UAEM Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Ingeniería

FUGRAD: Granada con gradualidad de daño que funciona con base en una nueva relación de índice de daño.

Doctorado en ciencias de la ingeniería

PRESENTA:

Juan Ramón Meda Gutiérrez

Comité tutorial:

Luis Adrián Zúñiga Avilés

José Martín Herrera Ramírez

Adriana H. Vilchis González

Toluca, México. Agosto 2026.

Tabla de Contenido

Pagina

Lista de tablas 6

Lista de figuras 7

Nomenclatura 9

Capítulo 1

Introducción 12

1.1 Definición del proyecto 13

1.2 Justificación 13

1.3 Objetivo general 14

1.4 Objetivos específicos 14

1.5 Hipótesis 14

1.6 Alcance y limitaciones 15

1.6.1 Alcances 15

1.6.2 Limitaciones 15

1.7 Estructura de la tesis 15

Capítulo 2

Marco teórico conceptual 16

2.1 Fundamentos del fenómeno de detonación 16

2.2 Interacciones dinámicas frente al entorno 19

2.3 Peso equivalente de TNT 23

2.4 Mecánica de fragmentación y proyección balística 24

2.5 La regla de los 79 J y la distancia máxima de fragmento peligroso (DMFP) 27

2.6 Biomecánica del trauma por explosión y criterios de letalidad 30

2.6.1 Mecanismo primario: sobrepresión por onda de choque 30

2.6.2 Mecanismo secundario: balística de fragmentos 32

2.6.3 Mecanismo terciario: desplazamiento del cuerpo 32

2.7 Modelos de vulnerabilidad: método Probit 33
2.7.1 Modelos Probit para el mecanismo primario de daño 35
2.7.2 Modelos Probit para el mecanismo secundario de daño 35
2.7.3 Modelos Probit para el mecanismo terciario de daño 36

Capítulo 3
Estado del arte y de la técnica 39
3.1 Estudio patentométrico de dispositivos explosivos con gradualidad 39
3.2 Análisis bibliográfico sobre dispositivos explosivos con gradualidad 43
3.3 Conclusión 47

Capítulo 4
Metodología de diseño 49
4.1 Formulación y modelado cuantitativo del nuevo índice de daño 50
4.2 Criterio de gradualidad por zonas 51
4.3 Algoritmo para el cálculo del nuevo índice de gradualidad de daño 51
4.3.1 Caso de aplicación granada de sobrepresión (MKIIIA3) 56
4.3.2 Caso de aplicación granada de fragmentación (M26M) 60
4.3.3 Caracterización en laboratorio de la granada M26M 64
4.3.4 Pruebas de fragmentación del cuerpo de la granada M26M 64
4.3.5 Mediciones de velocidad de fragmento de la granada M26M 66

Capítulo 5
Diseño del sistema FUGRAD 70
5.1 Observación y reporte de principios básicos (TRL_1) 70
5.2 Formulación del concepto tecnológico (TRL_2) 71
5.3 Función crítica analítica y experimental y prueba de concepto (TRL_3) 73
5.4 Aplicación del algoritmo de IGD(R) para el sistema FUGRAD 76
5.5 Comparación de las características de los modelos MKIIIA3, M26M y FUGRAD 80
5.6 Determinación y evaluación de los índices de comunalidad 83

5.7 Fabricación del modelo físico experimental de la FUGRAD y pruebas de laboratorio (TRL_4) 87

Capítulo 6
Resultados y discusión 97

6.1 Registros de propiedad industrial ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI) 97

Capítulo 7
Conclusión y trabajos futuros 99

Bibliografía 100

Anexo A: Solicitud de patente MX/a/2026/005091 105

Anexo B: Diseño industrial (modelo industrial, MX/f/2023/000328) 169

Anexo C: Diseño industrial (modelo industrial, MX/f/2023/000329) 170

Anexo D: Diseño industrial (modelo industrial, MX/f/2023/000330) 171

Lista de tablas

Tabla 1. Variables de la hipótesis. 15
Tabla 2. Valores promedio de coeficiente de arrastre Cd. 27
Tabla 3. Umbrales de daño y letalidad para órganos específicos. 31
Tabla 4. Equivalencia entre valores "Probit" y porcentaje de población afectada. 34
Tabla 5. Organizaciones con mayor registro de patente. 40
Tabla 6. Fortaleza del área tecnológica diferenciadora por país. 40
Tabla 7. Inventores más relevantes en el diseño de granadas. 41
Tabla 8. Patentes relevantes y su evolución tecnológica. 41
Tabla 9. Tendencia tecnológica (2012-2026). 42
Tabla 10. Comparación tecnológica de las granadas actuales. 43
Tabla 11. Artículos relacionados con la investigación. 43
Tabla 12. Criterios de gradualidad y zonificación. 51
Tabla 13. Datos de impulso específico generado por la carga del explosivo de la granada MKIIIA3. 58
Tabla 14. Datos característicos del mecanismo por daño secundario de la granada M26M. 62
Tabla 15. Datos característicos de impulso específico por mecanismo de daño terciario. 63
Tabla 16 Espesores de pared de la granada M26M. 64
Tabla 17 Datos de peso y número de fragmentos de la granada M26M. 66
Tabla 18. Velocidad de fragmento de la granada M26M. 68
Tabla 19. Bases teóricas y conceptuales utilizadas en el sistema FUGRAD. 70
Tabla 20. Características de los conceptos propuestos. 73
Tabla 21. Distancia escalada relacionada con la carga explosiva de FUGRAD. 76
Tabla 22. Datos de sobrepresión generada por FUGRAD. 77
Tabla 23. Datos característicos del mecanismo por daño secundario de FUGRAD. 78
Tabla 24. Probabilidad del mecanismo terciario. 79
Tabla 25. Peso y número de fragmentos de la granada FUGRAD. 91

Lista de figuras

Figura 1. Fenómeno de la detonación. 17
Figura 2. Gráfica del comportamiento de la sobrepresión a lo largo del tiempo. 18
Figura 3. Comparación de las curvas de presión incidente y reflejada. 19
Figura 4. Trayectoria de la onda de choque con origen en aire. 19
Figura 5. Trayectoria de la onda de choque con origen sobre superficie. 20
Figura 6. Trayectoria de la onda de choque con origen en superficie. 20
Figura 7. Parámetros de la onda de choque en la fase positiva para una explosión esférica de TNT al aire libre a nivel del mar. 21
Figura 8. Parámetros de la onda de choque en la fase positiva para una explosión hemisférica de TNT en la superficie a nivel del mar. 22
Figura 9. Distancia de fragmento peligroso (DFP). 27
Figura 10. Curvas de supervivencia para daño pulmonar, $\boldsymbol{Wh}$ = peso del ser humano (libras). 37
Figura 11. Daños en el oído humano debido a la presión de la explosión. 38
Figura 12. Diseño de granadas de mano: a) Pat. US20210018306; b) Pat. SK20170279; c) Pat. US20160305753; d) Pat. US20160273898. 42
Figura 13. Distancia escalada de la carga explosiva de la granada MKIIIA3. 56
Figura 14. Pico de Sobrepresión generada por la granada MKIIIA3. 57
Figura 15. Probabilidad de muerte por incidencia de la onda de choque de la granada MKIIIA3. 57
Figura 16. Decaimiento del índice de daño gradual con la distancia de la granada MKIIIA3. 58
Figura 17. Distancia escalada de la carga explosiva de la granada M26M. 60
Figura 18. Pico de Sobrepresión generada de la granada M26M. 61
Figura 19. Probabilidad de muerte por incidencia de la onda de choque de la granada M26M. 61
Figura 20. Probabilidad de muerte por impacto de fragmentos peligrosos de la granada M26M. 62
Figura 21. Decaimiento del índice de gradualidad de daño de la granada M26M. 63
Figura 22. Arreglo para la prueba de fragmentación de la granada M26M. 65
Figura 23. Tamaño de fragmentos del cuerpo de la granada M26M. 65
Figura 24. Cámara de alta velocidad FASTCAM SA-Z. 66
Figura 25. Posición del cuerpo de la granada M26M en placa de acero. 67
Figura 26. Detonación de la granada M26M. 67
Figura 27. Grabación de video a 50,000 fps de la explosión de la granada M26M. 68
Figura 28.Densidad y distribución de fragmentos de la granada M26M. 68
Figura 29. Modelo conceptual de la granada a base de cuerpo de polímero. 72
Figura 30. Modelo conceptual de la granada con cuerpo de acero. 73
Figura 31. Diseño de la FUGRAD, componentes principales. 74
Figura 32. Diseño de la camisa prefragmentada. 74
Figura 33. Diseño del cuerpo de polímero de la FUGRAD. 75
Figura 34. Diseño de la espoleta de la FUGRAD (componentes). 75
Figura 35. Pico de sobrepresión generada por FUGRAD. 77
Figura 36. Probabilidad de muerte por incidencia de la onda de choque de FUGRAD. 77

Figura 37. Curva característica de Impulso específico de FUGRAD. 78
Figura 38. Decaimiento del índice de gradualidad de daño de FUGRAD. 79
Figura 39. Comparación del pico de sobrepresión con respecto a la distancia. 80
Figura 40. Probabilidad de muerte por mecanismo primario, comparación. 80
Figura 41. Comparación del decaimiento de la energía cinética del fragmento promedio. 81
Figura 42. Comparación de la densidad de fragmento. 81
Figura 43. Probabilidad de impacto por mecanismo de daño secundario. 82
Figura 44. Probabilidad de muerte por fragmento peligroso. 82
Figura 45. Fabricación del cuerpo bi-cameral de la FUGRAD. 87
Figura 46. Proceso de fabricación de la camisa prefragmentada de la FUGRAD. 87
Figura 47. Marcado de huella de fragmentación en camisa. 88
Figura 48. Camisa Prefragmentada de La Granada FUGRAD. 88
Figura 49. Componentes de la granada FUGRAD (camisa, cuerpo y espoleta). 88
Figura 50. Granada FUGRAD ensamblada. 88
Figura 51. Imagen radiográfica de conjunto cuerpo-camisa-carga de la FUGRAD. 89
Figura 52. Prueba de fragmentación de la FUGRAD en fosa de prueba. 89
Figura 53. Arreglo para prueba de fragmentación. 90
Figura 54. Fragmentos de la granada FUGRAD. 90
Figura 55. Posición de la granada FUGRAD en placa de acero. 91
Figura 56. Imagen tomada con la cámara FASTCAM SA-Z. 92
Figura 57. Registro de la distribución radial de los fragmentos de la FUGRAD. 92
Figura 58. Ángulo de proyección de los fragmentos de la granada FUGRAD. 93
Figura 59. Distribución de impactos de los fragmentos de la granada FUGRAD. 93
Figura 60. Comparación de la velocidad de fragmento de FUGRAD vs M26M. 94
Figura 61. Comparación de la energía cinética de fragmento FUGRAD vs M26M. 94
Figura 62. Comparación del IGD de la FUGRAD teórico vs. Experimental. 95

Nomenclatura

$\sqrt{2E}$	Velocidad de Gurney.
A_f	Área expuesta del fragmento.
A_t	Área estándar del blanco.
Cd	Coeficiente de arrastre.
CI	Índice de similitud.
D	Velocidad de detonación.
DFP	Distancia de fragmento peligroso.
DMFP	Distancia máxima de fragmento peligroso.
DMOC	Distancia máxima de onda de choque.
Ec	Energía cinética.
fps	Cuadros por segundo.
FUGRAD	Granada con gradualidad en el daño.
H_{TNT}^{D}	Calor de detonación del TNT.
H_{EXP}^{D}	Calor de detonación del explosivo.
IGD	Índice de gradualidad de daño.
i_r	Impulso reflejado.
Is	Impulso específico.
i_{so}	Impulso incidente.
J	Joule
k	Factor de forma del fragmento
M	Velocidad del sonido.
MFE	Modelo físico experimental
n	Constante de simetría.
NFP	Número de fragmento peligroso
Nfx	Número de fragmentos a x metros
Ntf	Número total de fragmentos
OTAN	Organización del Tratado del Atlántico Norte
P	Presión
P_{desp}	Probabilidad de muerte por desplazamiento
P_{frag}	Probabilidad de muerte por fragmento peligroso
P_h	Probabilidad de impacto
P_p	Función de probabilidad Probit
P_r	Presión reflejada
Prob.	Probabilidad
P_{so}	Presión incidente
q(R)	Densidad espacial de fragmento

R	Distancia.
s	Segundo.
SEDENA	Secretaria de la Defensa Nacional.
TNT	Trinitrotolueno.
TRL	Nivel de maduración tecnológica.
V_{50}	Velocidad media de letalidad.
VR	Velocidad del fragmento a la distancia R.
W	Peso del explosivo.
W_c	Peso de la camisa.
W_{cc}	Peso del cuerpo de cargado.
W_{ct}	Peso del contenedor.
W_{cv}	Peso del cuerpo de acero.
W_{fmax}	Peso del fragmento mayor.
W_{fmin}	Peso del fragmento menor.
W_{pf}	Peso medio de fragmento
W_{tf}	Peso total de los fragmentos.
W_{TNT}	Peso de TNT.
Z	Distancia escalada.
λ	Tasa media de impacto.
μ	Factor de escala de Mott.

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo del sistema FUGRAD (Granada con gradualidad de daño), una plataforma modular diseñada para satisfacer la necesidad de las fuerzas del orden público de contar con armamento que cumpla con los principios de proporcionalidad, necesidad y racionalidad exigidos por el marco normativo 2026. El problema central identificado es que las granadas convencionales, como la MKIIIA3 y la M26M, poseen efectos fijos e indiscriminados que no permiten ajustar el nivel de fuerza a escenarios urbanos específicos, generando riesgos colaterales inaceptables para la población civil.

La investigación se sustenta en la formulación de un nuevo Índice de Gradualidad de Daño (IGD), un modelo matemático estocástico que integra los tres mecanismos principales de transferencia de energía de una explosión: daño primario (onda de choque), secundario (fragmentación) y terciario (desplazamiento del cuerpo). Utilizando el método Probit, el cual permite transformar estímulos físicos en probabilidades de incapacitación o letalidad, definiendo zonas tácticas que van desde la letalidad total (Zona 0) hasta el límite de seguridad para civiles (Zona 3).

El diseño del sistema FUGRAD rompe con el paradigma de "arma de área" al proponer un cuerpo bi-cameral de polímero que permite la configuración modular. La innovación principal reside en el uso de una camisa prefragmentada de acero con 672 proyectiles de baja masa (0.1488 g), los cuales funcionan como un "fusible aerodinámico". A diferencia de la granada M26M, cuyos fragmentos pesados mantienen energía letal a grandes distancias, los fragmentos de la FUGRAD colapsan energéticamente por debajo del umbral de 79 J al cruzar los 10 m, garantizando que el artefacto se comporte solo como un dispositivo de aturdimiento fuera del radio de acción deseado.

La metodología incluyó la ingeniería inversa de modelos actuales, simulaciones balísticas y la fabricación de un Modelo Físico Experimental (MFE) que alcanzó un nivel de maduración tecnológica TRL 4. Las pruebas de laboratorio, que utilizaron cámaras de ultra alta velocidad y radiografía industrial, validaron una velocidad de fragmentos de 1449 m/s, consistente con los modelos teóricos de Gurney. Además, se demostró una alta eficiencia logística con un Índice de Comunalidad (CI) del 92.3%, permitiendo transformar el efecto de la granada mediante el intercambio de componentes mínimos.

Como resultado de este trabajo, se generaron una solicitud de patente de invención y tres registros de diseño industrial ante el IMPI. En conclusión, el sistema FUGRAD proporciona a las instituciones de seguridad una herramienta con certidumbre estadística para neutralizar amenazas con precisión, minimizando el daño colateral y armonizando la capacidad táctica con el respeto a los derechos humanos.

Keywords:

Índice de gradualidad de daño (IGD), Granada explosiva (GE), Esperanza de vida (EV), Fragmento peligroso(FP), Onda de Choque (OC)

Capítulo 1

Introducción

En este proyecto, se abordarán diferentes temas relacionados con el estudio de la balística de efectos de las granadas, así como el existente marco normativo, que serán considerados durante este proceso de investigación.

En el 2019 el Congreso de la Unión aprobó un nuevo marco normativo que regula el uso de la fuerza pública, estableciendo gradualidad y principios para su uso legítimo por las instituciones de seguridad pública, en este nuevo marco normativo se trata de estandarizar la actuación de las fuerzas públicas frente a la sociedad[1].

Actualmente las fuerzas de seguridad pública emplean granadas explosivas cuyos efectos (daños) se requiere conocer para evaluar desde la óptica del nuevo marco normativo que sujeta al uso de la fuerza a principios y niveles de gradualidad, buscando reducir los daños no deseados a la población.

Las granadas son dispositivos constituidos principalmente de dos grupos: 1) el grupo de la espoleta o dispositivo de ignición y 2) el grupo del cuerpo (carga principal); el primero define el funcionamiento y seguridad de la granada mientras que el segundo define los efectos que la granada producirá (onda de presión, fragmentación, fuego, iluminación, etc.).

Para efectos de este proyecto entenderemos al daño como una medida cuantitativa que representa la probabilidad que tiene un blanco (objeto o persona) de ser vencido por una amenaza; donde la amenaza es la capacidad que tiene un arma de vencer un sistema especifico o blanco, estableciéndose una relación directa del arma con el blanco claramente identificado.

El diseño de granadas explosivas es complejo por la diversidad de efectos que puede producir sobre un blanco (personas o bienes), lo cual implica el conocimiento de las variables involucradas con el fin de obtener diseños que permitan controlar (predecir) los efectos que se desean obtener con su uso.

El objetivo de este proyecto es desarrollar una granada con características que permitan modular sus efectos a partir de un diseño basado en variables balísticas.

Con lo que se estaría dando propuesta de solución al problema que se plantea sobre qué características de las granadas explosivas permitirán gradualidad en los daños. Además de caracterizar las granadas explosivas que actualmente emplean las fuerzas del orden público, con el fin de generar un cuerpo de conocimiento que permita a las fuerzas del orden establecer sus procedimientos de actuación y de empleo adecuado de estas granadas.

1.1. Definición del proyecto.

El diseño de granadas explosivas es complejo por la diversidad de efectos que puede producir sobre un blanco (personas o bienes), lo cual implica el conocimiento de las variables involucradas con el fin de obtener diseños que permitan controlar (predecir) los efectos que se desean obtener con su uso.

El objetivo de este proyecto es desarrollar una granada con características que permitan modular sus efectos a partir de un diseño con base en variables balísticas. Actualmente las fuerzas de seguridad pública emplean granadas explosivas cuyos efectos (daños) se requiere conocer para evaluar desde la óptica del nuevo marco normativo que sujeta al uso de la fuerza a principios y niveles de gradualidad, buscando reducir los daños no deseados a la población.

El nuevo marco normativo establece que las características de las granadas explosivas se regularán con la Ley Federal de Armas de Fuego y Control de Explosivos [2]; esta no detalla los requisitos ni características que debe cumplir las granadas explosivas para determinar su letalidad y posibles daños; ni tampoco establece alguna metodología para evaluar el daño que producirá su uso, empleando actualmente las fuerzas del orden público granadas que no contemplan una gradualidad en sus efectos.

A pesar de que existen en el mercado granadas modulares estas no tienen alcance ni sobrepresión controlados.

Por lo cual nos preguntamos ¿Qué características debe tener una granada explosiva que permita gradualidad en los daños que produce en espacio abierto?

1.2. Justificación

Se considera pertinente solucionar el problema que se plantea sobre qué características de las granadas explosivas permitirán gradualidad en los daños.

Además de caracterizar las granadas explosivas que actualmente emplean las fuerzas del orden público, con el fin de generar un cuerpo de conocimiento que permita a las fuerzas del orden establecer sus procedimientos de actuación y de empleo adecuado de estas granadas. El desarrollo de este proyecto permitirá:

- Definir una alternativa de solución que consiste en una nueva granada, la cual podrá configurarse de acuerdo con los efectos deseados por el usuario, los cuales implicarán un daño determinado.

- Proveer de conocimiento que permita a las instituciones y sectores de la sociedad participar en la elaboración de normas que establezcan criterios o características que deben tener las granadas para su uso en el orden público.

- Aplicar los conocimientos mediante la realización de un proyecto de investigación tecnológico aplicado (prototipo de granada explosiva).

Con la realización de este proyecto se beneficiará a la sociedad y las instituciones encargadas de la seguridad pública, ya que a través de él se contará con el diseño de una granada explosiva que permita configurar el nivel de daño.

1.3. Objetivo general

Diseñar una granada explosiva con un nivel de madurez tecnológica TRL 4, para las fuerzas de seguridad pública con gradualidad de daño, mediante configuración modular con base en la relación de índice de daño.

1.4. Objetivos específicos

a) Analizar, caracterizar y documentar los efectos de las granadas explosivas (MKIIIA3 y M26M) que actualmente utilizan las fuerzas del orden público.
b) Determinar las relaciones de la carga explosiva y propiedades del contenedor.
c) Diseñar la granada con gradualidad de daño.
d) Modelar los efectos de la granada diseñada.
e) Fabricar el modelo físico experimental (MFE).
f) Validar el funcionamiento con parámetros controlados de laboratorio.
g) Realizar pruebas de campo con el MFE-TRL4.

1.5. Hipótesis

Con base en las variables que intervienen en la relación del índice de daño se podrán establecer parámetros de diseño de la granada FUGRAD, lo que permitirá validar su funcionamiento con un CI $\geq$ 60%.

La Tabla 1 muestra las variables para esta investigación. Se consideran las principales variables balísticas que integrarán al índice de daño y sus efectos sobre éste.

Tabla 1. Variables de la hipótesis.

Variable	Causa	Efecto
Distancia máxima de fragmento peligroso (DMFP)	El tipo y cantidad de explosivo	Aumenta la probabilidad de mayor daño sobre un blanco a menor distancia
Número de fragmentos peligrosos (NFP)	Cuerpo de la granada pre-fragmentado	Aumenta la probabilidad de impactar sobre un blanco
Distancia máxima de onda de choque (DMOC)	Tipo, cantidad y nivel de confinamiento del explosivo	Aumenta la probabilidad de daño sobre el blanco a mayor distancia

1.6. Alcances y limitaciones.

1.6.1. Alcance

- Caracterización del daño producido por las granadas de mano actuales.
- Obtención de los modelos balísticos de las granadas.
- Diseño de una granada con gradualidad del daño.
- Fabricación MFE de granada FUGRAD.
- Propiedad intelectual del sistema.
- Publicación de un artículo de investigación.

1.6.2. Limitaciones

- Regulación restrictiva para el manejo de explosivos.
- Autorización de la SEDENA para llevar a cabo Pruebas de campo.

1.7. Estructura de la tesis

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: El apartado 1 presenta la introducción, motivación y propuesta de este proyecto. Básicamente, se establecen las bases de una granada de fragmentación suave llamada FUGRAD para uso de las fuerzas del orden público. En el apartado 2, la teoría se resumen los antecedentes y conceptos relacionados con esta investigación. El apartado 3 informa sobre la literatura de dispositivos explosivos de fragmentación y también incluye dispositivos no letales de fragmentación usados con la mano. Además, en el apartado 4, se proporciona una metodología de diseño para el desarrollo de dispositivos explosivos de fragmentación a partir de la caracterización de las granadas existentes (MKIIIA3 y M26M). en el apartado 5, se establece el diseño del sistema FUGRAD, se resume el proceso de fabricación y el control del nivel de fragmentación de la granada FUGRAD. El apartado 6 muestra los resultados obtenidos y discusión de esta investigación. Finalmente, el apartado 7 presenta las conclusiones y el trabajo futuro se discuten al final de este documento.

Capítulo 2

Marco teórico conceptual

Para abordar la extrema complejidad inherente a una granada con gradualidad de daño y la subsecuente formulación de un índice cuantitativo predictivo, la investigación debe sustentarse ineludiblemente en un marco teórico robusto, que abarca un espectro multidisciplinario iniciando en la física de la detonación de altas energías y culmina en la evaluación cuantitativa del riesgo estructural y biológico por la acción de los efectos producidos por la detonación.

Este marco teórico conceptual, permite establecer las bases para definir y parametrizar un "Índice de Daño" integral, que permita ponderar matemáticamente el nivel de daño multidimensional que produciría un artefacto, partiendo exclusivamente de las características geométricas, mecánicas y químicas del diseño de la granada.

