incidentes no deseados como la explosión fortuita de munición almacenada en un cuartel cercano a una ciudad, o el fallo de un arma en manos de un agente durante una situación de amenaza a civiles. Además, este proyecto tiene un componente formativo y de relevo generacional importante, al ser un trabajo de un estudiante de ingeniería en el Centro Universitario de la Defensa, refleja la apuesta por formar profesionales sensibles a la realidad social y ética. El hecho de incluir explícitamente en la formación trabajos sobre fiabilidad, seguridad y análisis de riesgos inculca en los futuros oficiales e ingenieros militares una conciencia de prevención y protección que, sin duda, repercutirá positivamente en cómo desempeñen sus cargos y en las políticas que implementen. Finalmente, desde una perspectiva social amplia, la investigación en fiabilidad conecta con la noción de sostenibilidad y aprovechamiento óptimo de recursos públicos. La sociedad espera que los recursos destinados a defensa se administren con eficiencia y responsabilidad; trabajos como este, que buscan alargar la vida de los pertrechos y evitar pérdidas, responden a esa expectativa de buena gestión, lo que en última

instancia fortalece la confianza entre la ciudadanía y las instituciones militares. En conclusión, la reflexión social sobre este TFG es positiva, aunque se trate de mejorar un producto militar, las motivaciones subyacentes son la seguridad de las personas, la eficiencia en el uso de recursos y el compromiso con una actuación responsable, valores que coinciden con los intereses de la sociedad a la que, en definitiva, las Fuerzas Armadas sirven.