2.1. Fundamentos del fenómeno de detonación.

Los fenómenos relacionados con la detonación se centran en el conocimiento de las propiedades termodinámicas de las sustancias explosivas, y como estas pueden ser utilizadas para la liberación de energía, tal como la empleada en un arma para disparar proyectiles (balas), con una trayectoria, alcance y efecto determinado o para producir fragmentos (esquirlas) del recipiente que contiene la sustancia explosiva, mismos que son proyectados en forma de metralla.

El término detonación se refiere a una reacción química muy rápida y estable que se produce a través del material explosivo a una velocidad, denominada velocidad de detonación (D), que es supersónica en el explosivo sin reaccionar. Las velocidades de detonación oscilan entre 6,000 y 9,000 m/s para la mayoría de los explosivos de alta potencia. La onda de detonación convierte rápidamente el explosivo sólido o líquido en un gas muy caliente, denso que genera una alta presión, el volumen de este gas, que antes era el material explosivo, es entonces la fuente de ondas expansivas en el aire. Las presiones (P_D) inmediatamente detrás del frente de detonación oscilan entre 186,000 y 340,000 bar (Figura 1). Solo alrededor de un tercio de la energía química total disponible en la mayoría de los explosivos de alta potencia se libera en el proceso de detonación. Los dos tercios restantes se liberan más lentamente en explosiones en el aire a medida que los productos de la detonación se mezclan con el aire y arden. Este proceso de postcombustión tiene un efecto mínimo en las propiedades de la onda expansiva, ya que es mucho más lento que la detonación [3].

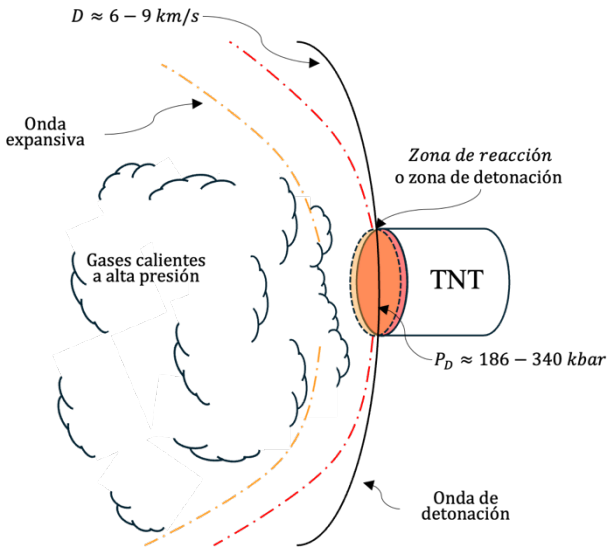


Figura 1. Fenómeno de la detonación (elaboración propia).

Los efectos de la explosión se manifiestan en forma de onda de choque, compuesta por un frente de choque de alta intensidad que se expande desde la superficie del explosivo hacia el aire circundante. A medida que la onda se expande, su intensidad disminuye, su duración se alarga y su velocidad se reduce. Este fenómeno se debe a la divergencia esférica y a que la reacción química se completa, salvo por cierta postcombustión asociada a la mezcla de los productos calientes de la explosión con la atmósfera circundante [4].

Al expandirse la onda en el aire, el frente impacta contra los objetos situados en su trayectoria, y estas quedan envueltas por las presiones de choque. La magnitud y distribución de las fuerzas de la explosión sobre los objetos derivadas de estas presiones, dependen de los siguientes factores: (1) las propiedades del explosivo, es decir, el tipo de material explosivo, la energía liberada (detonación de alto o bajo orden) y el peso del explosivo; (2) la ubicación de la detonación con respecto a las estructuras de protección y (3) la magnitud y el refuerzo de la presión por su interacción con la barrera del terreno o la propia estructura [3]*;* es decir en el caso del factor 1, si se aumenta la cantidad de explosivo se aumenta la presión de choque sobre el objeto; en el caso del factor 2 su efecto es inverso, al aumentar la distancia las presiones de choque disminuyen y por último en el caso del factor 3 tiene un efecto amplificador de las ondas de choque por el rebote de la misma.

De forma general al producirse una explosión al aire libre sin amplificación adicional por efecto de reflexión de la onda, se genera una curva de presión que alcanza un pico de sobrepresión P_{so} por encima de la presión ambiente P_a en un tiempo t_A esta sobrepresión durante un tiempo t_0 se mantiene por encima de la presión ambiente (fase positiva) siguiendo una trayectoria de decaimiento por debajo de la presión

ambiente manteniéndose en presión negativa P_{so}^- con una duración de tiempo t_0^- (fase negativa), como se observa en la Figura 2.

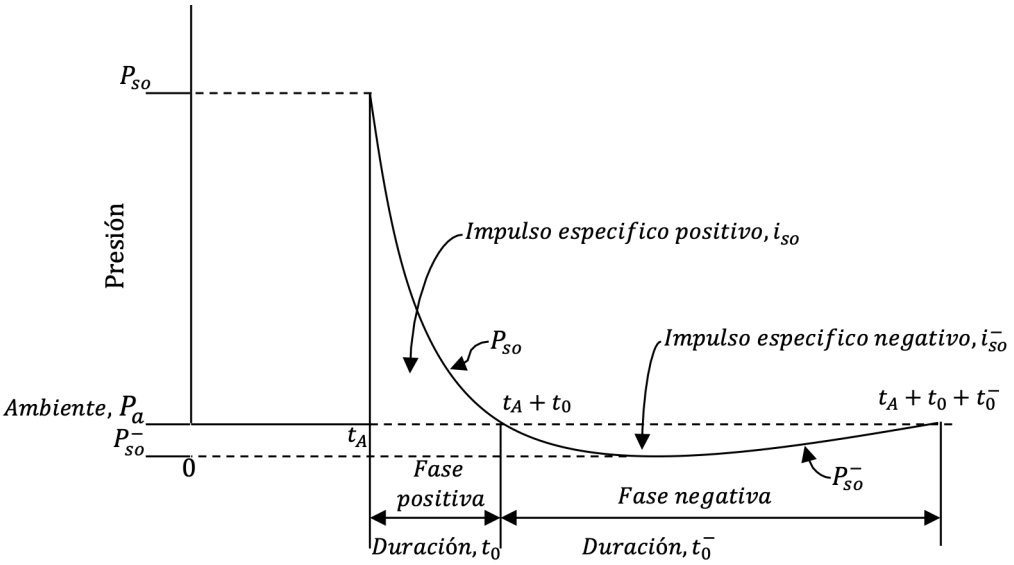


Figura 2. Gráfica del comportamiento de la sobrepresión a lo largo del tiempo (modificada de [3]).

Este pico de sobre presión en el instante t puede describirse mediante la ecuación modificada de Friedlander:

$$P(t) = P_{so} e^{-bt/t_d} \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) \qquad (2\text{-}1)$$

Donde P_{so} es el pico de sobrepresión incidente máxima, t_d es la duración de la fase de presión positiva, y b es un factor de decaimiento.

En el caso de que la onda de presión interactúe con la superficie del suelo o estructura que se encuentre en su trayectoria se producirá una reflexión de la onda, generando que la onda inicial se amplifique con una sobrepresión reflejada mayor al incidente como se ilustra en la Figura 3.

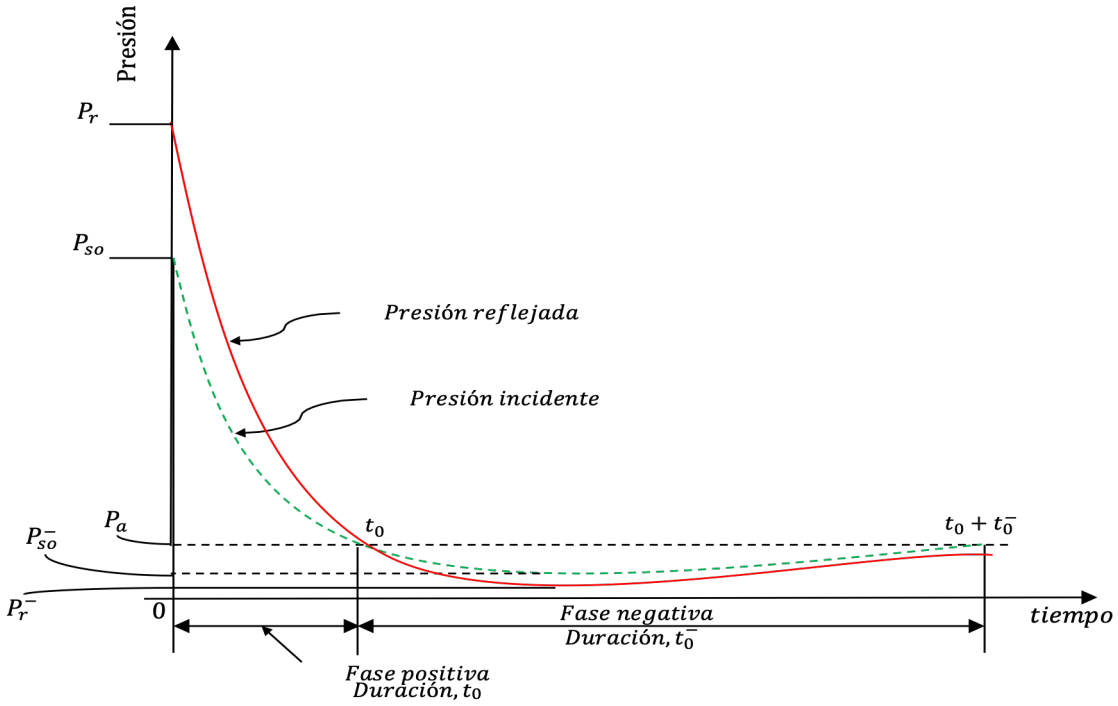


Figura 3. Comparación de las curvas de presión incidente y reflejada [3].

2.2. Interacciones dinámicas frente al entorno

Tomando el contexto de las explosiones que ocurren al aire libre se presenta tres casos en los que las trayectorias de las ondas de choque presentan particularidades.

Caso 1. La explosión se produce por encima de una estructura, produciendo una onda de choque que se propaga lejos del centro de la detonación, incide sin amplificación intermedia de su onda, golpeando la estructura como se representa en la Figura 4.

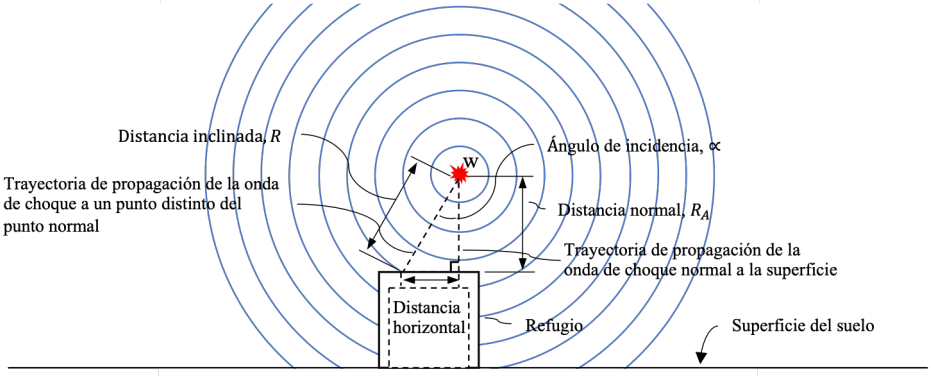


Figura 4. Trayectoria de la onda de choque con origen en aire (modificada de [3]).

Caso 2. La explosión ocurre a una altura por encima de la superficie del suelo generan una onda de choque reflejada producto del rebote de la onda de choque incidente sobre el suelo de modo que la onda reflejada amplifica la onda inicial produciendo un frente de onda mach que estaría incidiendo sobre las estructuras o personas que se encuentren a una distancia horizontal de punto de explosión como se muestra en la Figura 5.

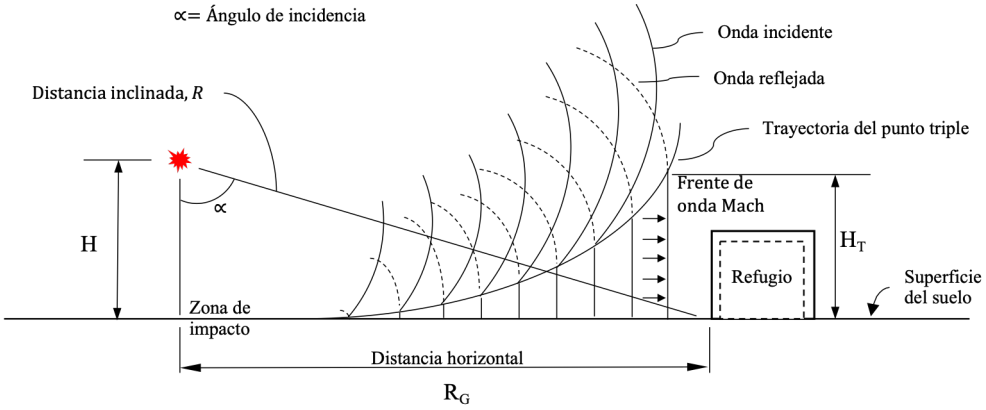


Figura 5. Trayectoria de la onda de choque con origen sobre superficie [3].

Caso 3. La explosión superficial se produce cuando la detonación tiene lugar cerca del suelo o sobre él, de modo que la onda expansiva inicial se amplifica en el punto de detonación debido a las reflexiones del suelo, generando un frente de onda de choque que viaja hasta alcanzar una estructura o persona como se representa en la Figura 6.

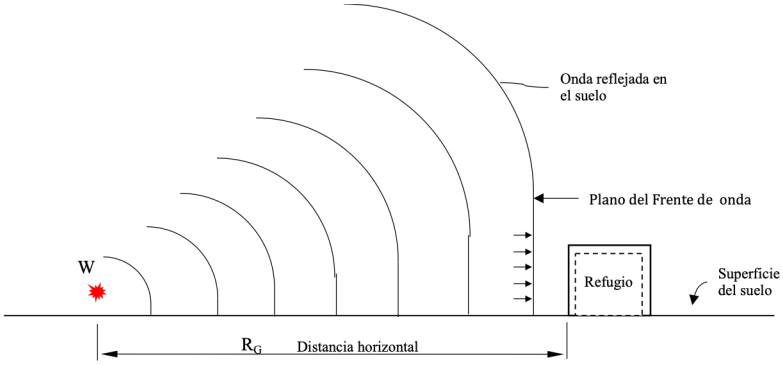


Figura 6. Trayectoria de la onda de choque con origen en superficie [3].

Es importante conocer el contexto de la explosión, debido a que las características de la onda se ven aumentadas entre 2 a 9 veces por acción del rebote de la onda contra una superficie lo cual hace relevante conocer si la explosión ocurre en espacios donde la onda viaja libremente o si se encuentran obstáculos cercanos que puedan amplificar las características de la onda (presión e intensidad).

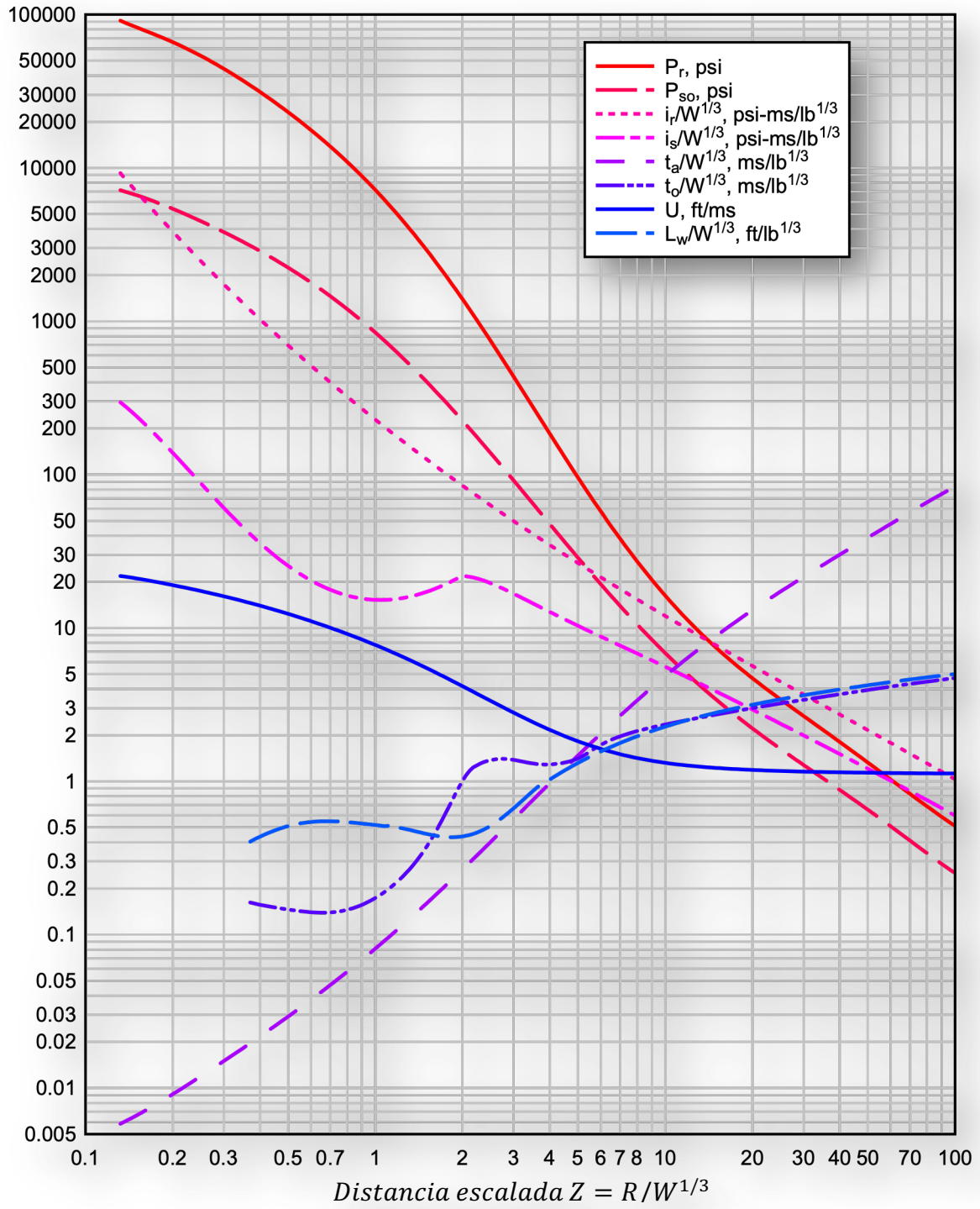


Figura 7. Parámetros de la onda de choque en la fase positiva para una explosión esférica de TNT al aire libre a nivel del mar [3].

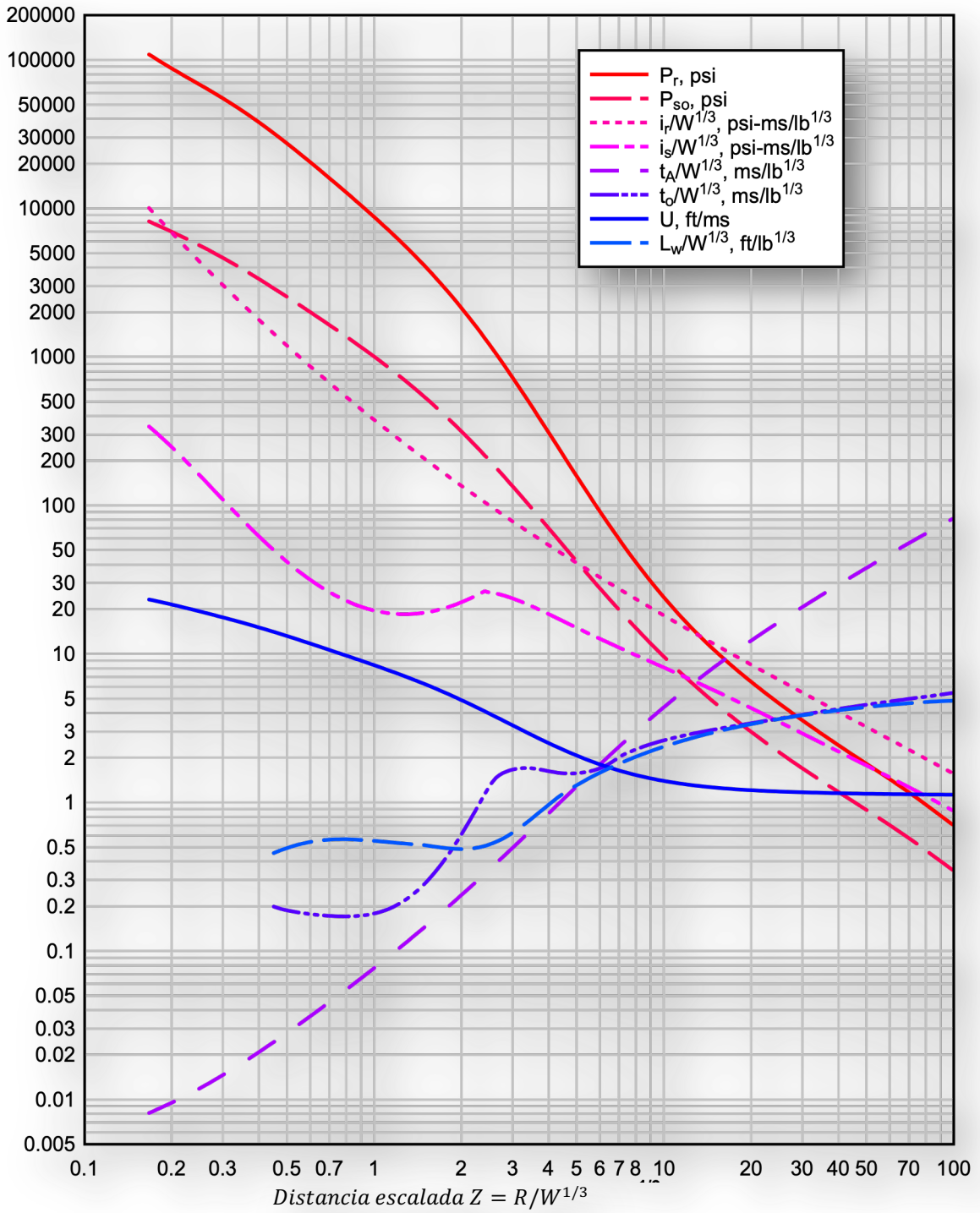


Figura 8. Parámetros de la onda de choque en la fase positiva para una explosión hemisférica de TNT en la superficie a nivel del mar [3].

2.3. Peso equivalente de TNT

Como ya se mencionó la magnitud y distribución de las fuerzas que se ejercen sobre un objeto producto de la presión de choque depende de factores siendo el primero la naturaleza y cantidad de explosivo, lo cual resulta necesario normalizar este factor; por lo cual la mayoría de los datos se refieren a las presiones de explosión generadas por explosivos esféricos de TNT. Estos datos pueden extenderse para incluir otros materiales con potencial de detonación mayor relacionando la energía explosiva de dichos materiales con la de una carga equivalente de TNT.

Los efectos de la energía liberada de una cantidad de material explosivo específico, puede expresarse de manera equivalente a una cantidad de TNT, en función del calor de detonación (energía liberada por la explosión) de los distintos materiales de la siguiente manera [3]:

$$W_E = \frac{H_{EXP}^d}{H_{TNT}^d} W_{EXP} \qquad (2\text{-}2)$$

Donde:
W_E = Peso de la carga equivalente
W_{EXP} = Peso del explosivo específico
H_{EXP}^d = Calor de detonación del explosivo específico
H_{TNT}^d = Calor de detonación del TNT

Otro método para estimar el peso equivalente en TNT tiene que ver con la velocidad de detonación D del explosivo, cuyos fundamentos se basan en los trabajos de Berthelot (1892) y Kinney (1985), tomando como estándar de comparación la $D_{TNT} = 6.95 \frac{km}{s}$ @ $1.64 g/cm^3$ la se tiene la siguiente ecuación [4], [5], [6]:

$$W_E = \frac{D_{EXP}^2}{D_{TNT}^2} W_{EXP} = \frac{D_{EXP}^2}{48.3} W_{EXP} \qquad (2\text{-}3)$$

Donde:
W_E = Peso de la carga equivalente
W_{EXP} = Peso del explosivo específico
D_{EXP} = Velocidad de detonacion del explosivo
D_{TNT} = Velocidad de detonacion del TNT @ $1.64 g/cm^3$

Las gráficas que se incluyen en este trabajo para su correcto uso e interpretación deben ser a partir del peso equivalente del explosivo con el fin de evitar sub-estimaciones de los factores causales (P_{so}, P_r, i_{so}, i_r).

2.4. Mecánica de fragmentación y proyección balística

El estudio de la fragmentación natural se rige primordialmente por la teoría de Distribución de Mott, desarrollada durante la Segunda Guerra Mundial. Mott postuló que el número de fragmentos (ver ecuación 2-4) con una masa mayor a una masa determinada sigue una ley exponencial negativa [7].

$$N_f = \frac{W_c e^{-\left(\frac{\sqrt[2]{m_f}}{M_A}\right)}}{2M_A^2} \tag{2-4}$$

$$M_A = 0.01 B t_c^{5/6} \sqrt[3]{d_i}\left(1 + \frac{t_c}{d_i}\right) \tag{2-5}$$

Donde
W_c = peso de la porción cilíndrica de la carcasa o contenedor (g)
m_f = Peso del fragmento de diseño (g)
M_A = Factor de distribucion de fragmentos ($g^{1/2}$)
B = Constante explosiva de Mott ($kg^{1/2}m^{-7/6}$)
t_c = Espesor promedio de la carcasa (mm)
d_i = Diámetro interior promedio de la carcasa (mm)

Matemáticamente, Mott representó esta población mediante el parámetro de escala μ, que caracteriza la masa media de los fragmentos. Investigaciones contemporáneas han refinado este modelo utilizando la Distribución de Weibull, la cual introduce un parámetro de forma β que describe la uniformidad del proceso de fractura. Un valor cercano a 1 indica fragmentos más uniformes, mientras que un valor de β igual a 0.5, hace que la distribución de Weibull decaiga en una distribución de Mott [8], [9].

$$N(m_f) = \frac{M}{\eta\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)} e^{-\left(\frac{m_f}{\mu}\right)} \tag{2-6}$$

Donde
$N(m_f)$ = número de fragmentos cuya masa es mayor o igual a m_f(g)
M = Peso del proyectil o granada (g)
μ = Factor de escala (g)
β = Parametro de forma
η = Coeficiente de eficiencia de fragmentación
Γ = Función de probabilidad del tamaño de fragmento

El proceso de fragmentación tiene una fuerte dependencia de la microestructura del material. Investigaciones recientes han demostrado que

existe una correlación positiva entre el tamaño de grano del acero y el parámetro de escala μ; a mayor tamaño de grano, los fragmentos resultantes tienden a ser más masivos [8]. Asimismo, la estructura metalográfica altera la resistencia a la fragmentación, invalidando en ocasiones las predicciones puramente geométricas si no se considera la metalurgia [8].

La energía liberada por la sustancia explosiva depende únicamente de su naturaleza química. En el caso de las granadas, esta energía es empleada para producir fragmentos por falla mecánica del contenedor; estos fragmentos son proyectados con distintas trayectorias y distancias debido a la diferencia de geometrías y masas con que se producen. Gurney desarrolló un método para calcular la velocidad de los fragmentos producidos a partir de la carga explosiva. La metodología se basa en un cálculo de balance de energía dentro del sistema de explosivo-contenedor metálico expresado en la siguiente ecuación [10]:

$$V_0 = \sqrt[2]{2E}\left[\frac{1}{\left({}^{W_C}/_{W_E}\right)+\left({}^{n}/_{(n+2)}\right)}\right]^{1/2} \qquad (2\text{-}7)$$

$W_C =$ Peso total de la caja en una longitud determinada; a menudo se toma como una sección cilíndrica.

$W_E =$ Peso del explosivo en una longitud determinada; a menudo tomado como una sección cilíndrica.

${}^{W_C}/_{W_E}$ = Relación entre el peso de la caja y el peso del explosivo.

n = Constante de simetría (n = 1, 2 o 3 para plano, cilíndrico o esférico respectivamente).

$\sqrt[2]{2E}$= Velocidad de Gurney

V_0= Velocidad inicial estimada del fragmento.

El factor $\sqrt[2]{2E}$ es la velocidad de Gurney, que representa la relación de energía máxima del gas de explosión que es transformado en energía cinética por los fragmentos.

Un método para estimar la velocidad de Gurney fue desarrollado por Kamlet y Finger en 1979 [11].

$$\sqrt[2]{2E} = 887\phi^{0.5}\rho_E^{0.4} \qquad (2\text{-}8)$$

$$\phi = NM^{0.5}Q^{0.5} \qquad (2\text{-}9)$$

Donde:

ρ_E = Densidad del explosivo.

N = Número de moles de gas producido por mol de explosivo.

M = El peso molecular promedio de los gases producidos.

Q = El calor de detonacion del explosivo.

Otro método, más simple y potencialmente más preciso, fue desarrollado por Cooper [4], el cual relaciona la velocidad de Gurney con la velocidad de detonación del material explosivo:

$$\sqrt[2]{2E} \approx \frac{D}{2.97} \qquad (2\text{-}10)$$

Donde:
$D =$ Velocidad de detonación.

La velocidad inicial de fragmento en gran medida depende de la naturaleza del explosivo, sin embargo, la trayectoria y velocidad residual también tienen una dependencia con la forma y masa del fragmento, los cuales son influenciados por la resistencia del aire y la gravedad afectando el movimiento del fragmento en vuelo, reduciendo su velocidad inicial. Si se asume un coeficiente de resistencia constante y se ignora la gravedad en las ecuaciones de movimiento, la velocidad del fragmento, en función de la distancia, puede estimarse mediante las fórmulas:

$$V_R = V_0 e^{\left(-\frac{R}{L}\right)} \qquad (2\text{-}11)$$

con

$$L = \frac{2k^{2/3} m_f^{1/3}}{C_d \rho_a} \qquad (2\text{-}12)$$

$$k = \frac{m_f}{A_f^{3/2}} \qquad (2\text{-}13)$$

Donde:
$V_R =$ Velocidad del fragmento a la distancia R $\left(\frac{m}{s}\right)$
$V_0 =$ Velocidad inicial del fragmento $\left(\frac{m}{s}\right)$
$R =$ distancia desde el centro de la detonación al punto de interes (m)
$m_f =$ masa del fragmento (kg)
$C_d =$ coeficiente de arrastre
$\rho_a =$ densidad del aire $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$
$k =$ factor de forma del fragmento o densidad balistica $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$
$A_f =$ área expuesta del fragmento
$L =$ distancia a la que la velocidad de fragmento se reduce e^{-1}de su valor inicial

En la Tabla 2 se presentan valores promedio del coeficiente de arrastre esperadas para cuatro formas de fragmentos idealizadas típicas.

Tabla 2. Valores promedio de coeficiente de arrastre Cd [12].

Forma del fragmento	Cd promedio
Paralepipedos rectangulares alargados aleatorios	1.24
Esférico	0.95
Cubos y cilindro de (L/d)=1	1.13
alambré de (L/d)=3	1.20

L=longitud, d=diámetro

La complejidad de los procesos de fragmentación natural tiene como consecuencia tener poco control y predictibilidad de los efectos de las granadas, lo que ha llevado a que se desarrollen modelos con fragmentos preformados logrando con ello un control del tamaño, peso y geometría de estos.

2.5. La regla de los 79 J y la distancia máxima de fragmento peligroso (DMFP)

Un fragmento peligroso se define convencionalmente en los estándares de seguridad militar del Departamento de Defensa (DoD) de Estados Unidos y de la OTAN, como aquel proyectil o esquirla que alcanza su objetivo con una energía cinética de impacto igual o superior a 79 J [13]. Adicionalmente, para las evaluaciones de riesgo y establecimiento de distancias seguras, se considera que existe un peligro inaceptable para población civil cuando la densidad de fragmentos supera el límite de un impacto por cada 55.7 m^2.

El alcance de los fragmentos peligrosos (DFP) para una densidad de fragmentos determinada, se calcula mediante el modelo probabilístico de distribución de fragmentos descritos en la norma de almacenamiento y transporte de municiones de los aliados publicación 1 (AASTP-1) [14], como la distancia entre el origen del fragmento a un área de 55.7 m^2 donde se encuentra una persona promedio aproximadamente 1.82 m de altura por 0.3 m de ancho. Un fragmento por cada 55.7 m^2 tiene una probabilidad aproximadamente de un 1% de impactar sobre una persona promedio (Figura 9) [13].

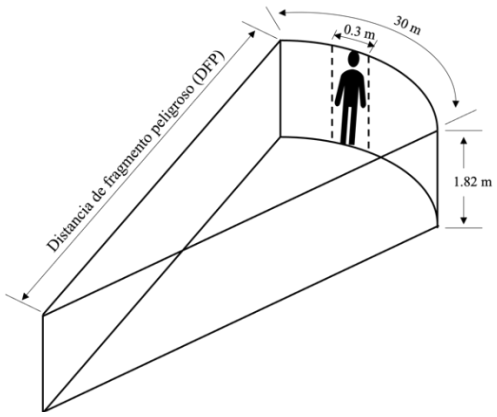


Figura 9. Distancia de fragmento peligroso (DFP) (modificada de [3]).

El cálculo de la probabilidad de que una persona promedio sea alcanzada por un fragmento peligroso es un proceso iterativo que comprende el cálculo de la velocidad inicial de fragmento, el peso máximo de fragmento, el peso de fragmento promedio y el número total de fragmentos producidos.

La energía cinética E_c en el momento del impacto de un fragmento peligroso es como se mencionó de 79 J. Las ecuaciones calculan la energía de impacto de un fragmento que viaja por el aire a una velocidad específica que en cuyo caso al momento de impacto será la velocidad residual V_R.

$$E_c = 0.5 m_f V_R^2 \qquad (2\text{-}14)$$

Tomando la ecuación (2-11) se tiene que la Ec es igual:

$$E_c = 0.5 m_f V_o^2 e^{-\left(\frac{2R}{L}\right)} \qquad (2\text{-}15)$$

Suponiendo una distribución de Mott para el número de fragmentos en relación con la masa, la densidad espacial q de fragmentos de masa individual mayor que m_f, a una distancia R, viene dada por:

$$q(R) = \frac{N_T}{4R^2} e^{-\sqrt{\frac{2m_f}{m_o}}} \qquad (2\text{-}16)$$

Donde:
$q(R)$ = densidad espacial de fragmentos
N_T = número total de fragmentos
R = distancia de interes
m_f = masa de fragmento
m_o = masa de fragmento promedio

La probabilidad de impacto no es una medida determinista, sino un proceso aleatorio modelado predominantemente mediante la distribución de Poisson. Se asume que los fragmentos se lanzan con una distribución angular uniforme y que cada impacto en el blanco es un evento independiente. De acuerdo con el modelo de Poisson, la probabilidad de que n impactos ocurra es igual a:

$$P_h(n) = \frac{e^{-\lambda}\lambda^n}{n!} \qquad (2\text{-}17)$$

Donde
P_h = probabilidad de impacto
n = número de impactos
$\lambda = q(R)A_T$, tasa media de impactos

Sin embargo, para el diseño de municiones, el interés radica en la probabilidad de recibir al menos uno ($n \geq 1$), calculada como el complemento de la probabilidad de cero impactos:

$$P_h(n \geq 1) = \big(1 - P_h(n = 0)\big) = (1 - e^{-\lambda}) \qquad (2\text{-}18)$$

La DFP resulta de la iteración de la probabilidad de impacto si $P_h > 0.01$ (1%), se incrementa la distancia (R); si $P_h < 0.01$ (1%), se reduce la distancia. El valor final de la DFP se alcanza cuando la probabilidad de impacto es exactamente del 1%, lo que equivale a la densidad crítica de 1 fragmento/55.7 m^2 [3], [15].

La Distancia Máxima de Fragmento Peligroso (DMFP) representa el límite físico superior del alcance de un fragmento generado por la desintegración de un contenedor metálica bajo cargas de choque por un explosivo. A diferencia de la Distancia de Fragmento Peligroso (DFP), que se basa en un criterio de densidad espacial y probabilidad de impacto del 1%, la DMFP es un valor determinista derivado de un análisis de trayectoria basado en la física del fragmento más capaz o "peor caso" [13], [16].

Para determinar la DMFP es necesario integrar el modelo de Gurney para la energía inicial, el modelo de distribución de masa de fragmentos de Mott, así como, la cinemática del vuelo de fragmentos en el aire. Dicha integración resulta en un proceso interactivo de la capacidad balística del fragmento de máximo peso buscando el límite físico donde la densidad de fragmentos se vuelve 0 (cero), definiendo la distancia donde cesa la amenaza de daño por fragmentos [13].

En ausencia de datos experimentales detallados, se emplean modelos log-lineales derivados del análisis de bases de datos de municiones reales. Para municiones de fragmentación estándar, la DMFP puede estimarse en función del peso explosivo neto (W_E).

$$DMFP = \mathrm{e}^{[6.421256 + \{0.210793 * \ln(W_E)\} - \{0.005158 * (\ln(W_E))2\}]} \qquad (2\text{-}19)$$

Los métodos descritos anteriormente para calcular tanto la DFP como la $DMFP$ se aplican a granadas de fragmentación natural con contenedores cilíndricos cargados de explosivo de alta potencia. Existen muchas municiones fabricadas de forma que el contenedor se fragmenta en fragmentos preformados. Estos fragmentos pueden formarse mediante el estampado de un patrón en el material del contenedor. El tamaño de estos fragmentos es uniforme, determinado por el patrón de perforación. Si la munición se fragmenta según lo previsto (es decir, en fragmentos preformados individuales en lugar de múltiples fragmentos unidos), el peso del fragmento puede calcularse en función de su tamaño.

La velocidad inicial del fragmento preformado puede estimarse mediante la Ecuación 2-1, calculando el peso del casquillo a partir del espesor más delgado (zona de perforación/estampado).

La metodología para calcular el DFP descrita anteriormente está diseñada para usarse con granadas de fragmentación natural. Esta metodología se basa en granadas que producen fragmentos con una distribución de Mott. Las granadas de fragmentación preformadas no producen una distribución de Mott de tamaños de fragmentos, ya que, teóricamente, todos los fragmentos preformados tienen el mismo tamaño. Esta metodología para calcular la DFP se ha adaptado para su uso con granadas de fragmentos preformados.

Para fragmentos preformados $m_f = m_o$ con lo cual la densidad espacial de fragmentos es $q(R) = 0.243\frac{N_T}{4R^2}$ por lo que la probabilidad de impacto es:

$$P_h(R) = 1 - e^{-0.03521\frac{N_T}{R^2}} \qquad (2\text{-}20)$$

Resolviendo para R, a partir de la probabilidad objetivo del 1% ($P_h = 0.01$):

$$R = DFP = 1.872\sqrt{N_T} \qquad (2\text{-}21)$$

2.6. Biomecánica del trauma por explosión y criterios de letalidad

El estudio de la biomecánica del trauma por explosión se fundamenta en la cuantificación de la transferencia de energía entre el frente de onda (o proyectiles) y los tejidos biológicos. Para el diseño de sistemas de armamento modular, es imperativo desglosar estos efectos en mecanismos primarios, secundarios y terciarios, utilizando modelos estadísticos como el método Probit para establecer criterios de letalidad precisos [15].

2.6.1. Mecanismo primario: sobrepresión por onda de choque

El mecanismo primario de daño se define estrictamente como la interacción directa de la onda de choque (sobrepresión) generada por la detonación con el cuerpo humano. A diferencia de otros mecanismos, este daño es el resultado de la transmisión de una fuerza externa masiva debida a un diferencial de presión extremo que actúa en una escala de milisegundos.

La detonación genera un aumento casi instantáneo desde la presión ambiente hasta una sobrepresión máxima incidente (P_{so}), creando un frente de choque que se desplaza radialmente a velocidades supersónicas. Esta fuerza provoca una aceleración

rápida de la pared corporal y genera ondas de estrés de alta frecuencia que se propagan a través de los tejidos subyacentes. La magnitud del daño depende de la presión pico, el impulso (el área bajo la curva de presión-tiempo), la duración de la fase positiva y la orientación del individuo respecto al frente de choque.

Los sistemas orgánicos más susceptibles son aquellos que presentan interfases entre tejidos de diferentes densidades, particularmente los órganos que contienen aire.

- Aparato Respiratorio (Pulmones): Es considerado el órgano crítico en lesiones por presión. La onda de choque provoca el colapso y la posterior reexpansión violenta de los alvéolos, lo que puede causar hemorragia pulmonar, edema y la liberación de burbujas de aire en el sistema vascular (embolia gaseosa), siendo esta última la causa principal de muerte inmediata.

- Sistema Auditivo (Tímpanos): El oído es incapaz de responder fielmente a pulsos de presión con duraciones menores a 0.3 ms, lo que resulta en una excursión mecánica única que rompe la membrana timpánica.

- Tracto Gastrointestinal y Otros: Puede ocurrir hemorragia y perforación abdominal, así como rotura del globo ocular y conmociones cerebrales debidas a la transmisión de la onda de choque.

La Tabla 3 muestra los umbrales para diferentes tipos de daños a órganos específicos por acción de parámetros físicos:

Tabla 3. Umbrales de daño y letalidad para órganos específicos.

Órgano/Sistema Crítico	Tipo de Daño / Nivel	Parámetro Físico	Umbral / Valor	Referencia
Sistema Auditivo (Tímpano)	Umbral de Ruptura	Sobrepresión (*Ps*o o Pr)	0.345 bar	[3], [16]
	Ruptura (50% Prob.)	Sobrepresión (*Ps*o o Pr)	1.034 bar	
	Ruptura (95% Prob.)	Sobrepresión (*Ps*o o Pr)	1 bar	
	Pérdida Temporal (TTS)	Sobrepresión (*Ps*o o Pr)	$<$ 0.345 bar	[15]
Sistema Respiratorio (Pulmón)	Hemorragia (Umbral)	Sobrepresión (*Ps*o o Pr)	2.068 - 2.757 bar	
	Hemorragia Severa	Sobrepresión (*Ps*o o Pr)	$>$ 5.516 bar	
	Letalidad (Umbral)	Sobrepresión (*Ps*o o Pr)	6.895 - 8.274 bar	[12], [16]
	Letalidad (50% Prob.)	Sobrepresión (*Ps*o o Pr)	8.963 - 12.411 bar	
	Letalidad (99% Prob.)	Sobrepresión (*Ps*o o Pr)	13.789 - 17.237 bar	
Abdomen/Tórax (Impacto Secundario)	Perforación de Piel	Energía Cinética (Ec)	6.780 - 16.091 J	
	Lesión Grave (Tórax)	Energía Cinética (Ec)	3.390 - 13.558 J	[15], [17]
	Lesión Grave (Abdomen)	Energía Cinética (Ec)	6.780 - 12.202 J	
	Letalidad (Metralla)	Energía Cinética (Ec)	79 J	
Cráneo / Cabeza	Fractura (Umbral)	Velocidad Impacto	4 m/s	
	Fractura (50% Prob.)	Velocidad Impacto	5.5 m/s	[12], [18]
	Fractura (99% Prob.)	Velocidad Impacto	7 m/s	
	Lesión por Fragmento	Energía Cinética (Ec)	16.270 - 21.693 J	
Cuerpo Completo	Letalidad (Umbral)	Velocidad Impacto	6.4 m/s	
	Letalidad (50% Prob.)	Velocidad Impacto	16.5 m/s	[15], [19]
	Letalidad (99% Prob.)	Velocidad Impacto	42 m/s	

2.6.2. Mecanismo secundario: balística de fragmentos

El mecanismo secundario de daño se define como el conjunto de lesiones traumáticas producidas por el impacto físico de proyectiles o esquirlas sobre el cuerpo humano. A diferencia del daño primario, que es una lesión por sobre presión, el daño secundario es un proceso de transferencia de energía cinética mediado por fragmentos [14].

Para que un fragmento sea una amenaza real, debe cumplir con criterios energéticos específicos:

- La Regla de los 79 J: Un fragmento se clasifica técnicamente como "peligroso" cuando su energía cinética de impacto ($E_c = 0.5 m_f V^2$) es igual o superior a 79 J.

- Tipos de Trauma: Los impactos pueden generar traumas penetrantes (perforación de tejidos vitales u órganos) o traumas contusos (daño por impacto de masa sin penetración).

- Umbral de Penetración (V_{50})**:** Se define como la velocidad a la cual existe un 50% de probabilidad de que un proyectil perfore la piel humana. En el modelo de Lewis, se considera que, si ocurre la perforación cutánea, la velocidad residual suele ser suficiente para causar heridas graves en órganos subyacentes o fracturas óseas.

La efectividad del daño secundario no es absoluta, sino que es una probabilidad condicional dividida en dos etapas:

- Probabilidad de Impacto (P_h): Basada en la distribución de Poisson, calcula la probabilidad de que al menos un fragmento alcance el área proyectada del blanco (estandarizada en 0.58 m^2). Depende de la densidad espacial de fragmentos (q), la cual disminuye con el cuadrado de la distancia (R).

- Probabilidad de Incapacitación dado el Impacto (P_{frag}): Una vez que el blanco es alcanzado, esta probabilidad evalúa si la energía del fragmento es suficiente para neutralizar al objetivo según las funciones Probit o modelos logísticos.

2.6.3. Mecanismo terciario: desplazamiento del cuerpo

El mecanismo terciario de daño se define como el conjunto de lesiones traumáticas resultantes del desplazamiento físico del cuerpo humano inducido por la explosión y su posterior colisión contra superficies u objetos rígidos. A diferencia de los mecanismos primario (presión) y secundario (fragmentos), el daño terciario es un fenómeno de

transferencia de energía cinética donde el cuerpo entero actúa como un proyectil tras ser acelerado por la onda de choque. Este daño se desarticula en dos fases cinemáticas:

- Fase de Aceleración: La interacción de la sobrepresión y el impulso con la superficie corporal "levanta" al individuo en la dirección de propagación de la onda. La magnitud de la velocidad impartida depende de la masa de la persona y de la combinación de la sobrepresión incidente (P_{so}) e impulso específico (i_i).

- Fase de Desaceleración (Impacto): Es la fase donde ocurre la mayor mortalidad resultado de la colisión del cuerpo contra obstáculos (suelo, paredes, estructuras) o por el vuelco y deslizamiento sobre superficies rugosas. La severidad depende de la velocidad de impacto, el área del cuerpo involucrada, el tiempo de desaceleración y la rigidez de la superficie impactada.

Se distinguen dos regiones anatómica criterios de impacto que pueden causar la muerte de la persona:

- Impacto Craneal (Fractura de Cráneo): Es el evento más crítico del mecanismo terciario. Se estima que una velocidad de impacto de 3 m/s es generalmente segura. Sin embargo, la probabilidad de fractura de cráneo alcanza el 50% a los 5.5 m/s y llega a niveles cercanos al 100% a los 7 m/s.

- Impacto de Cuerpo Completo: Presenta umbrales de tolerancia más elevados debido a la mayor capacidad de absorción de energía de las estructuras musculoesqueléticas. Una probabilidad de letalidad del 50% por impacto de cuerpo completo se espera a una velocidad de 16.5 m/s.

2.7. Modelos de vulnerabilidad: método Probit

Los modelos de vulnerabilidad son modelos analíticos indispensable para transitar desde la cuantificación de estímulos físicos hacia la determinación de consecuencias reales en las personas y edificios expuestos; estos modelos actúan como funciones de transferencia, que permiten predecir la efectividad de un arma al relacionar la magnitud de una amenaza física con la probabilidad de que un blanco identificado sea vencido o incapacitado.

Estos modelos de vulnerabilidad son necesarios porque una simulación de explosión (como campos de presión o velocidades de partículas) no describe por sí mismo el nivel de lesión humana; requieren un paso intermedio basado en datos biomecánicos experimentales. Además de que permiten desglosar la amenaza en los mecanismos de daño primario (presión), secundario (fragmentos) y terciario (desplazamiento), cuantificando el riesgo tanto para personas como para infraestructuras.

Dentro de los modelos de vulnerabilidad se destaca el método Probit, que es un método estadístico que conecta probabilísticamente un "factor causal" (magnitud de la explosión) con una "consecuencia" específica (muerte o lesión).

El método parte de la hipótesis de que la tolerancia a las lesiones en una población se distribuye siguiendo una ley logarítmica-normal. Esto implica que, al graficar el logaritmo de la intensidad del estímulo frente a la proporción de afectados, se obtiene una curva sigmoidal.

Este modelo de vulnerabilidad se basa en una función matemática lineal de carácter empírico extraída de estudios experimentales:

$$P_p = a + b \ln(\Omega) \qquad (2\text{-}22)$$

donde:
P_p = función de probabilidad de daño.
a = Constante dependiente del tipo de lesión y tipo de carga de exposición.
b = Constante dependiente del tipo de carga de exposición.
Ω = Variable que representa la carga de exposición.

El valor de la función "Probit" permite determinar el porcentaje de la población expuesta y/o el nivel de lesiones o muerte por una carga de exposición determinada, la Tabla 4 muestra los valores de probabilidad de incidencia de acuerdo con el valor de la función.

Tabla 4. Equivalencia entre valores "Probit" y porcentaje de población afectada [19].

Pp	%	Pp	%	Pp	%	Pp	%	Pp	%	Pp	%	Pp	%	Pp	%	Pp	%	Pp	%	Pp	%
0	0	3.72	10	4.16	20	4.48	30	4.75	40	5.00	50	5.25	60	5.52	70	5.84	80	6.28	90	7.33	99.0
2.67	1	3.77	11	4.19	21	4.50	31	4.77	41	5.03	51	5.28	61	5.55	71	5.88	81	6.34	91	7.37	99.1
2.95	2	3.82	12	4.23	22	4.53	32	4.80	42	5.05	52	5.31	62	5.58	72	5.92	82	6.41	92	7.41	99.2
3.12	3	3.87	13	4.26	23	4.56	33	4.82	43	5.08	53	5.33	63	5.61	73	5.96	83	6.48	93	7.46	99.3
3.25	4	3.92	14	4.29	24	4.59	34	4.85	44	5.10	54	5.36	64	5.64	74	5.99	84	6.55	94	7.51	99.4
3.36	5	3.96	15	4.33	25	4.61	35	4.87	45	5.13	55	5.39	65	5.67	75	6.04	85	6.64	95	7.58	99.5
3.45	6	4.01	16	4.36	26	4.64	36	4.90	46	5.15	56	5.41	66	5.71	76	6.08	86	6.75	96	7.65	99.6
3.52	7	4.05	17	4.39	27	4.67	37	4.92	47	5.18	57	5.44	67	5.74	77	6.13	87	6.88	97	7.75	99.7
3.59	8	4.08	18	4.42	28	4.69	38	4.95	48	5.20	58	5.47	68	5.77	78	6.18	88	7.05	98	7.88	99.8
3.66	9	4.12	19	4.45	29	4.72	39	4.97	49	5.23	59	5.50	69	5.81	79	6.23	89	7.33	99	8.09	99.9

2.7.1. Modelos Probit para el mecanismo primario de daño.

Se refiere a la interacción directa del diferencial de presión con tejidos corporales, afectando principalmente órganos que contienen aire.

a) Muerte por Hemorragia Pulmonar: Es el criterio principal de letalidad por sobrepresión. La variable causal es la sobrepresión incidente máxima (P) en Newtons por metro cuadrado ($\mathrm{N/m^2}$).

$$P_p = -77.1 + 6.91 \ln(P) \qquad (2\text{-}23)$$

donde

P = sobrepresión máxima $\left(\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m^2}}\right)$

b) Rotura de Tímpano: Es el indicador de daño de mayor radio, esencial para definir zonas de aturdimiento.

$$P_p = -15.6 + 1.93 \ln(P) \qquad (2\text{-}24)$$

donde

P = sobrepresión máxima $\left(\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m^2}}\right)$

También se han modelado la probabilidad de daño por el mecanismo primario mediante curvas de iso-daño de Bowen (1968), las cuales relacionan presión pico y duración del impulso para predecir la mortalidad en sujetos de 70kg (ver Figura 10 y Figura 11).

2.7.2. Modelos Probit para el mecanismo secundario de daño.

Este mecanismo cuantifica la probabilidad de incapacitación dado un impacto (P_h). El factor causal combina la masa del fragmento (m_f), su velocidad residual (V_R) y el área presentada (A).

a) Perforación de la piel (modelo de Gilbert)

$$P_p = -17.0 + 1.535 \ln\left(\frac{10 m_f V_R^2}{A}\right) \qquad (2\text{-}25)$$

b) Letalidad por fragmentos ligeros ($0.001 \leq m_f \leq 0.1\ kg$).

$$P_p = -29.15 + 2.10 \ln\left(m_f V_R^{5.115}\right) \qquad (2\text{-}26)$$

c) Letalidad por fragmentos pesados ($0.1 \leq m_f \leq 4.5\ kg$).

$$P_p = -17.56 + 5.30 \ln\left(0.5 m_f V_R^2\right) \qquad (2\text{-}27)$$

2.7.3. Modelos Probit para el mecanismo terciario de daño.

Resulta de la aceleración del cuerpo por la explosión y su colisión posterior contra superficies rígidas. La variable causal suele ser el impulso específico (J) o la velocidad de impacto (V_R) .

a) Muerte por Desplazamiento y Colisión

$$P_p = -46.1 + 4.82 \ln(J) \qquad (2\text{-}28)$$
$$P_p = -2.14 + 2.54 \ln(\mathrm{V_R}) \qquad (2\text{-}29)$$

donde

J = impulso originado por la sobrepresión durante el tiempo de actuación $\left(\frac{\mathrm{N*s}}{\mathrm{m^2}}\right)$

$\mathrm{V_R}$ = Velocidad de impacto o residual $\left(\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)$

b) Lesiones Graves por Impacto: Crucial para evaluar incapacitación no letal.

$$P_p = 39.1 + 4.45 \ln(J) \qquad (2\text{-}30)$$

donde

J = impulso $\left(\frac{\mathrm{N*s}}{\mathrm{m^2}}\right)$

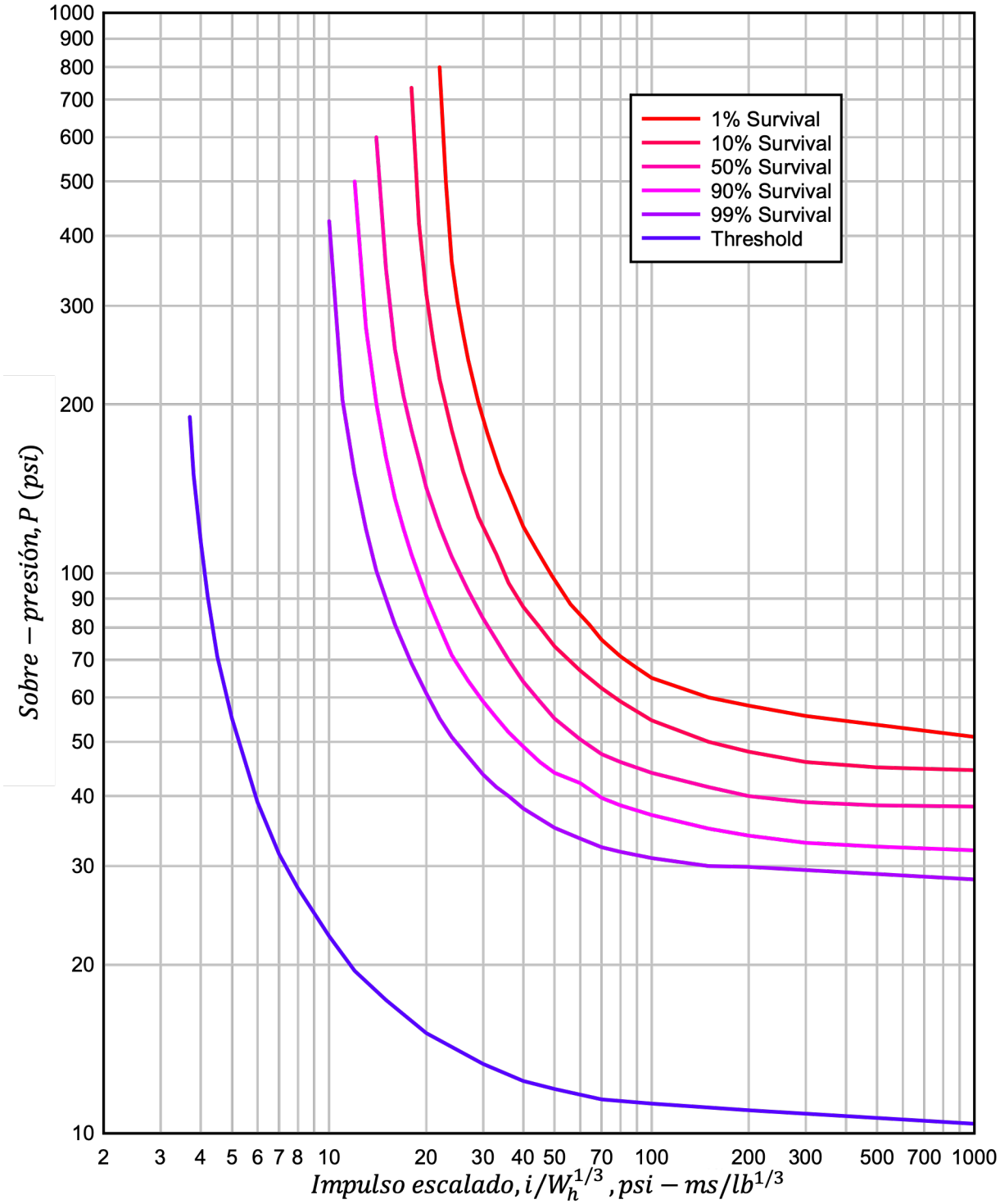


Figura 10. Curvas de supervivencia para daño pulmonar, W_h = peso del ser humano (libras) [3].

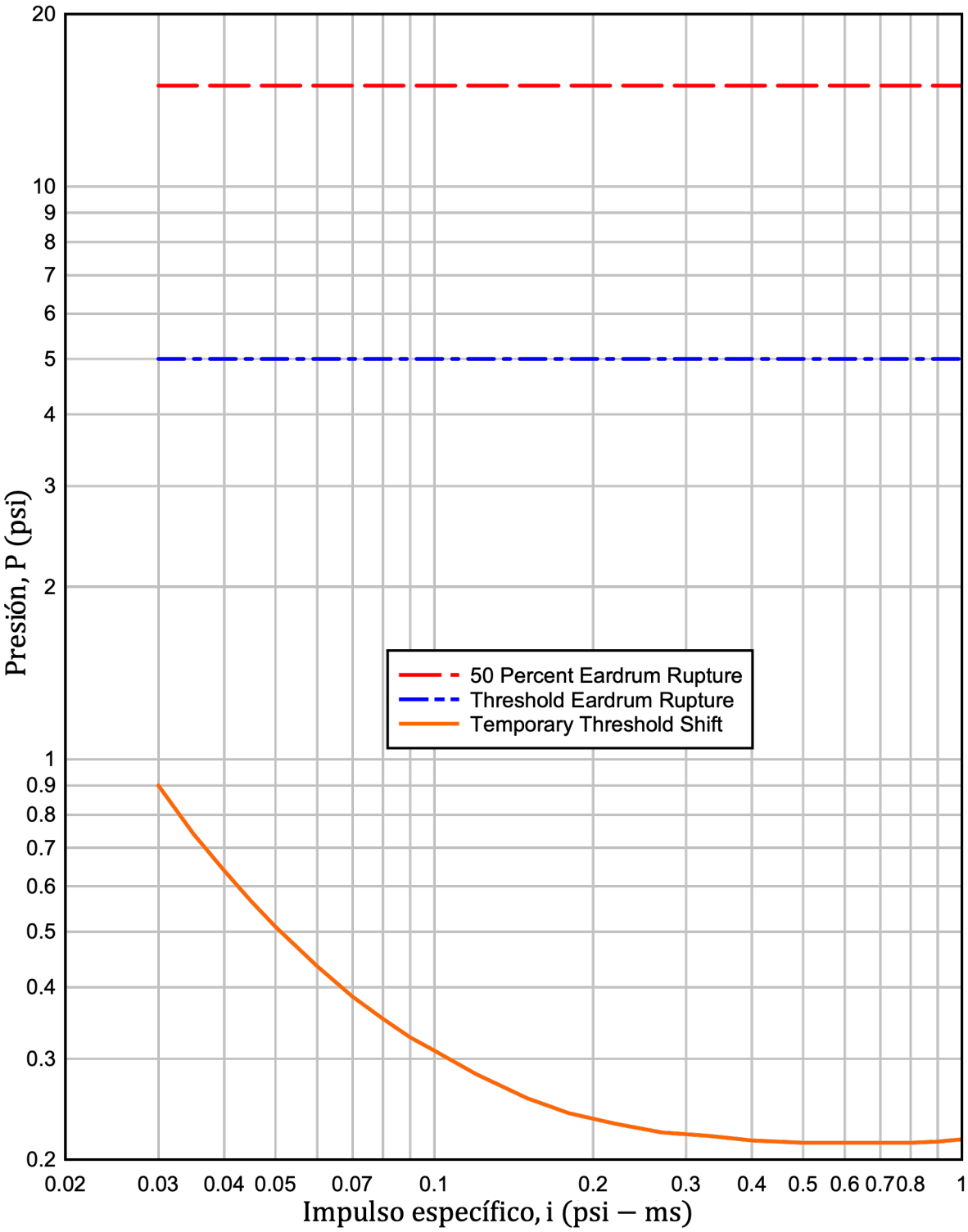


Figura 11. Daños en el oído humano debido a la presión de la explosión [3].

Capítulo 3.

Estado del arte y de la técnica

Este capítulo presenta una revisión exhaustiva del panorama tecnológico de las patentes de las granadas de mano; con el fin de identificar las nuevas tendencias y los dispositivos que ofrecen configurabilidad en los daños ya que eso es imperativo para hacer efectivo la gradualidad del daño que puede producir una granada constituyendo la base arquitectónica necesaria para respaldar el modelo del sistema FUGRAD.

La estrategia de búsqueda se dividió en dos partes; 1) obtención de patentes y 2) obtención de literatura científica, en ambos casos, la disposición de palabras clave y operadores booleanos fueron Damage index (DI), Explosive Grenade (EG), Hope of Survival (HOS), Dangerous Fragment (DF), Shock Wave (SW), se seleccionó un período de búsqueda de 5 años, es decir, de 2020 a 2025 como primer filtro (Filtro_1), posteriormente los datos obtenidos fueron procesados para su análisis.

3.1. Estudio patentométrico de dispositivos explosivos con gradualidad

Se utilizaron cinco buscadores por lo que respecta a las patentes (Derwent Innovation, Espacenet, Google Patents, Patentscope y The Lens), en los que se aplicó la disposición de palabras clave y operadores booleanos mencionados en el párrafo anterior, así como el Filtro_1 relacionado con el período de tiempo de la búsqueda de 5 años. Del registro se obtuvo la clasificación internacional de patentes (IPC) para el registro de estos dispositivos siendo F42B27/00 que pertenece a la sección de Ingeniería mecánica, municiones y voladuras.

Finalmente se integraron los resultados de todas las bases de datos en una sola, se aplicaron los filtros antes mencionados, se analizaron individualmente las patentes restantes, se agruparon los motores de búsqueda dándole prioridad a aquellas bases de datos cuya información se adaptara a los fines de esta investigación quedando de la siguiente manera: Derwent analytics (24 resultados), Espacenet (12 resultados), Google patents (20 resultados), Patentscope (18 resultados), The Lens (21 resultados) para un total de 95 patentes directamente relacionadas con granadas de fragmentación.

El análisis de los datos de propiedad intelectual, se identifican los principales organizaciones y países que lideran la innovación tecnológica en el ámbito de granadas y sistemas de lanzamiento, la Tabla 5 se muestra las organizaciones y países más relevantes.

Tabla 5. Organizaciones con mayor registro de patente.

Organización	Jurisdicción Principal
SAAB AB	Suecia (SE)
BAE Systems Bofors AB	Suecia (SE) / Reino Unido (GB)
US Navy (DoN)	Estados Unidos (US)
Ceska Zbrojovka AS	República Checa (CZ)
Thor Ind Ltd	Reino Unido (GB)
Transarmory Ltd / Transmobil OOD	Bulgaria (BG)
Liberty Dynamic LLC	Estados Unidos (US)
US Army (DoD)	Estados Unidos (US)
PLA (Unidad 63856)	China (CN)

Los países donde las empresas han lidereado la innovación tecnológica de armamento presentan áreas de especialización que se observan en la Tabla 6.

Tabla 6. Fortaleza del área tecnológica diferenciadora por país.

País	Fortaleza tecnológica
Estados Unidos (US)	Materiales balísticos y desarrollo de ojivas de geometría compleja, con un enfoque agresivo en la integración de electrónica de seguridad.
Suecia (SE/WO)	Sistemas de fragmentación de precisión y métodos tácticos de rebote cinético.
China (CN)	Metodologías avanzadas de evaluación de poder destructivo y pruebas de fragmentación para munición de infantería de pequeño calibre.
Bulgaria (BG)	Sistemas de lanzamiento silenciosos y mecanismos de iniciación axial-cumulativa para maximizar la penetración.
Reino Unido (GB)	Uso de estructuras de celosía (lattice) para el control mecánico de la fragmentación en armas de impacto.
República Checa (CZ)	Sistemas de fijación mecánica para lanzagranadas de alta fiabilidad.

Los inventores más relevantes de acuerdo con el registro de las patentes seleccionadas y que forman parte de las organizaciones y países con avances en el tema de armamento adaptable, la Tabla 7 presenta las áreas de conocimiento en que se especializan, así como, la empresa en que desarrollan sus innovaciones.

Tabla 7. Inventores más relevantes en el diseño de granadas.

Inventores	Empresa	Area de conocimiento
Johnny Vestlund Christer Thuman	SAAB BAE Systems Bofors AB	Especialistas en balística terminal y métodos de fijación de proyectiles preformados mediante encogimiento termoplástico (thermoplastic shrinkage) para optimizar la integridad de la warhead.
Josef Zahora Vladimir Simek	Ceska Zbrojovka	Innovadores en la mecánica de lanzadores, centrados en sistemas de cañón deslizable sobre rieles guía para plataformas de alta cadencia.
William McNicholas	US Navy	Experto en geometrías de fragmentación para warheads de copa estirada con domo (drawn cup warheads with a dome) mediante patrones hexagonales de alta precisión.
Stancho Petkov	Transarmory/Transmobil	Pionero en sistemas de iniciación axial-cumulativa y complejos de lanzamiento universales con acústica reducida.

Del conjunto de patentes analizadas se tomaron cuatro (ver Tabla 8) que permiten observar de forma clara la evolución tecnológica en el diseño de las granadas pasando de la potencia bruta hacia la precisión del daño.

Tabla 8. Patentes relevantes y su evolución tecnológica.

Solicitante	Número de patente/ Publicación	Titulo	Fecha de Publicación
Rheinmetall Waffe Munition GmbH	US 8,136,437 B2	Multi-purpose modular hand grenade. [20]	20/03/2012
BAE Systems Bofors AB	WO 2022/245264 A1	Method for fastening preformed projectiles to a warhead. [21]	01/12/2022
SAAB AB	US 2024/0035790 A1	Warhead with molded casing and integrated metal elements. [22]	01/02/2024
U.S. Navy	US 2024/0044623 A1	Fragmentation pattern, optimized for drawn cups warheads with a dome and cylindrical wall. [23]	08/02/2024

La patente Rheinmetall, US 8,136,437 B2 [20], marca el fin de la granada de propósito único. El salto tecnológico consiste en la desvinculación de la espoleta del cuerpo de carga, permitiendo una arquitectura de "bloques de construcción". constituyendo el paso de modelos de daño estáticos a modelos dinámicos.

En la patente de SAAB, US 2024/0035790 A1 [22], el avance aquí es la eliminación de las tolerancias de aire mediante el moldeo integral. En términos de balística terminal, esto reduce la pérdida de energía por expansión de gases en huecos estructurales.

La patente de BAE Systems Bofors AB, WO 2022/245264 [21] resuelve el conflicto entre peso estructural y velocidad de fragmento. El uso de termo-encogimiento permite que la carcasa sea extremadamente delgada pero

mecánicamente robusta. El salto tecnológico es la maximización de la transferencia de energía cinética.

Por último la patente de US Navy, US 2024/0044623 A1 [23] , el salto tecnológico es la compensación metalúrgica de la deformación. Al pre-distorsionar los relieves hexagonales, esto convierte una variable aleatoria (la forma de la metralla) en una constante de geométrica.

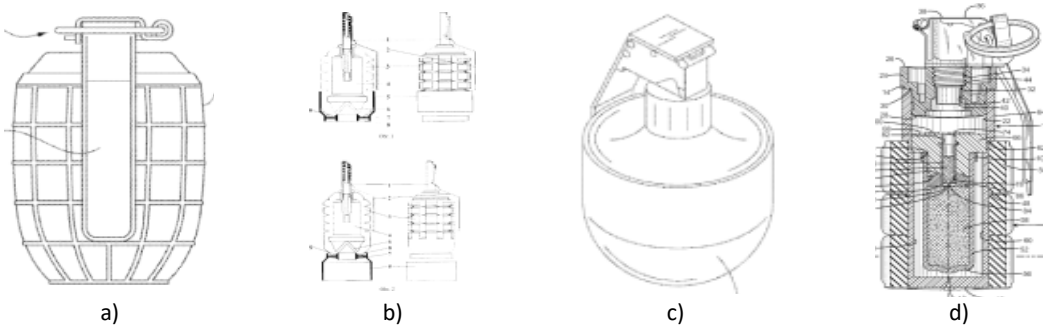
Por lo cual la tendencia tecnológica paso de una modularidad física a una geometría predictiva buscando tener control sobre la precisión de los daños que se producen, en la Tabla 9 se muestra este cambio tecnológico.

Tabla 9. Tendencia tecnológica (2012-2026).

Período	Tendencia Dominante	Línea de Conocimiento Principal
2012 - 2018	Modularidad Física	Acoplamiento mecánico y versatilidad logística (Caso: Rheinmetall).
2019 - 2023	Optimización Energética	Reducción de masa muerta y fijación termoplástica (Caso: BAE Systems Bofors).
2024 - Presente	Geometría Predictiva	Microestructuras hexagonales y carcasas pre-deformadas (Caso: US Navy).

El futuro de la munición reside en el control total del efecto: desde el lanzamiento silencioso hasta la fragmentación geométrica perfecta, todo ello orquestado por una electrónica de seguridad que permite la convivencia de la potencia destructiva con la precisión operativa.

De la revisión de los registros en lo general se tratan de patentes de granadas no letales, aturdidores, de proyectiles o de dispositivos para mitigar los daños de las granadas, tomando cuatro registros de patentes que tienen relación con granadas de mano explosivas, como se muestra en la Figura 12. Diseño de granadas de mano: a) Pat. US20210018306 [24]; b) Pat. SK20170279 [25]; c) Pat. US20160305753 [26]; d) Pat. US20160273898 [27].



a) b) c) d)

Figura 12. Diseño de granadas de mano: a) Pat. US20210018306 [24]; b) Pat. SK20170279 [25]; c) Pat. US20160305753 [26]; d) Pat. US20160273898 [27].

La figura 12a corresponde a una invención de una granada de fragmentación con un sistema de seguridad en la espoleta que puede remover el detonador de la espoleta de forma segura. La figura 12b es del diseño de una granada de fragmentación controlada al mismo tiempo que ofrece el diseño penetrar superficies, debido al efecto de cono en la parte inferior, también puede ensamblarse dos granadas por la parte inferior de la misma, logrando obtener el doble de metralla. La figura 12c es de una granada versátil al contar con un detonador removible; admite el uso de diversos materiales explosivos prensados y proyección de fragmentos con relación a un eje del cuerpo. La figura 12d es de una granada que contiene al centro un cuerpo donde se aloja la carga explosiva y la espoleta y de forma externa cuenta con una camisa de caucho que rodea el cuerpo, el cual presenta divisiones conforme al número de fragmentos de caucho que se desee. En la Tabla 10 se muestra un resumen de las características principales de estas granadas.

Tabla 10. Comparación tecnológica de las granadas actuales.

Tipo de Gda.	Cambio de configuración (modularidad)	Efectos
Figura 12a	No	Fragmentación controlada
Figura 12b	Si	Fragmentación controlada Efecto Munroe
Figura 12c	Si	Fragmentación controlada Dirección de fragmento controlada
Figura 12d	Si	Fragmentación controlada
FRUGAD	Si	Fragmentación controlada Alcance controlado Sobrepresión controlada

3.2. Análisis bibliográfico sobre dispositivos explosivos con gradualidad

Para el análisis de la literatura se utilizaron los buscadores Web of Science y Scopus, debido a que proporcionan herramientas de análisis que permiten valorar la calidad de la búsqueda; en los que se aplicó la disposición de palabras clave y operadores booleanos mencionados al comienzo de esta sección, así como el período de tiempo de 5 años como primer filtro (Filtro_1).

En la Tabla 11 se muestran los artículos encontrados en los motores de búsqueda ordenados de acuerdo con su relevación por número de veces citados.

Tabla 11. Artículos relacionados con la investigación.

Pos.	Autores	Titulo	Año de publicación	veces citado
1	Zhang, Chunwei; Abedini, M.; Mehrmashhadi, J.	Development of pressure-impulse models and residual capacity assessment of RC columns using high fidelity Arbitrary Lagrangian-Eulerian simulation [28].	2020	56
2	Abedini, Masoud; Zhang, Chunwei	Dynamic vulnerability assessment and damage prediction of RC columns subjected to severe impulsive loading [29].	2021	40
3	Rigby, S. E.; Lodge, T. J.; Alotaibi, S.; Barr, A. D.; Clarke, S. D.	Preliminary yield estimation of the 2020 Beirut explosion using video footage from social media [30].	2020	38

Pos.	Autores	Titulo	Año de publicación	veces citado
4	Tong, Changci; Liu, Yunen; Zhang, Yubiao; Cong, Peifang; Shi, Xiuyun; Liu,	Shock waves increase pulmonary vascular leakage, inflammation, oxidative stress, and apoptosis in a mouse model [31].	2018	18
5	Liu, L.; Zong, Z. H.; Li, M. H.	Numerical Study of Damage Modes and Assessment of Circular RC Pier under Noncontact Explosions [32].	2018	12
6	Raina, A. K.	Influence of Joint Conditions and Blast Design on Pre-split Blasting Using Response Surface Analysis [33].	2019	8
7	Pilger, Christoph; Gaebler, Peter; Hupe, Patrick;	Yield estimation of the 2020 Beirut explosion using open access waveform and remote sensing data [34].	2021	7
8	Pratomo, Arief N.; Santosa, Sigit P.; Gunawan, Leonardo;	Numerical study and experimental validation of blastworthy structure using aluminum foam sandwich subjected to fragmented 8 kg TNT blast loading [35].	2020	7
9	Lin Shu-Chao; Li Dan; Yang Bo	Experimental study and numerical simulation on damage assessment of reinforced concrete beams [36].	2019	4
10	Zochowski, Pawel; Warchol, Radoslaw; Miszczak, Maciej;	Experimental and Numerical Study on the PG-7VM Warhead Performance against High-Hardness Armor Steel [37].	2021	4
11	Qi, Shao-bo; Huang, Guang-yan;	External blast load factors for dome structures based on reliability [38].	2022	2
12	Zhou, Wenhai; Li, Zhenbao; Wu, Xin;	A Novel Method to Evaluate the Effect of Slope Blasting under Impact Loading [39].	2020	2
13	Hernandez, Francisco; Hao, Hong; Zhang, Xihong	On the effectiveness of ventilation to mitigate the damage of spherical chambers subjected to confined trinitrotoluene detonations [40].	2019	2
14	Choubey, Bishwajeet; Dutta, Sekhar Chandra; Prakhya, Ganga Kasi, V;	Blast pressure analysis due to confined explosion-after effects [41].	2020	2
15	Wang, Hong; Zhang, Wen-Juan; Gao, Jun-Hong; Liu, Jin-Ren; Liu, Zhi-Yong	Global gene expression profiling of blast lung injury of goats exposed to shock wave [42].	2020	1
16	Deng, Guo-qiang; Yu, Xiao	Numerical study on the case effect of a bomb air explosion [43].	2021	1
17	Li, Hanshan; Lu, Liping; Zhang, Xiaoqian; Zhang, Xuewei	Space Projectile Explosion Position Parameters Measurement Method and Target Damage Probability Calculation Analysis [44].	2021	1
18	González Duperon, Esther; Martínez Gil, Marta; Giménez Frances, Borja; González Ferradas, Enrique	Analysis of Effects of Detonation of Explosive Substances on Humans from Characteristic Curves Explosive Mass-Distance from the Origin of the Explosion [18].	2016	1
19	Malciu, Adrián; Puica, Constantin-Cristinel;	Research on the mitigation of shaped charge effect [45].	2020	1
20	Gan, Lu; Zong, Zhouhong; Gao, Chao; Li, Minghong;	Influence of shape of cuboid explosives on response of plates subjected to blast loads [46].	2022	0
21	Parchuri, Pradeep Kumar; Kotegawa, Shota; Ito,	Characterization of Shock Wave Damages in Explosion Welded Mo/Cu Clads [47].	2021	0

Pos.	Autores	Titulo	Año de publicación	veces citado
22	Liu, Zihan; Jiang, Nan; Zhou, Chuanbo; Ji, Lin; Luo, Xuedong	Damage Effect of Terrorist Attack Explosion-induced Shock Wave in a Double-deck Island Platform Metro Station [48].	2021	0
23	Chi, Minghua; Jiang, Hongye; Lan, Xubin;	Study on Overpressure Propagation Law of Vapor Cloud Explosion under Different Building Layouts [49].	2021	0
24	Budema, Paul Munguakonkwa; Murhega, Romeo Bujiriri;	Hand grenade blast injuries in the Eastern Democratic Republic of Congo: a case series of 38 patients [50].	2022	0
25	Susantez, Cigdem; Caldeira, Aldelio Bueno	Genetic Algorithm Optimisation of a TNT Solidification Model [51].	2019	0

En el análisis de los artículos se revisa las principales líneas de conocimiento actuales, los alcances metodológicos en la evaluación de daño y las lagunas existentes para la consolidación de un índice de daño gradual.

Las Principales Líneas de Conocimiento Actual que se revela del estado del arte se sostiene sobre tres pilares disciplinarios fundamentales que abordan el fenómeno explosivo desde distintas escalas:

a) **Modelado Numérico de Alta Fidelidad y Vulnerabilidad Dinámica:** La ingeniería de impacto actual está dominada por las simulaciones computacionales. Investigadores como Zhang, Abedini y Mehrmashhadi (2020) [28], y posteriormente Abedini y Zhang (2021) [29], han liderado el desarrollo de modelos de evaluación de vulnerabilidad dinámica en estructuras sometidas a cargas impulsivas severas. Su trabajo se centra en el uso de simulaciones Eulerianas-Lagrangianas Arbitrarias (ALE) para predecir la "capacidad residual" de los materiales (como el hormigón armado) tras una explosión sin contacto. Esta línea de conocimiento representa el estándar actual para diseñar escenarios de detonación controlada y calcular radios de fragmentación de granadas en entornos urbanos.

b) **Fisiología del Trauma por Onda de Choque (Biomedicina):** Paralelo al daño estructural, el estado del arte médico investiga el impacto "invisible" de la sobrepresión. Estudios fundacionales como el de Tong et al. (2018) [31] han demostrado en modelos murinos que las ondas de choque generan un impacto gradual sistémico, traduciéndose en fugas vasculares pulmonares, inflamación aguda, estrés oxidativo y apoptosis (muerte celular). Esta línea aborda el daño biológico que ocurre incluso cuando la onda de presión no es suficiente para generar metralla letal o colapso estructural.

c) **Análisis Cinemático y Estimación de Rendimiento:** La evaluación post-detonación ha dado un salto cualitativo. Con base en eventos empíricos a gran escala (como la explosión de Beirut), autores como Rigby et al. (2020) [30] y

Pilger et al. (2021) [34] debaten metodologías para estimar el rendimiento de una explosión cruzando datos de fotogrametría digital, sensores sísmicos y ecuaciones de propagación de ondas. Estos algoritmos de escalado son la base matemática para predecir el comportamiento dinámico de cargas menores, como las granadas modernas.

En la actualidad los Alcances Tecnológicos en la Evaluación de Daño, los estudios científicos han logrado alcances notables en la precisión predictiva. La tendencia tecnológica en el diseño y evaluación de granadas (y dispositivos afines como los explosivos termo báricos, cf. Türker, 2016 [52]) permite:

a) **Mapeo de Presión-Impulso (P-I):** Hoy en día es posible generar curvas isomórficas que dictaminan exactamente qué nivel de presión y duración de impulso causarán una falla específica en un material determinado (Liu et al., 2018 [32]).

b) **Evaluación de Daño No Binario:** En lugar de catalogar un objetivo como "destruido", las simulaciones actuales logran calcular el porcentaje de capacidad de carga o integridad que conserva una estructura (o un chaleco balístico) después del impacto.

c) **Diseño Direccional:** El uso de simulaciones permite a la industria armamentística y de defensa predecir cómo interactuarán las ondas de choque con geometrías complejas, permitiendo el desarrollo de granadas con patrones de fragmentación controlada o efectos de sobrepresión focalizados.

A pesar de la alta fidelidad de las simulaciones y los descubrimientos en el trauma médico existen lagunas en el conocimiento y la necesidad de un Índice de Daño Gradual la revisión de la literatura evidencia profundas grietas epistemológicas cuando se intenta unificar estos campos. Las principales lagunas en el conocimiento que impiden, hasta el momento, el establecimiento de un Índice de Daño Gradual universal es:

a) **Desconexión Interdisciplinaria (Estructura vs. Biología):** Existe una asimetría metodológica. Las curvas empíricas de daño (Stand-off distance) están calibradas para medir la fractura de concreto o la deformación del acero [29]. Sin embargo, estas métricas ignoran que una onda atenuada que no daña una pared es letal para los alvéolos pulmonares [31]. No existe un índice matemático transversal que evalúe simultáneamente el daño material y el daño fisiológico de manera escalonada.

b) **Idealización Computacional frente a la Realidad Microfísica:** Los modelos numéricos actuales sufren de sobre-simplificación. Para que los cálculos sean eficientes, las simulaciones ALE asumen condiciones de "adherencia perfecta"

entre materiales y distribuciones homogéneas de la onda. En el mundo real, una granada genera fragmentación irregular y deslizamientos de adherencia térmica (*bond-slip*). La falta de modelos matemáticos que contabilicen este comportamiento estocástico impide crear un índice gradual predictivo confiable a nivel micro.

c) **Ausencia de una Escala de Transición Continua:** El conocimiento actual tipifica el daño en modos específicos (Modo I: Flexión, Modo II: Corte, etc.). Se carece de un índice conceptual que funcione como un espectro continuo (del 0% al 100% de letalidad o incapacitación). Para las tecnologías de granadas tácticas (escalables, aturdidoras, termo báricas de radio corto), la ausencia de este índice impide establecer matemáticamente el límite exacto entre una fuerza disuasiva, una fuerza incapacitante y una fuerza letal.

3.3. Conclusión

La arquitectura de las granadas de mano ha pasado de ser un sistema puramente explosivo, a convertirse en sistemas de ingeniería de materiales. De este análisis se desprenden tres pilares fundamentales:

a) Evolución de la Línea de Conocimiento

Se identifica una transición clara desde la modularidad mecánica simple (Rheinmetall, 2012) [20], diseñada para flexibilidad logística, hacia la integración microestructural (US Navy y SAAB, 2024) [22], [23]. La tendencia tecnológica actual no busca aumentar la cantidad de explosivo, sino optimizar la transferencia de energía cinética mediante el control absoluto de la geometría y la masa de cada fragmento.

b) Sinergia entre Manufactura y Letalidad

Las patentes analizadas (específicamente BAE Systems y US Navy) demuestran que el proceso de fabricación (como el termo-encogimiento y la embutición profunda con relieves) es ahora un determinante directo del nivel de daño.

- La regularización de fragmentos hexagonales elimina la aleatoriedad en la dispersión.
- La reducción de cavidades inertes en los contenedores incrementa la velocidad inicial de los fragmentos.

Esto permite que modelos como el de Axelsson (ASII) alcancen niveles de predictibilidad superiores al 90% en simulaciones de daño fisiológico.

c) Síntesis Patento métrica y Prospectiva

El estudio revela que la propiedad intelectual se está concentrando en la eliminación de la "metralla parásita" (fragmentos irregulares e ineficientes). El futuro de la fragmentación gradual, según la densidad de patentes de 2024, reside en carcasas híbridas que combinan polímeros de alta resistencia con metales pre-deformados.

Por otra parte, el estado del arte demuestra que poseemos las herramientas aisladas para comprender el impacto destructivo y médico de las ondas de presión y la fragmentación. No obstante, el siguiente gran paradigma en la investigación de dispositivos explosivos tácticos es la integración de estos modelos. Establecer un Índice de Daño Gradual requiere superar la idealización de las simulaciones y formular algoritmos híbridos que traduzcan la energía de la onda de choque en una escala única, continua y bidimensional (físico-biológica).

Capítulo 4.

Metodología de diseño.

La lógica teórica detrás del diseño de la granada con gradualidad que se desprende del Capítulo 2 “marco teórico conceptual” y del Capítulo 3 “estado del arte y de la técnica”, sugiere que el daño no es una propiedad fija de la munición, sino una función paramétrica configurable. De estas premisas es posible integrar un índice de daño gradual el cual permite transformar los estímulos físicos de los mecanismos de daño primario (presión), secundarios (fragmentos) y terciarios (desplazamiento) en una función de probabilidad normalizada que cuantifica con rigor la vulnerabilidad de un blanco específico de aquí que el primer paso para el diseño del sistema FUGRAD sea el definir y establecer este índice de daño para que el desarrollo del sistema FUGRAD se articule como un proceso que integra la caracterización balística, el modelado estocástico y la validación física experimental. Este enfoque sistémico inicia con la ingeniería inversa de granadas convencionales, como la M26M y la MKIIIA3, para establecer una línea base de desempeño parametrizada en términos de sobrepresión incidente, impulsos específicos y cinemática de fragmentación, esto permitirá transitar de un diseño empírico hacia una plataforma modular configurada bajo el paradigma del Índice de gradualidad de daño (IGD), garantizando que la granada cumpla con los principios de necesidad y proporcionalidad en el uso de la fuerza pública.

Alineando las etapas de diseño del sistema FUGRAD con la metodología de niveles de maduración tecnológica (TRL’s), a continuación, se presentan y desarrollan cada una de las etapas metodológicas correlacionándolas con los niveles de maduración llegando hasta un TRL 4, que permitirá alcanzar los objetivos del proyecto.

De igual forma la integración del Índice de Comunalidad (CI) en la metodología de investigación constituye el eje que garantiza la viabilidad industrial y logística del sistema FUGRAD, permitiendo transitar de un diseño de munición única a una "familia de productos"

El desarrollo de este capítulo constituye la base metodológica para el diseño de la FUGRAD: granada con gradualidad de daño que funciona con base en una nueva relación de índice de daño el cual constituye una herramienta de diseño predictivo viable para la neutralización de amenazas con precisión mientras se salvaguarda la vida de la población civil.

4.1. Formulación y modelado cuantitativo del nuevo índice de daño

Para ponderar el daño, el índice debe integrar funciones de transferencia que conecta los estímulos físicos de una explosión con modelos de vulnerabilidad humana. La letalidad total no es una suma simple, sino la unión de eventos no mutuamente excluyentes, por lo que el índice se define como una medida cuantitativa y estocástica que representa la probabilidad de que un blanco claramente identificado sea vencido o neutralizado por una amenaza explosiva en función de su distancia.

Esta integración se realiza mediante el método Probit ($P_p = a + bln(V)$) tratado en el punto 2.7, el cual asume que la tolerancia de una población ante traumas biológicos sigue una distribución logarítmica normal.

El índice matemático final para la gradualidad de daño se puede expresar como un vector de probabilidad combinada que depende de la distancia (R) y la configuración modular (χ):

$$IGD(R, \mathrm{X}) = 1 - \prod_{i=1}^{n} \big(1 - P_i(R)\big) \qquad (4-1)$$

Donde:
IGD(R) = Es el índice de gradualidad de daño a una distancia radial R.
X= representa las variables de diseño modificables (masa del explosivo, prefragmentación, material del contenedor).
P_i(R)= representa la probabilidad de incapacitación o daño asociado al i-ésimo mecanismo lesivo (primario, secundario o terciario) a la distancia R.
(1-P_i(R)) = constituye la probabilidad de supervivencia.

Tomando los principales mecanismos de daños abordados en el punto 2.6 los cuales representan los mecanismos fundamentales de transferencia de energía de una explosión la ecuación (4-1) puede expresarse como una función normalizada de productos que representa la unión de probabilidades de eventos independientes no mutuamente excluyentes:

$$IGD(R) = 1 - \big[(1 - P_{shock})\big(1 - P_h \cdot P_{frag}\big)\big(1 - P_{desp}\big)\big] \qquad (4-2)$$

Donde
P_{shock} = pobabilidad de daño por el mecanismo primario.
$P_h \cdot P_{frag}$ = probabilidad de daño por el mecanismo secundario.
P_{desp} = probabilidad de daño por el mecanismo terciario.
Todos evaluados a la distancia R.

Este modelo matemático permite predictibilidad al conocer de forma unificada la curva de daño de dispositivos explosivos y como el diseño de una arquitectura modular

puede maximizar el daño en un radio de acción determinado y reducir o eliminar el daño colateral.

4.2. Criterio de gradualidad por zonas

En base al marco teórico establecido en el capítulo 2, a continuación, se establecen zonas de gradualidad del daño, los cuales responde a los umbrales y nivel de letalidad del mecanismo de transferencia de energía, definiendo cuatro zonas de gradualidad en función del valor del índice de daño, estableciendo para este proyecto los Criterios de Gradualidad Táctica:

Tabla 12. Criterios de gradualidad y zonificación.

Zona	Descripción	Criterio
Cero (0)	Letalidad total o absoluta	IGD ≥ 0.80
Uno (1)	Neutralización/Incapacitación Severa	$0.50 \leq IGD < 0.80$
*Dos (2)	Efectos Aturdidores/Disuasorios	$0.1 \leq IGD < 0.50$
Tres (3)	Límite de Seguridad para Población Civil	$IGD < 0.1$

* Representa una zona de transición de riesgo aceptable para tropas con equipo de protección.

Las dimensiones o alcance de cada zona como se puede deducir de la ecuación (4-1) depende en primera instancia de las características del dispositivo explosivo (para este proyecto granadas) y en segundo término de la distancia de interés.

4.3. Algoritmo para el cálculo del nuevo índice de daño gradual.

Para estandarizar y programar la metodología para evaluar el IGD(R) dentro de un marco de simulación balística, a continuación, se detalla el algoritmo secuencial exacto para computar el Índice de Gradualidad de Daño. Este algoritmo sintetiza las métricas de los mecanismos de daño primarias, secundarias y terciarias, define los criterios lógicos para su aplicación en el diseño de armamento explosivo.

Paso 1: Subrutina de inicialización de Parámetros de Diseño y Entorno (Inputs)

- W_{EXP}: Masa neta del explosivo en la granada (kg).
- M: Masa de la carcasa o cuerpo de fragmentación (kg).
- n: Forma geometrica del dispositivo explosivo (esférico n=1, cilíndrico n=2, plano n=3).
- E: Constante de Gurney basada en la química del explosivo (J/kg).
- N : Número total de fragmentos (para carcasas pre-fragmentadas) o N_0 (estimación estocástica).
- R: Distancia radial desde el punto de detonación al objetivo (m).
- A_t: Área transversal expuesta del objetivo (m^2).
- H_{EXP}^{d} = Calor de detonación del explosivo específico.
- H_{TNT}^{d} = Calor de detonación del TNT.

- D_{EXP} = Velocidad de detonacion del explosivo

Determinar los parámetros físicos generados por la carga explosiva y el contenedor

Paso 2: Subrutina de Evaluación de Efectos Primarios (Onda de Choque)

1. Equivalencia TNT (W_E): Multiplicar la masa W_{EXP} por el factor de efectividad relativa del explosivo para obtener el peso equivalente en TNT. Ecuación (2-2 o 2-3).

$$W_E = \frac{H_{EXP}^d}{H_{TNT}^d} W_{EXP} \qquad (2-2)$$

$$W_E = \frac{D_{EXP}^2}{D_{TNT}^2} W_{EXP} = \frac{D_{EXP}^2}{48.3} W_{EXP} \qquad (2-3)$$

2. Distancia Escalada (Z): Computar la ley de escala de Hopkinson-Cranz:

$$Z = \frac{R}{{W_E}^{1/3}} \qquad (4-3)$$

3. Parámetros de Presión: Utilizar las ecuaciones polinomiales de Kingery-Bulmash introduciendo Z para obtener la Sobrepresión Pico Incidente (P_s) o Reflejada (P_r), así como la duración de fase positiva (t_d).

$$Y = e^{(A+Bx+Cx^2+Dx^3+Ex^4)} \qquad (4-4)$$

Donde
x = ln(Z), logaritmo natural de la distancia escalada
Y = representa el parámetro de la explosión a calcular (presión, impulso, etc.)
A,B,C,D,E= son los coeficientes específicos que variante según el parámetro deseado.

Para sobrepresión:

Para $Z < 7.25$	*Para $Z \geq 7.25$*
***A:** 6.9137*	***A:** 8.803*
***B:** -1.4398*	***B:** -3.700*
***C:** -0.2815*	***C:** 0.270*
***D:** -0.1416*	***D:** 0.073*
***E:** 0.0685*	***E:** -0.012*

4. Probabilidad de Letalidad Primaria (P_{shock}): seleccionar el modelo para determinar la probabilidad de muerte por el mecanismo de daño primario.

a) Modelo Probit (preferente).

Muerte por hemorragia pulmonar: calcular la sobrepresión en fase positiva de la onda de choque a la distancia de interés (R) empleando la ecuación 4-4, o en su caso obtener los valores empleando la Figura 8. Obtenido el valor de la sobre presión emplear la ecuación 2-23 y la Tabla 4 para obtener el valor de $P_{shock.}$

b) Modelo BTD.

i. Calcular la cinemática de la pared torácica utilizando el modelo biomecánico de un grado de libertad (SDOF) del Dispositivo de Prueba de Blast (BTD) propuesto por Axelsson. La ecuación diferencial que modela el desplazamiento de la pared torácica hacia los pulmones se define como:

$$M_{tor}\ddot{x} + C_{fa}\dot{x} + K_e x = A_{ef} \cdot P(t) + A_{ef} \cdot P_0 - A_{ef} \cdot P_0 \left(\frac{V_{gas}}{V_{gas} - A_{ef} \cdot x}\right)^{\gamma} \qquad (4-5)$$

Donde M_{tor} es la masa efectiva torácica, C_{fa} es el factor de amortiguamiento, K_e es la constante de elasticidad, A_{ef} es el área efectiva, V_{gas} es el volumen gaseoso inicial de los pulmones, P_0 es la presión ambiente, $P(t)$ es la sobrepresión de la onda de choque transitoria, x representa el desplazamiento de la pared torácica y γ es el exponente politrópico del gas pulmonar.

ii. Resolver la ecuación diferencial no lineal en el dominio del tiempo para encontrar la velocidad máxima de compresión de la pared torácica hacia el interior, denotada como $V_{max} = \max(\dot{x})$.

iii. Determinar el Índice de Severidad Ajustada de Lesiones (ASII) desarrollado por Axelsson ingresando la velocidad máxima calculada mediante la siguiente fórmula:

$$ASII = (0.124 + 0.17\, V_{max})^{2.63} \qquad (4-6)$$

iv. Mapear el valor de la velocidad torácica (V_{max}) y su respectivo ASII a una probabilidad continua de letalidad fraccional $0 \leq P_{shock} \leq 1$. Los umbrales biomecánicos de referencia establecen que una velocidad de 3 a 4.5 m/s ($ASII \approx 0.2 - 1.0$) representa el inicio o umbral de una lesión por onda de choque ("Trace to slight"), una velocidad de 8 a 12 m/s equivale al 1% de letalidad probabilística (LD1), mientras que superar los 12.8 m/s ($ASII > 3.6$) denota un daño severo a extensivo que sobrepasa el umbral del 50% de letalidad letalidad ($LD50$) y avanza rápidamente hacia el colapso pulmonar fatal total.

Paso 3: Subrutina de Evaluación de Efectos Secundarios (Fragmentación)

1. Condición de Existencia de fragmentos: Si la masa inerte $W_c \approx 0, entonces\ P_{frag} = 0$. Ir al Paso 4 de lo contrario continuar siguiente paso

2. Cálculo de Velocidad Inicia$l$ (V_0): Emplear la Ecuación de Gurney de acuerdo a la geometría del dispositivo:

$$V_0 = \sqrt[2]{2E}\left[\frac{1}{\left({}^{W_C}/_{W_E}\right) + \left({}^{n}/_{(n+2)}\right)}\right]^{1/2}$$

3. Cálculo de Masa del Fragmento (m_f):

a) Para diseño controlado (prefragmentación): $m_f = W_C/N(m)$.
b) Para diseño aleatorio: Extraer masa crítica μ iterando la distribución de Mott-Weibull.

4. Decaimiento de Velocidad (V_R): Computar la pérdida aerodinámica para proyectiles a la distancia R en base a su masa m_f y coeficiente de arrastre C_d empleando las ecuaciones de 2-11 a la 2-13.

5. Modelo Probit para muerte por fragmento: Aplicar las ecuaciones según corresponda 2-26 y 2-27, utilizar la Tabla 4 para obtener de distribución normal estándar a un valor de probabilidad fraccional para un solo impacto (P_{frag}).

6. Probabilidad de Impacto (P_h) : Computar el número esperado de impactos en el objetivo calculando la densidad espacial q de fragmentos de masa individual mayor que m_f, a una distancia R em pleando la ecuacion 2-16, posterior mente calcular la P_h empleando la ecuación 2-18.

7. Calcular la Letalidad Secundaria tras impacto: Aplicar la ley de probabilidades de eventos independientes: $P_h \cdot P_{frag}$

Paso 4: Subrutina de Evaluación de Efectos Terciarios (desplazamiento)

1. Calcular el impulso específico (Is) o la velocidad de impacto (V_R) para el primer caso utilizar la ecuación 4-4 y en el segundo la ecuación 2-11.

Para impulso específico $Is/W_E^{1/3}$:

$Para\ Z < 2.41$	$2.41 \leq Z < 6$	$Z \geq 6$
A: *2.975*	***A:*** *0.911*	***A:*** *3.248*
B: *-0.466*	***B:*** *7.260*	***B:*** *0.163*
C: *0.963*	***C:*** *-7.459*	***C:*** *-0.441*
D: *0.03*	***D:*** *2.960*	***D:*** *0.079*
E: *-0.087*	***E:*** *-0.432*	***E:*** *-0.00554*

2. Utilizar el modelo Probit para muerte por desplazamiento y colisión aplicando las ecuaciones 2-28 o 2-19 según corresponda.

3. Utilizar la Tabla 4 y los valores obtenidos de las funciones del punto anterior para obtener el valor normalizado de la probabilidad de daño por el mecanismo terciario (P_{desp}).

Paso 5: Subrutina de evaluación de IGD(R) y Criterio de Gradualidad

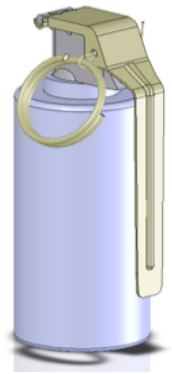
1. Cálculo del Índice de daño: Sintetizar el daño total del sistema:

$$IGD(R) = 1 - \left[(1 - P_{shock})\left(1 - P_h \cdot P_{frag}\right)\left(1 - P_{desp}\right)\right] \qquad (4-2)$$

2. Criterio de Optimización del Diseño y Estados Límite de Daño: Validar el diseño paramétrico observando si las características de este, si se ajusta el decaimiento de la curva de daño (ecuación 4-2) deseada, el algoritmo debe evaluar el cumplimiento de umbrales específicos. Basándose en la definición de estados límite de daño estandarizados, el algoritmo categoriza y optimiza los resultados bajo zonas y criterios de gradualidad.

4.3.1. Caso de aplicación granada de sobrepresión (MKIIIA3)

Paso 1. Requerimientos de entrada.



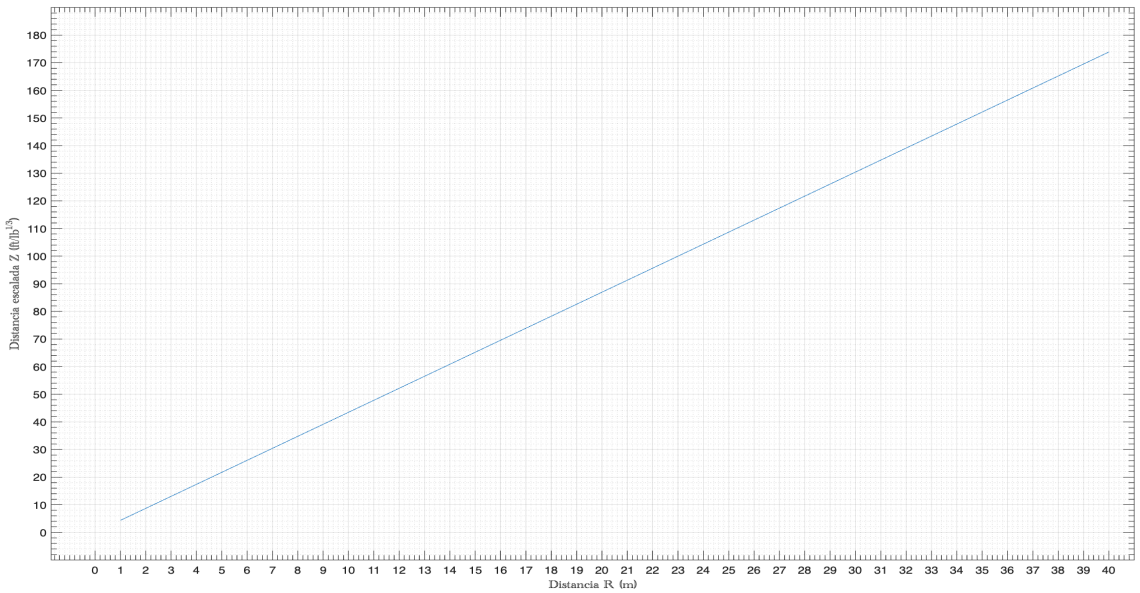
Características principales.

a) Espoleta modelo M206
b) Cuerpo de aluminio
c) Explosivo TNT
d) Carga 195 g (0.195 kg)
e) Altura del cuerpo 147mm (0.147 m)
f) Diámetro interior 55mm (0.055 m)
g) Espesor de pared 0.053mm (0.000053 m)
h) Densidad de carga 1.48 g/cm^3

$R = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 20, 30, 40]$m

Paso 2. Evaluación de efectos primarios.

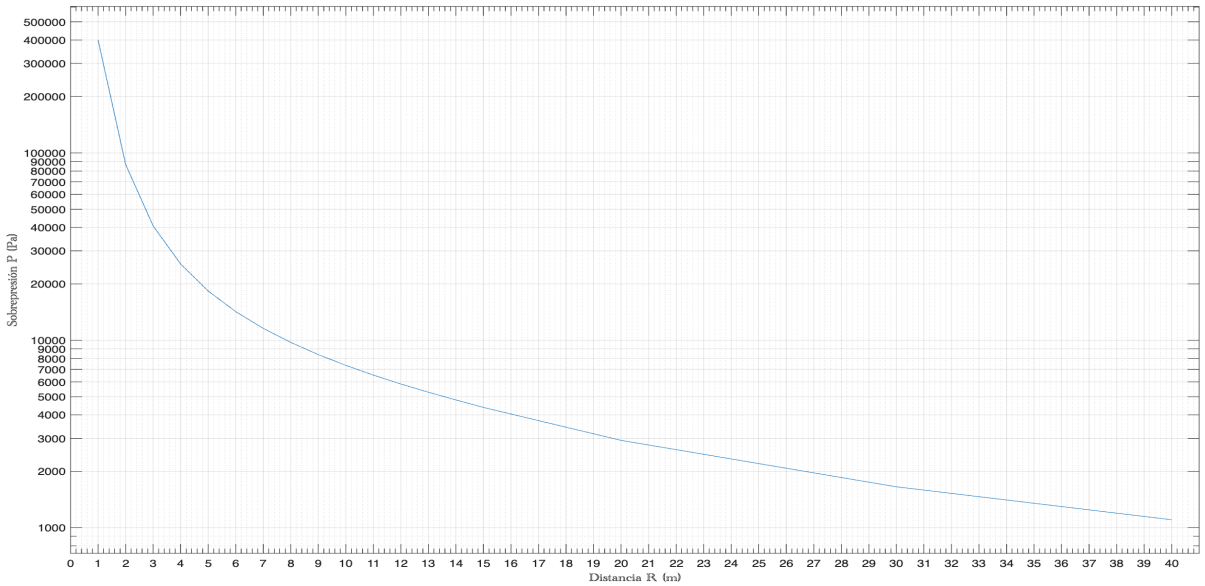
1. El tipo de explosivo es TNT ∴ W_E=0.195 kg
2. Distancia escalada Z(R):



R (m)	Z(R) (ft/lb$^{1/3}$)	R (m)	Z(R) (ft/lb$^{1/3}$)	R (m)	Z(R) (ft/lb$^{1/3}$)	R (m)	Z(R) (ft/lb$^{1/3}$)
1	4.3468	6	26.0805	11	47.8143	20	86.9351
2	8.6935	7	30.4273	12	52.1611	30	130.4027
3	13.0403	8	34.7741	13	56.5078	40	173.8703
4	17.3870	9	39.1208	14	60.8546		
5	21.7338	10	43.4676	15	65.2014		

Figura 13. Distancia escalada de la carga explosiva de la granada MKIIIA3.

3. Cálculo de la presión incidente P:



R (m)	P (psi)	P (Pa)	R (m)	P (psi)	P (Pa)	R (m)	P (psi)	P (Pa)	R (m)	P (psi)	P (Pa)
1	57.991	399832.67	6	2.062	14217.54	11	0.946	6522.63	20	0.424	2925.20
2	12.582	86748.05	7	1.680	11579.76	12	0.848	5846.99	30	0.240	1653.74
3	5.913	40765.65	8	1.413	9744.21	13	0.766	5283.88	40	0.160	1103.39
4	3.701	25520.21	9	1.217	8391.32	14	0.697	4806.52			
5	2.658	18324.34	10	1.066	7350.41	15	0.636	4384.25			

Figura 14. Pico de Sobrepresión generada por la granada MKIIIA3.

4. Probabilidad de muerte por onda de choque P_{shock}. Modelo Probit

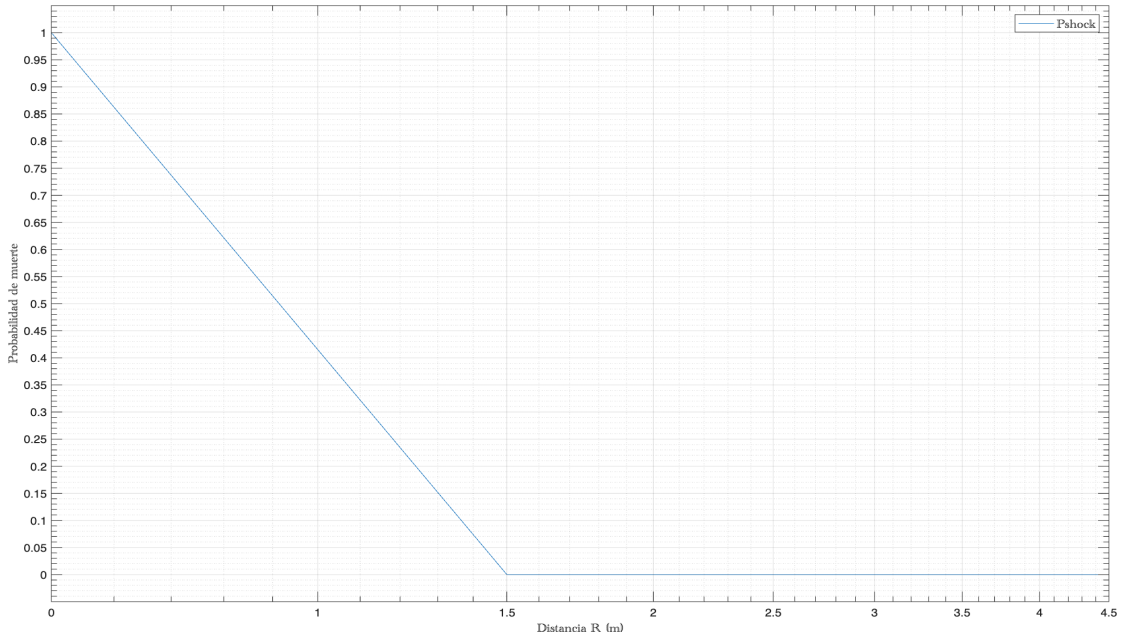


Figura 15. Probabilidad de muerte por incidencia de la onda de choque de la granada MKIIIA3.

Paso 3. Evaluación de efectos Secundarios

Dando que W_c=0 entonces la probabilidad $P_{frag} = 0$

Paso 4. Evaluación de efectos terciarios

1. Cálculo del impulso específico (Is) para cada (R)

Tabla 13. Datos de impulso específico generado por la carga del explosivo de la granada MKIIIA3.

R (m)	Is (psi-ms)	Is (Pa-s)	R (m)	Is (psi-ms)	Is (Pa-s)
1	13.060	91.220	10	1.536	10.726
2	6.923	48.353	11	1.399	9.771
3	4.828	33.725	12	1.284	8.970
4	3.699	25.838	13	1.187	8.290
5	2.996	20.929	14	1.103	7.704
6	2.518	17.586	15	1.030	7.193
7	2.171	15.163	20	0.776	5.423
8	1.908	13.327	30	0.505	3.525
9	1.702	11.886	40	0.372	2.597

2. Cálculo el valor de la función Probit para muerte por desplazamiento para cada R, ecuación 2-28 y usando la Tabla 4 obtenemos probabilidad de daño por desplazamiento P_{desp}:

$P_{desp} = 0$ para todo el rango de R

Paso 5. Evaluación del Índice de Gradualidad de Daño IGD(R) para cada R

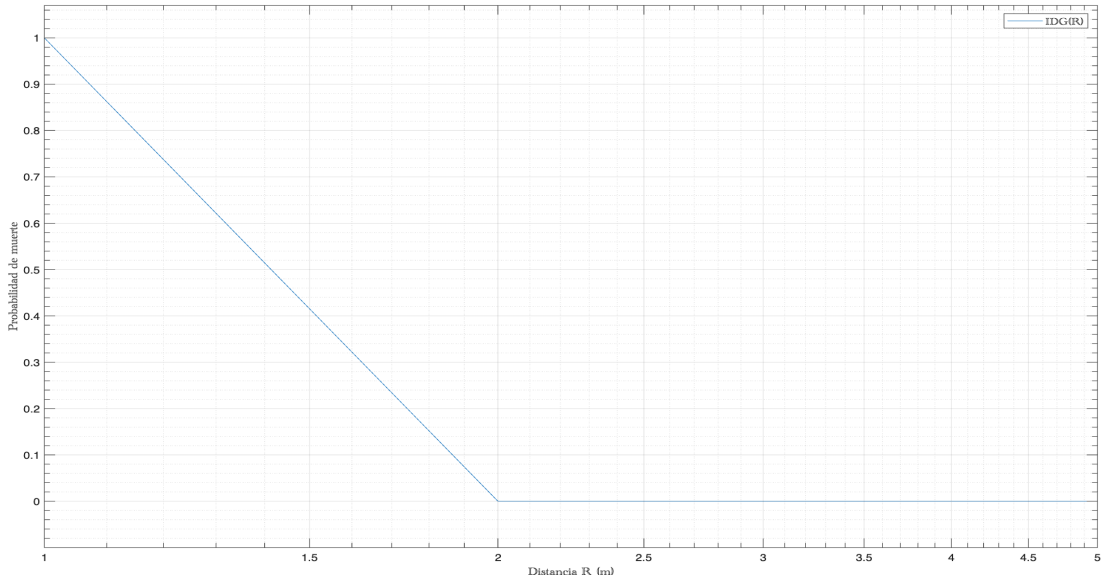


Figura 16. Decaimiento del índice de daño gradual con la distancia de la granada MKIIIA3.

Conclusión:

La letalidad de la granada MKIIIA3 depende exclusivamente de la sobrepresión generada por la carga explosiva la cual colapsa rápidamente con la distancia generando una zona de letalidad por daño de 2 m, no está presente en su diseño los mecanismos de daño secundario y terciario.

4.3.2. Caso de aplicación granada de fragmentación (M26M)

Paso 1. Requerimientos de entrada.



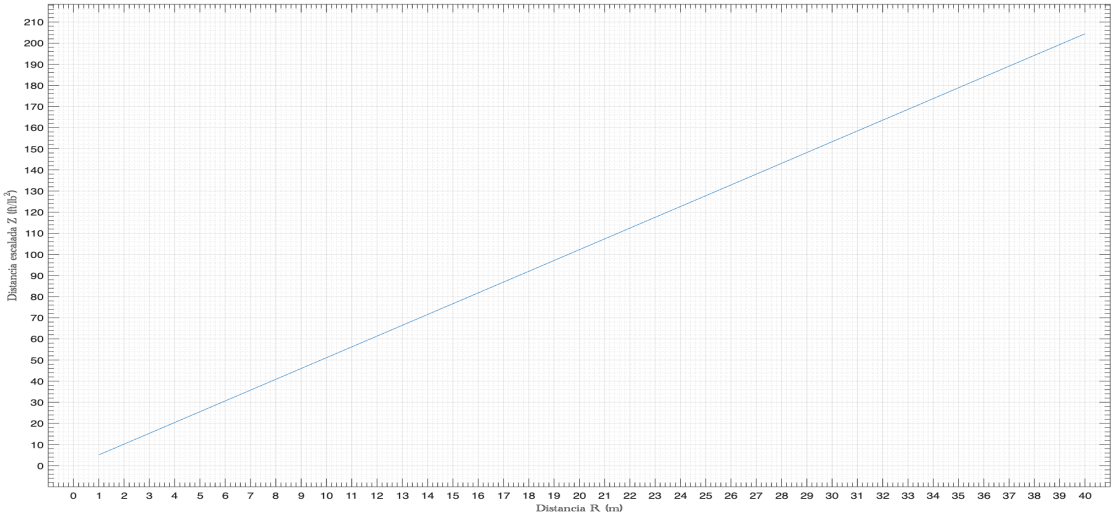
Características principales

a) Espoleta modelo M206
b) Cuerpo de acero
c) Explosivo TNT
d) Carga 120 g
e) Altura del cuerpo 144 mm
f) Diámetro interior 84 mm
g) Espesor de pared 1.1 mm
h) Peso del cuerpo W_c=321 g(0.321 kg)
i) Densidad de carga 0.984 g/cm^3

$R = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 20, 30\ 40]$m
$n = 3$, factor de forma para Gurney
$m_f = 3.9$ g
Ntf = 84

Paso 2. Evaluación de efectos primarios.

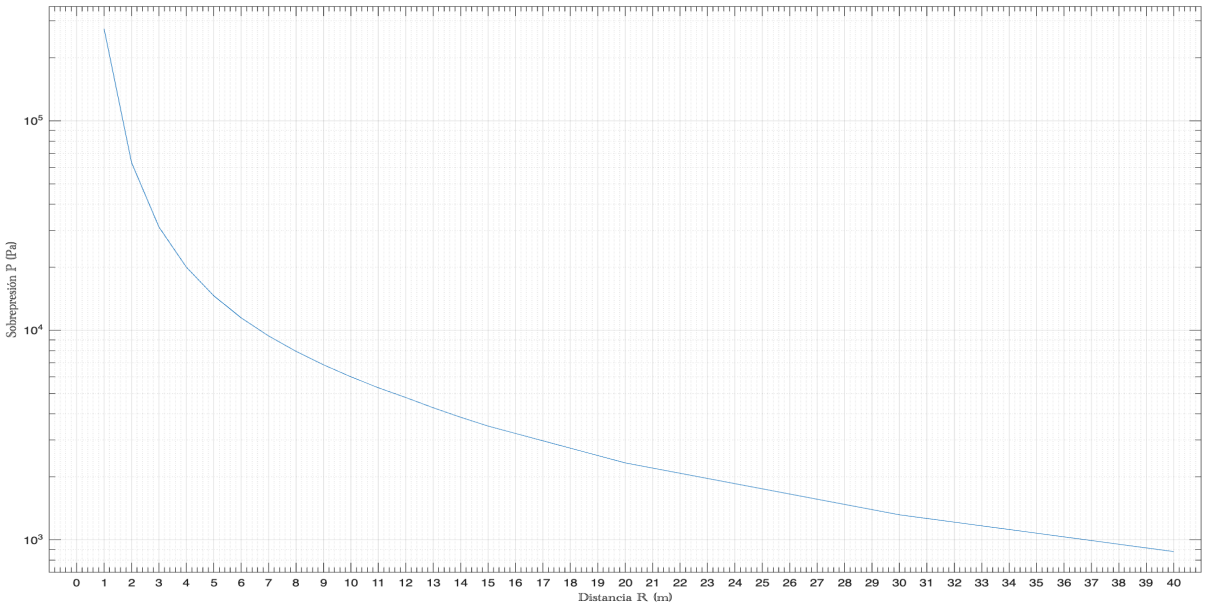
1. El tipo de explosivo es TNT ∴ W_E=0.120 kg
2. Distancia escalada Z(R):



R (m)	Z(R) (ft/lb$^{1/3}$)	R (m)	Z(R) (ft/lb$^{1/3}$)	R (m)	Z(R) (ft/lb$^{1/3}$)	R (m)	Z(R) (ft/lb$^{1/3}$)
1	5.1103	6	30.6620	11	56.2137	20	102.2068
2	10.2207	7	35.7724	12	61.3241	30	153.3102
3	15.3310	8	40.8827	13	66.4344	40	204.4136
4	20.4414	9	45.9931	14	71.5448		
5	25.5517	10	51.1034	15	76.6551		

Figura 17. Distancia escalada de la carga explosiva de la granada M26M.

3. Cálculo de la presión incidente P:



R (m)	P (psi)	P (Pa)	R (m)	P (psi)	P (Pa)	R (m)	P (psi)	P (Pa)	R (m)	P (psi)	P (Pa)
1	39.897	275083.6	6	1.6627	11463.99	11	0.7715	5319.03	20	0.3379	2329.67
2	9.1742	63254.01	7	1.3632	9398.60	12	0.6932	4779.11	30	0.1910	1317.06
3	4.5149	31128.93	8	1.1514	7938.51	13	0.6193	4270.22	40	0.1275	878.75
4	2.9038	20020.81	9	0.9932	6848.06	14	0.5580	3847.51			
5	2.1203	14619.24	10	0.8702	5999.78	15	0.5064	3491.67			

Figura 18. Pico de Sobrepresión generada de la granada M26M.

4. Probabilidad de muerte por onda de choque P_{shock}. Modelo Probit

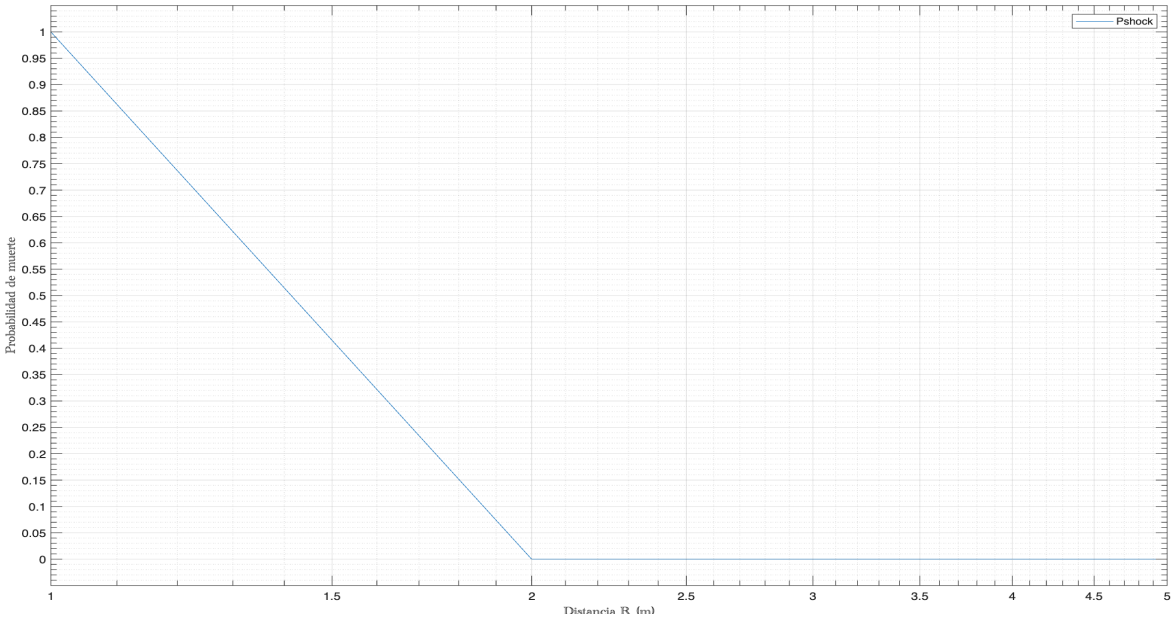


Figura 19. Probabilidad de muerte por incidencia de la onda de choque de la granada M26M.

Paso 3. Evaluación de efectos Secundarios

Tabla 14. Datos característicos del mecanismo por daño secundario de la granada M26M.

R (m)	VR (m/s)	Ec (J)	q(R) (frag/m²)	Ph	Pfrag	Ph*Pfrag
1	747.71	1081.536	5.1030	0.99717	1.000	0.9972
2	686.40	911.433	1.2758	0.76941	1.000	0.7694
3	630.11	768.083	0.5670	0.47902	1.000	0.4790
4	578.44	647.280	0.3189	0.30704	1.000	0.3070
5	531.01	545.476	0.2041	0.20922	1.000	0.2092
6	487.46	459.684	0.1418	0.15042	1.000	0.1504
7	447.49	387.385	0.1041	0.11287	1.000	0.1129
8	410.80	326.457	0.0797	0.08762	1.000	0.0876
9	377.11	275.112	0.0630	0.06989	1.000	0.0699
10	346.19	231.843	0.0510	0.05700	1.000	0.0570
11	317.80	195.379	0.0422	0.04734	1.000	0.0473
12	291.74	164.650	0.0354	0.03993	1.000	0.0399
13	267.82	138.754	0.0302	0.03413	1.000	0.0341
14	245.85	116.931	0.0260	0.02950	1.000	0.0295
15	225.69	98.540	0.0227	0.02574	1.000	0.0257
20	147.14	41.882	0.0128	0.01456	1.000	0.0146
30	62.54	7.566	0.0057	0.00650	0.082	0.0005
40	26.58	1.367	0.0032	0.00366	0.000	0.0000

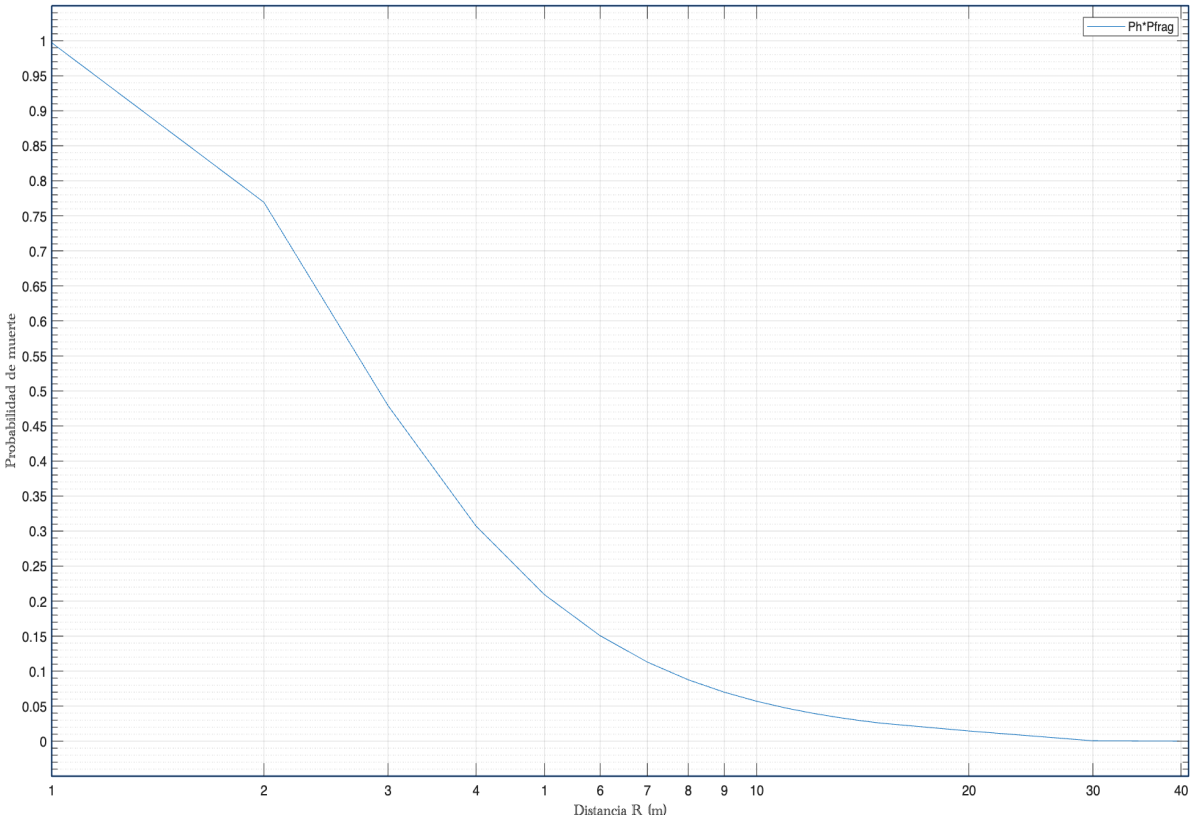


Figura 20. Probabilidad de muerte por impacto de fragmentos peligrosos de la granada M26M.

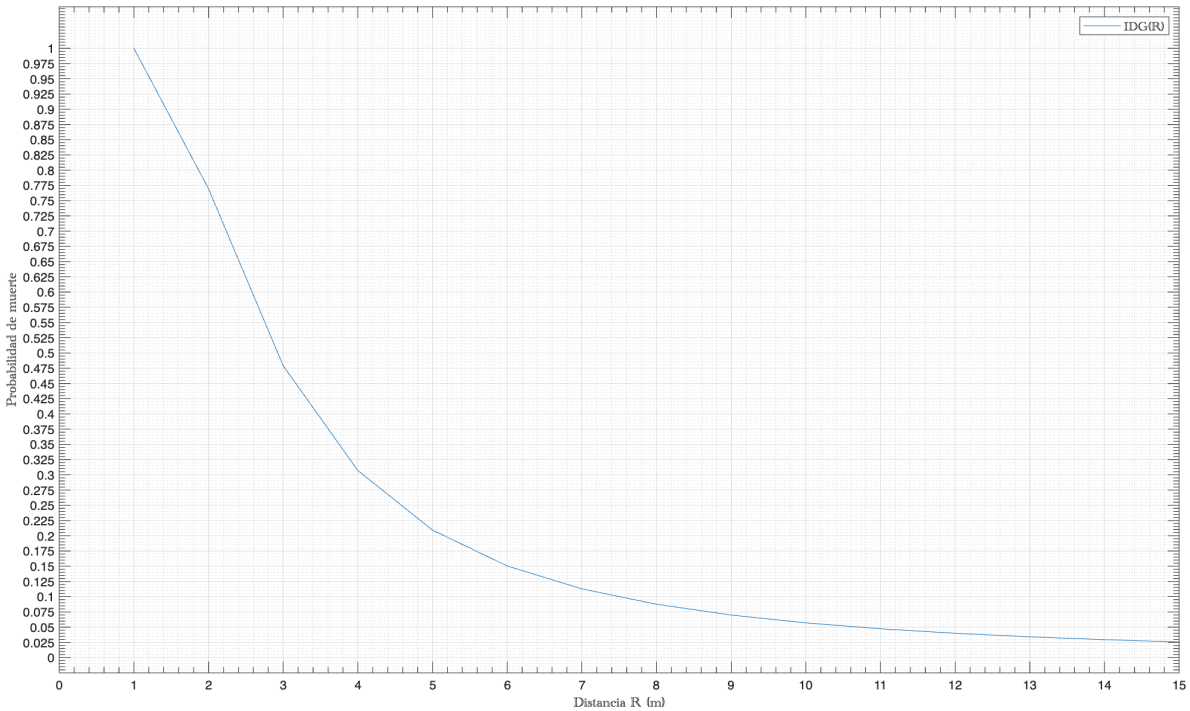
Paso 4. Evaluación de efectos terciarios

Cálculo del impulso específico (I_s) para cada (R) y cálculo del valor de la función Probit para muerte por desplazamiento para cada R, ecuación 2-28 y usando la Tabla 4 obtenemos probabilidad de daño por desplazamiento P_{desp}:

Tabla 15. Datos característicos de impulso específico por mecanismo de daño terciario.

R (m)	Is (psi-ms)	Is (Pa-s)	Pdesp	R (m)	Is (psi-ms)	Is (Pa-s)	Pdesp
1	9.5075	66.407	0.00	10	1.1146	7.785	0.00
2	5.1131	35.713	0.00	11	1.0147	7.088	0.00
3	3.5383	24.714	0.00	12	0.9310	6.503	0.00
4	2.7014	18.868	0.00	13	0.8598	6.005	0.00
5	2.1840	15.255	0.00	14	0.7984	5.577	0.00
6	1.8329	12.802	0.00	15	0.7450	5.204	0.00
7	1.5790	11.029	0.00	20	0.5561	3.884	0.00
8	1.3867	9.686	0.00	30	0.3615	2.525	0.00
9	1.2360	8.633	0.00	40	0.2663	1.860	0.00

Paso 5. Evaluación del Índice de daño gradual IGD(R) para cada R



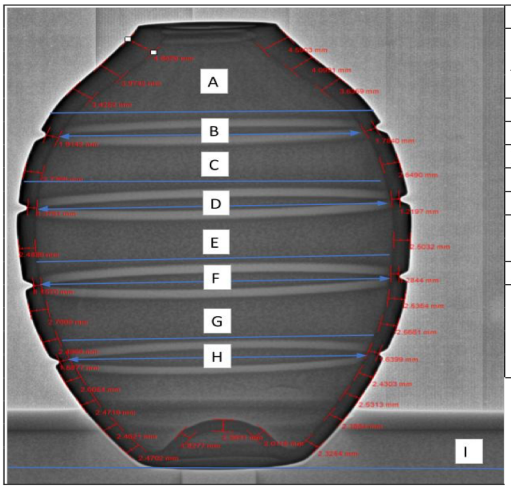
R (m)	IGD(R)	R (m)	IGD(R)	R (m)	IGD(R)	R (m)	IGD(R)
1	1.0000	6	0.1504	11	0.0473	20	0.0146
2	0.7694	7	0.1129	12	0.0399	30	0.0005
3	0.4790	8	0.0876	13	0.0341	40	0.0000
4	0.3070	9	0.0699	14	0.0295		
5	0.2092	10	0.0570	15	0.0257		

Figura 21. Decaimiento del índice de gradualidad de daño de la granada M26M.

4.3.3. Caracterización en laboratorio de la M26M.

Se radiografió el cuerpo de acero utilizando un sistema de rayos “x”, marca V.J. Technologies modelo VJ20-450kv, con tubo de rayos “x” marca Comet, modelo MXR-451HP/11 con potencias de 700 watt/ 1500 watt; en la Tabla 16 se detalla el espesor de la pared de la granada M26M dependiendo de la zona teniendo espesores desde 1.1570 mm hasta 4.6626 mm.

Tabla 16 Espesores de pared de la granada M26M.



	Pos	Der	Izq
A	1	4.5903	4.6626
	2	4.0991	3.9742
	3	3.6359	3.4258
B	4	1.7840	1.9142
C	5	2.6490	2.7366
D	6	1.2197	1.3791
E	7	2.5032	2.4889
F	8	1.2844	1.1570
G	9	2.5354	2.7698
	10	2.5661	2.4969
H	11	1.6399	1.5877
I	12	2.4303	2.6654
	13	2.5313	2.4719
	14	2.3864	2.4621
	15	2.3254	2.4702
Promedio		2.5454	2.5775
Desv. Std.		0.9499	0.9263
Máximo		4.5903	4.6626
Mínimo		1.2197	1.1570

4.3.4. Pruebas de fragmentación del cuerpo de la granada M26M.

La prueba de fragmentación busca obtener los fragmentos producto de la explosión de la carga de explosivo contenida en el cuerpo, para esta prueba se cargó el cuerpo M26M con 120 g de explosivo TNT, se utilizó un detonador eléctrico del número 8 de la marca Austin powder y se colocó el cuerpo cargado y cebado en arena con el fin de contener y poder recuperar los fragmentos generados como se ilustra en la Figura 22.

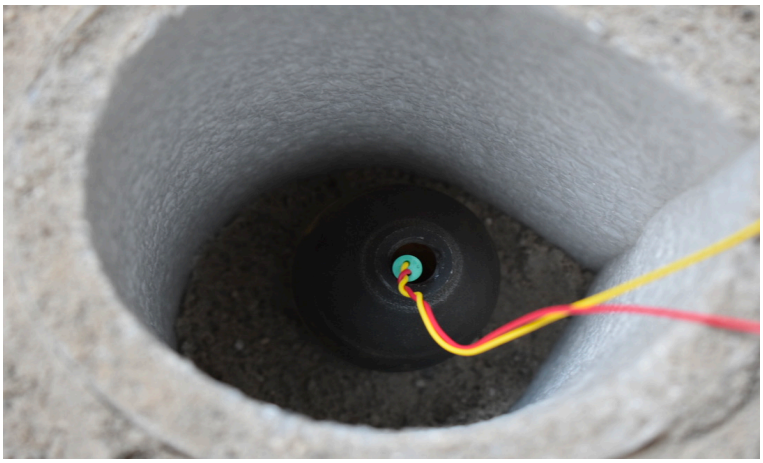


Figura 22. Arreglo para la prueba de fragmentación de la granada M26M.

La recuperación de fragmentos se realizó utilizando imán el cual se hizo pasar por la arena recuperada después de la explosión los cuales se separaron, cuantificaron y pesaron cada uno de los fragmentos (ver Figura 23), utilizando una balanza de la marca mettler toledo modelo MS1602TS/00 capacidad máxima de 1620g y división de 0.01g



Figura 23. Tamaño de fragmentos del cuerpo de la granada M26M.

Se realizó el registro de los pesos de cada fragmento recuperado para cada una de las cinco granadas de M26M sometidas a la prueba de fragmentación, con anterioridad a la prueba se pesó el cuerpo vacío como después de carga generando con estos datos la Tabla 17, donde se observa el promedio de fragmentos que genera el cuerpo de la granada M26M es de 70 fragmentos, con un peso promedio por fragmento de 3.90 g.

Tabla 17 Datos de peso y número de fragmentos de la granada M26M.

Granada	W_{cv}	W_{cc}	W_{tnt}	W_{tf}	$W_{cv} - W_{tf}$	W_{fmin}	W_{fmax}	W_{pf}	N_{tf}	N_{fa}	N_{tfa}
1	320.46	440.02	119.56	272.13	48.33	0.23	11.82	3.49	78	14	92
2	319.87	439.43	119.56	268.59	51.28	0.08	15.49	4.20	64	12	76
3	320.35	439.91	119.56	247.86	72.49	0.08	9.65	3.40	73	21	94
4	323.86	442.83	118.97	255.65	68.21	0.12	14.64	4.65	55	15	70
5	321.58	441.11	119.53	295.74	25.84	0.05	11.16	3.79	79	7	86
Promedio	321.22	440.66	119.44	267.99	53.23	0.11	12.55	3.90	70	14	84
Desv. Std.	1.60	1.36	0.26	18.34	18.53	0.07	2.44	0.52	10	5	10

Donde:

W_{cv} Peso cuerpo acero (g).
W_{cc} Peso cuerpo de cargado (g).
W_{tnt} Peso de TNT (g).
W_{tf} Peso total de los fragmentos (g).
W_{fmin} Peso del fragmento menor (g).
W_{fmax} Peso del fragmento mayor (g).
W_{pf} Peso medio de fragmento (g).
N_{tf} Número total de fragmentos.
N_{fx} Número de fragmentos a x metros.
N_{fa} Número de fragmentos de ajuste.
N_{tfa} Número total de fragmentos ajustado.

4.3.5. Mediciones de velocidad de fragmento de la granada M26M

La prueba de velocidad se realizó a una muestra de cinco granadas M26M, utilizando una cámara de alta velocidad de la marca Photron modelo Fastcam SA-Z y óptica marca Nikon 28-105 mm (ver Figura 24).



Figura 24. Cámara de alta velocidad FASTCAM SA-Z.

Los cuerpos cargados con explosivo se colocaron sobre placa de 50cm x 50cm de acero en la posición de acostado como se muestra en la Figura 25.

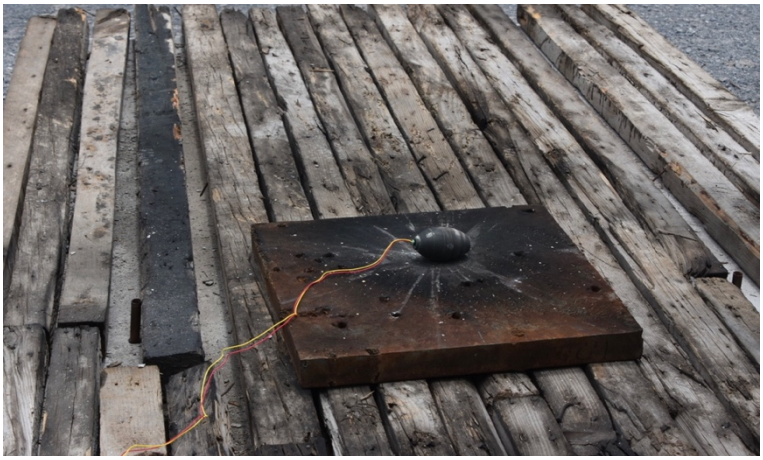


Figura 25. Posición del cuerpo de la granada M26M en placa de acero.

La detonación de la granada se realizó a distancia utilizando detonador eléctrico del número 8, de la marca Austin powerd (ver Figura 26).



Figura 26. Detonación de la granada M26M.

Las grabaciones con la cámara de alta velocidad se realizaron a una velocidad de 50,000 fps (ver Figura 27), obteniéndose los videos para cada una de las cinco muestras probadas.

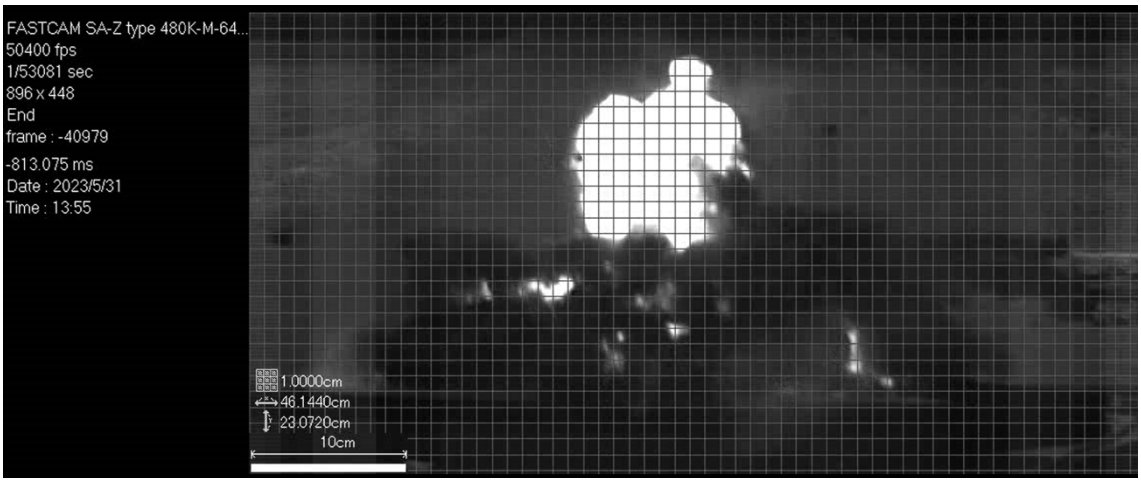


Figura 27. Grabación de video a 50,000 fps de la explosión de la granada M26M.

Tabla 18. Velocidad de fragmento de la granada M26M.

Granada	Wcv	Wcc	Wtnt	Vof (m/s)
1	319.90	439.84	119.94	632.91
2	296.19	416.50	120.31	619.95
3	316.26	436.00	119.74	652.39
4	317.47	436.84	119.37	635.14
5	319.00	438.29	119.29	647.44
Promedio	313.76	433.49	119.73	**637.57**
Desv.Std.	9.92	9.61	0.42	12.80

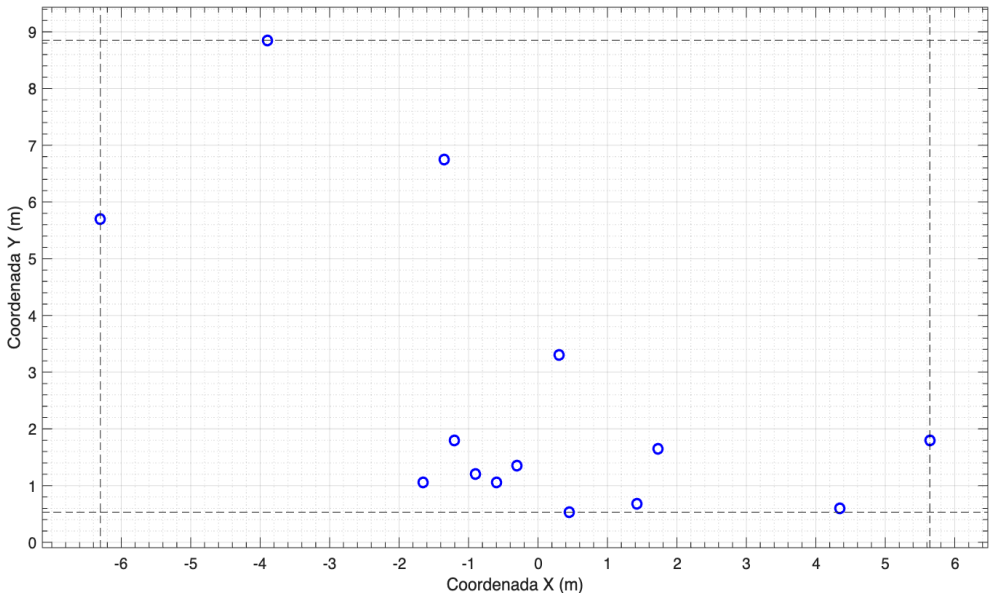


Figura 28.Densidad y distribución de fragmentos de la granada M26M.

Conclusión

La M26M a diferencia de la granada MKIIIA3, esta presenta un mecanismo de daño preponderantemente secundario, es decir por fragmentación natural fija. Los fragmentos recuperados en las pruebas de laboratorio de campo arrojaron un peso promedio de 3.90 g, con picos de hasta 15.49 g. Debido a esta elevada masa, aunque la velocidad inicial es moderada (~637 m/s), los fragmentos conservan una inercia masiva. A distancias de 15 a 20 m, un fragmento de la granada M26M mantiene niveles de energía superiores a los 400 J, excediendo por un factor de 5 el umbral de fragmento peligroso (79 J)

Además, la granada M26M presenta una baja densidad de fragmentación, lo que compromete la eficacia de neutralización.

Capítulo 5.

Diseño del sistema FUGRAD

Como se ha mencionado anteriormente el diseño del sistema FUGRAD no se concibe como un producto estático, sino como una plataforma modular configurable. La secuencia metodológica planteada en este capítulo 4 integra la ingeniería inversa de granadas ya existentes (MKIIIA3 y M26M), el modelado estocástico de consecuencias bioscópicas y la validación experimental para alcanzar un nivel de madurez tecnológica TRL_4.

5.1. Observación y reporte de principios básicos (TRL_1)

El conocimiento científico consultado, observado y que se desarrolla en el capítulo 2 marco teórico conceptual, sienta las bases teóricas para la arquitectura del sistema FUGRAD y su formulación matemática, al identificar los fenómenos físicos de la detonación, la mecánica de fractura de contenedores metálicos y la propagación de ondas de choque en el entorno. En el análisis del marco normativo y conceptual se identificó la necesidad de que el armamento utilizado por las fuerzas del orden cumpla con principios de proporcionalidad y necesidad, lo que lleva a repensar el diseño de los sistemas de armas. En la Tabla 19 se sintetizan los conceptos y parámetros clave que conforman la base metodológica para el diseño del sistema FUGRAD.

Tabla 19. Bases teóricas y conceptuales utilizadas en el sistema FUGRAD.

Dimensión del Diseño	Concepto / Parámetro clave	Base matemática / Técnica	Propósito Táctico y de Diseño
Arquitectura Modular	Configurabilidad de Plataforma	Diseño de doble cámara (explosión/fragmentación)	Permitir ajustar el nivel de daño según el escenario operativo [53], [54]
	Commonality (Partes Comunes)	Índice de similitud (IC) entre familias de productos	Reducir costos logísticos y facilitar la reusabilidad de componentes [55], [56].
Daño primario (Pshock)	Sobrepresión de onda de choque	Polinomios de Kingery-Bulmash y Ley de Hopkinson-Cranz $(Z = R / (W_E\^(1/3)))$	Caracterizar el radio de letalidad por hemorragia pulmonar en el campo cercano [18], [57], [58]
	Transformación Probit (Vulnerabilidad)	Y(Pp)=a+bln(V)	Convertir estímulos de presión en probabilidades de muerte bioscópica [19].
Daño secundario (Ph·Pfrag)	Balance energético (Gurney)	Ecuación de Gurney para geometría simétricas	Determinar el límite superior de la velocidad de los fragmentos [12], [59]
	Saturación Balística (Poisson)	$P_h(n) = \frac{e^{-\lambda}\lambda^n}{n!}$	Garantizar un impacto certero en el blanco mediante una alta densidad de fragmentos [13].
	Gradualidad por inercia (Decaimiento)	Regla de los 79 J $V_R = V_0 \cdot e^{-(R/L)}$	Lograr que los fragmentos pierdan su letalidad antes de alcanzar a la población civil [12], [13].
Daño terciario (Pdesp)	Letalidad por deslazamiento	Modelo Probit basado en el impulso específico	Evaluar daños por impacto de cuerpo entero contra obstáculos solidos [12], [19].
Sistema del Índice de Daño Gradual	Ecuación de agregación estocástica	$IDG(R,\mathrm{X}) = 1 - \prod_{i=1}^{n}\left(1 - P_i(R)\right)$	Integrar todos los mecanismos de daño en un indicador único de probabilidad de neutralización

En este nivel de maduración tecnológica quedan trazadas las líneas teóricas a seguir, modelando las primeras ideas primigenias que formaran parte de la invención del sistema FUGRAD.

5.2. Formulación del concepto Tecnológico (TRL_2).

La formulación del concepto FUGRAD parte de un diagnóstico crítico del estado de la técnica. Las granadas de fragmentación convencionales, como la M26M, operan bajo un modelo de letalidad errática. Como se ha analizado en las memorias de cálculo previas, un fragmento de acero de 2.76 g bioscópica 3.9 g proyecta a velocidades de Gurney (aproximadamente 1279 m/s) posee una inercia tal que su energía cinética residual a 15 m (aprox. 1091 J) supera por un factor de 13 el umbral de fragmento peligroso de 79 J. Esto implica que, aunque la probabilidad de impacto (Ph) disminuya con la distancia, la letalidad intrínseca permanece estancada en el 100%, generando un riesgo colateral inaceptable en entornos urbanos densos.

A partir del análisis de la literatura científica indexada en Web of Science y Scopus, así como del registro internacional de patentes que se desarrolla en el capítulo 3 se muestra que la prospectiva tecnológica revela un cambio de dirección en el diseño de artefactos explosivos de mano, alejándose de modelos estáticos hacia sistemas dinámicos inteligentes. De ahí que las tres tendencias más fuertes en el diseño de estos dispositivos de liberación de energía y proyección de fragmentos sean los siguiente:

1. **Configuración modular**: La tendencia más fuerte, aunque poco materializada en el mercado comercial actual, es la búsqueda del modularidad. Se intenta transitar hacia productos que permitan variar la carga explosiva o la fragmentación según la misión.

2. **Minimización del daño colateral**: Otra tendencia creciente es el de minimizar el daño colateral para la población civil. Esto impulsa la investigación en proyectiles de baja inercia que colapsen cinéticamente en distancias cortas.

3. **Integración de la gradualidad**: Aunque la revisión de patentes muestra que la mayoría de los dispositivos actuales poseen efectos fijos, la tendencia apunta a la necesidad de controlar tanto el alcance como la magnitud de la onda de choque en un solo dispositivo configurable.

El concepto tecnológico para este nivel de madurez del sistema FUGRAD propone la Gradualidad del daño a través de configuración modular. Este concepto define el daño no como un evento binario, sino como una variable estocástica controlada por el diseño del contenedor y la carga. El objetivo es forzar un colapso deliberado y coordinado de los tres mecanismos de daño (primario, secundario y

terciario) para que el índice de daño gradual caiga de niveles de saturación (0.80) en el blanco a niveles de seguridad civil (0.1).

Para el diseño del sistema FUGRAD se ha adoptado la teoría de plataformas modulares para productos. FUGRAD no se concibe como un diseño único sino como una familia de productos que comparten un núcleo común para maximizar la eficiencia de manufactura y la reusabilidad.

Los siguientes esquemas de granadas propuestas forman parte de los primeros modelos conceptúales de la granada. La Figura 29 muestra un modelo conceptual conformado por tres secciones que conforman la parte externa del cuerpo de la granada, en las secciones 1 y 3 se consideran ventilas que se pueden abrir o cerrar, estas tienen la finalidad de liberar energía y con ello reducir el alcance de los fragmentos siendo en este modelo balines de acero de 2 mm que se alojarían en su mayoría en la sección 2; la sección 3 puede retirarse para extraer los balines y después colocarse nuevamente y así eliminar el efecto de fragmentación de la granada.

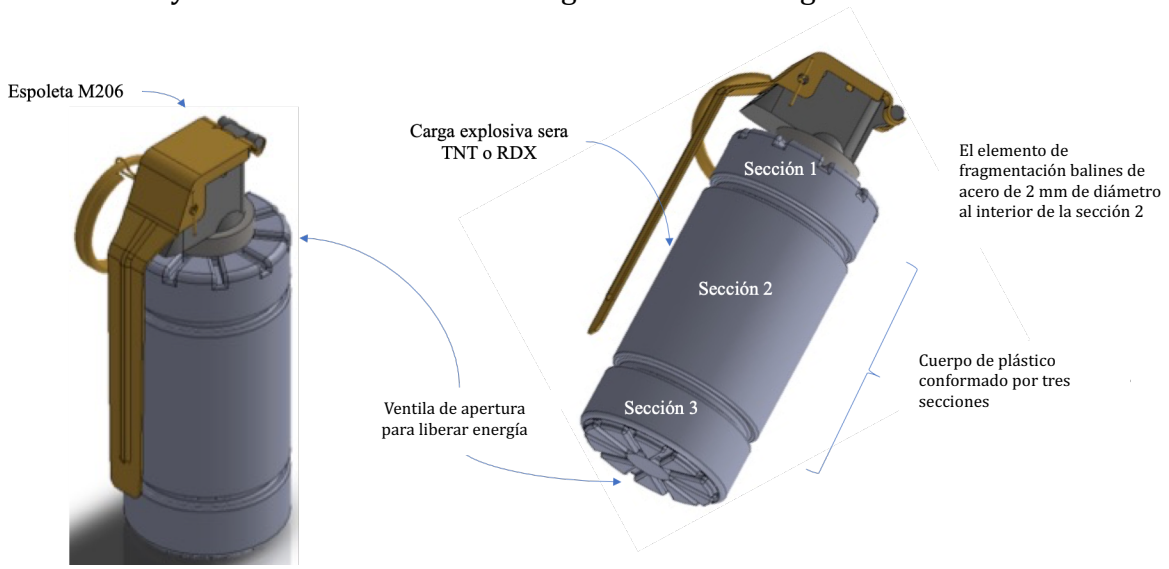


Figura 29. Modelo conceptual de la granada a base de cuerpo de polímero.

En la Figura 30 se muestra un modelo conceptual de una granada con cuerpo de acero dividido en secciones los cuerpos de acero presentan un estampado de una figura hexagonal de 2 mm por lado induciendo la falla de fragmentación, cada sección es retirable de la granada reduciendo con esto el número de fragmentos que se producirían, así mismo cuanta con una apertura inferior para liberar energía y con ello disminuir el alcance de las esquirlas.

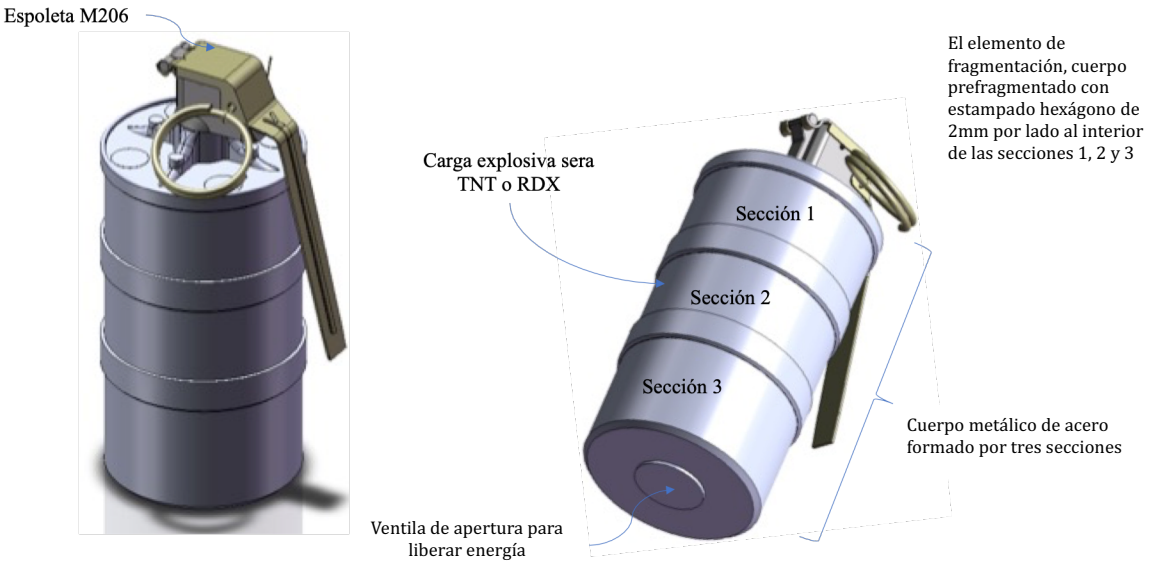


Figura 30. Modelo conceptual de la granada con cuerpo de acero.

Las características principales sobre los efectos que producirán estos primeros conceptos se muestran en la Tabla 20 donde también se conserva la diferencia de los efectos entre ambos conceptos.

Tabla 20. Características de los conceptos propuestos.

Característica	Concepto Figura 29	Concepto Figura 30
Alcance de fragmento variable	Si	Si
Número de fragmento variable	No	Si
Onda de choque variable	Si	Si
Eliminación del efecto de fragmentación	Si	No

5.3. Función crítica analítica y experimental y prueba de concepto (TRL_3)

Partiendo de los conceptos anteriores se refino el diseño a partir de criterios de seguridad, fiabilidad y uso, con lo que en la Figura 31 se muestran los componentes principales de sistema FUGRAD.

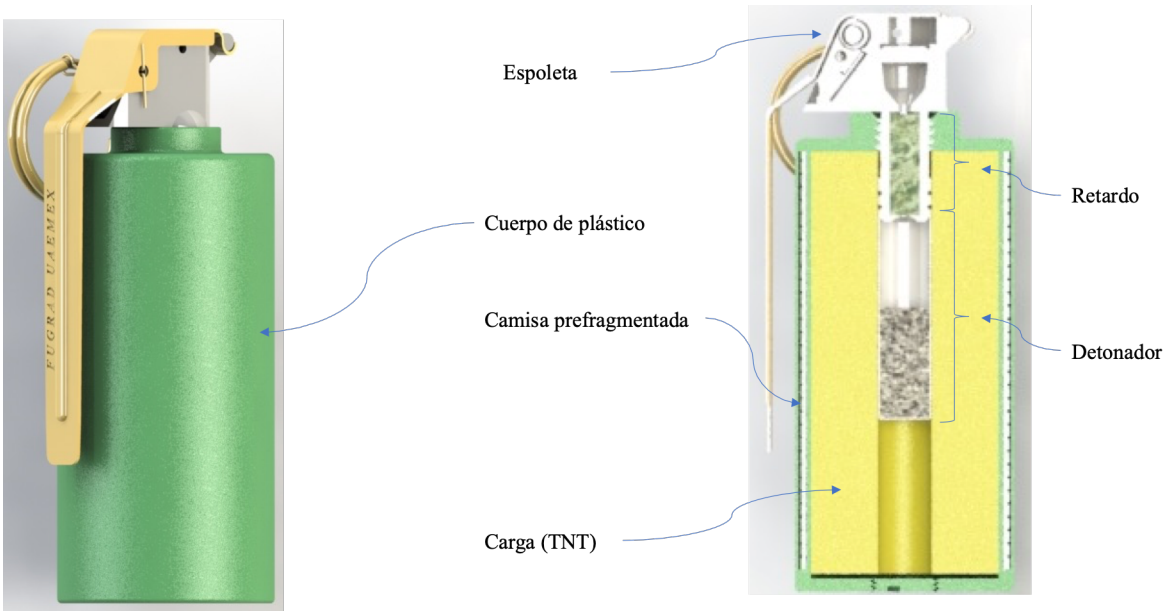


Figura 31. Diseño de la FUGRAD, componentes principales.

Como producto de este diseño se transitó de un concepto de fragmentación de balines de acero a un cuerpo de acero prefragmentado (Figura 32), ganando este diseño la versatilidad de poder modificar el tamaño de los fragmentos sin afectar las dimensiones de los demás componentes de la granada, situación que el concepto original a base de balines no permitía.

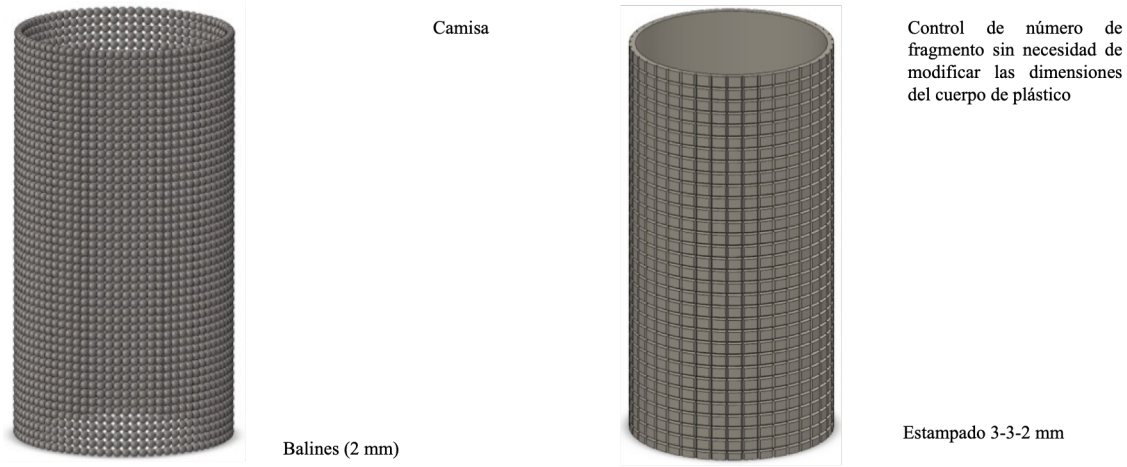


Figura 32. Diseño de la camisa prefragmentada.

En la definición del cuerpo de la granada que contendrá la carga explosiva se definió por un cuerpo con dos cámaras internas (Figura 33), la de mayor tamaño que contendrá al explosivo y la de menor tamaño alojará la camisa prefragmentada u otro componente que dote a la granada de algún otro efecto que se desee tener dando paso a la posibilidad a desarrollos futuros de una familia de productos.

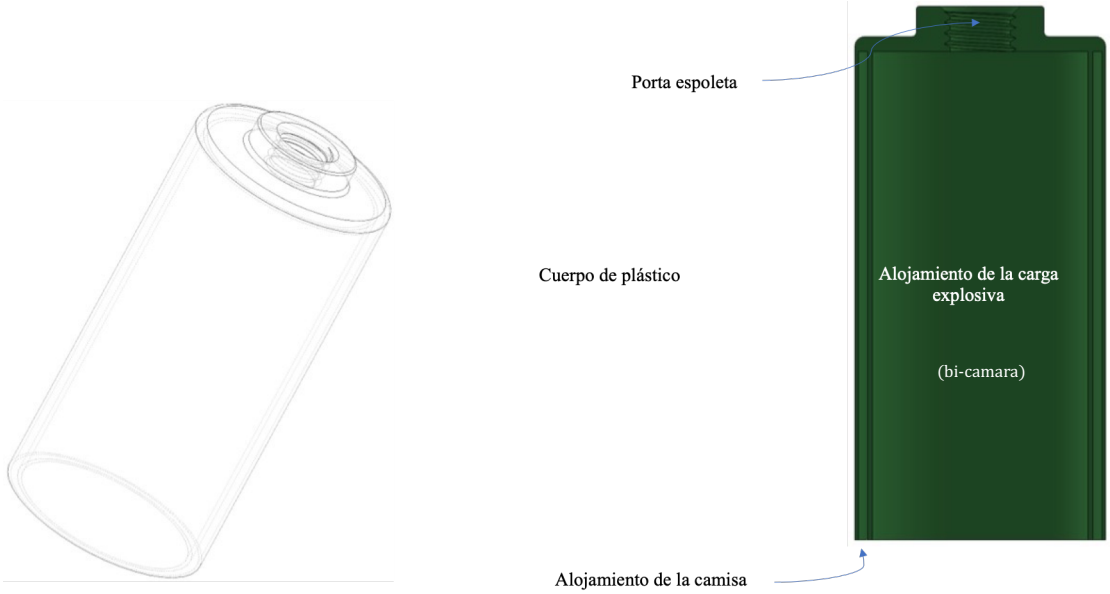


Figura 33. Diseño del cuerpo de polímero de la FUGRAD.

En el diseño de la espoleta se mantiene el concepto de accionamiento mecánico, detallando sus componentes e integración como se muestra en la Figura 34.

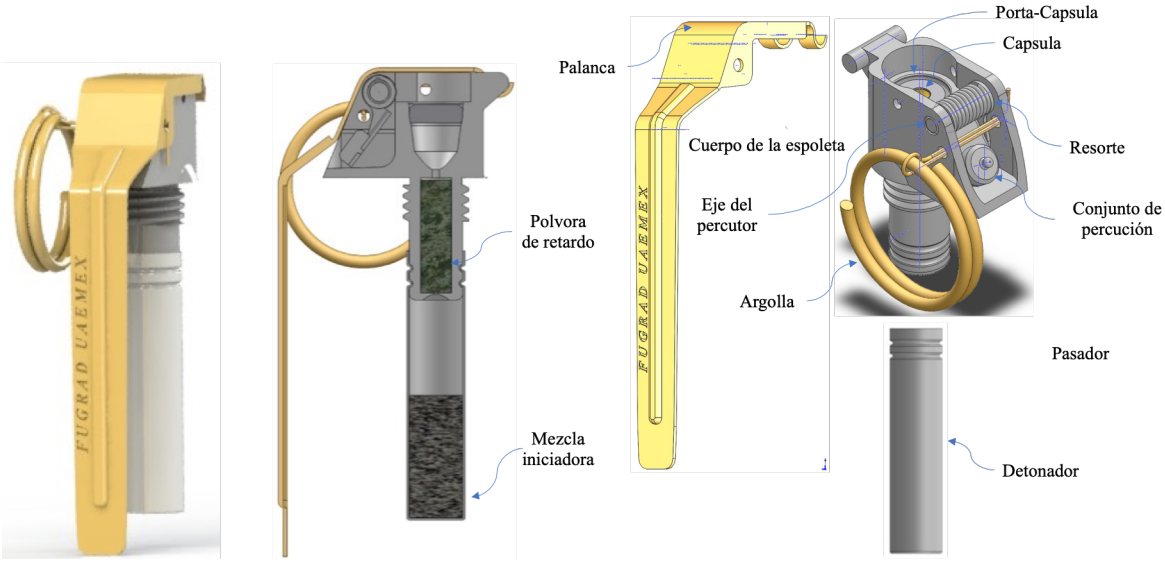


Figura 34. Diseño de la espoleta de la FUGRAD (componentes).

Como parte de las estimaciones de las características de la granada FUGRAD se aplicó el algoritmo para el calculó del índice de daño gradual (IGD) y conocer la

proyección de la intensidad de daño que produciría a una persona dependiendo de la distancia a la que se encuentre con respecto a la FUGRAD.

5.4. Aplicación del algoritmo de IGD(R) para el sistema FUGRAD

Paso 1. Requerimientos de entrada.



Características principales

a) Espoleta modelo M206
b) Cuerpo de polímero PLA con camisa de acero
c) Explosivo TNT
d) Carga 165 g
e) Altura del cuerpo 131 mm
f) Diámetro interior 45 mm
g) Espesor de pared de acero 2 mm
h) Peso del cuerpo W_c=100 g (0.100 kg)
i) Densidad de carga 1.25 g/cm^3

$R = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 20, 30, 40]$m
$n = 2$, factor de forma para Gurney
$m_f = 0.1488$ g
Ntf = 672

Paso 2. Evaluación de efectos primarios.

1. El tipo de explosivo es TNT ∴ W_E=0.165kg
2. Distancia escalada Z(R):

Tabla 21. Distancia escalada relacionada con la carga explosiva de FUGRAD.

R (m)	Z(R) (ft/lb$^{1/3}$)	R (m)	Z(R) (ft/lb$^{1/3}$)
1	4.596	10	45.957
2	9.191	11	50.552
3	13.787	12	55.148
4	18.383	13	59.744
5	22.978	14	64.339
6	27.574	15	68.935
7	32.170	20	91.913
8	36.765	30	137.870
9	41.361	40	183.827

3. Cálculo de la presión incidente P:

Tabla 22. Datos de sobrepresión generada por FUGRAD.

R (m)	P (psi)	P (Pa)	R (m)	P (psi)	P (Pa)
1	50.9765	351470.816	10	0.9942	6854.846
2	11.2606	77639.340	11	0.8821	6082.158
3	5.3784	37082.601	12	0.7904	5449.755
4	3.3996	23439.386	13	0.7138	4921.506
5	2.4560	16933.284	14	0.6479	4467.090
6	1.9131	13190.268	15	0.5880	4053.951
7	1.5621	10770.329	20	0.3923	2704.828
8	1.3165	9077.093	30	0.2218	1529.149
9	1.1347	7823.293	40	0.1480	1020.260

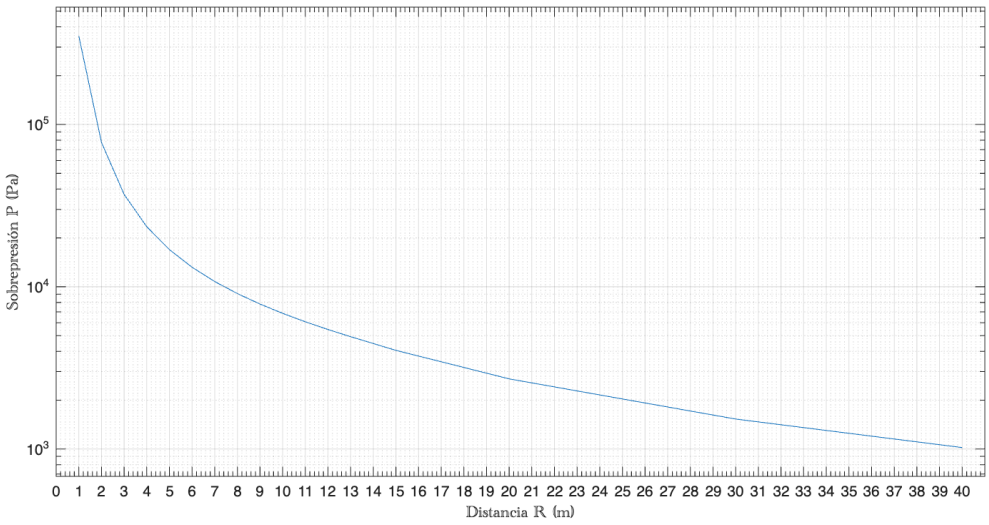


Figura 35. Pico de sobrepresión generada por FUGRAD.

4. Probabilidad por onda de choque P_{shock}. Modelo Probit

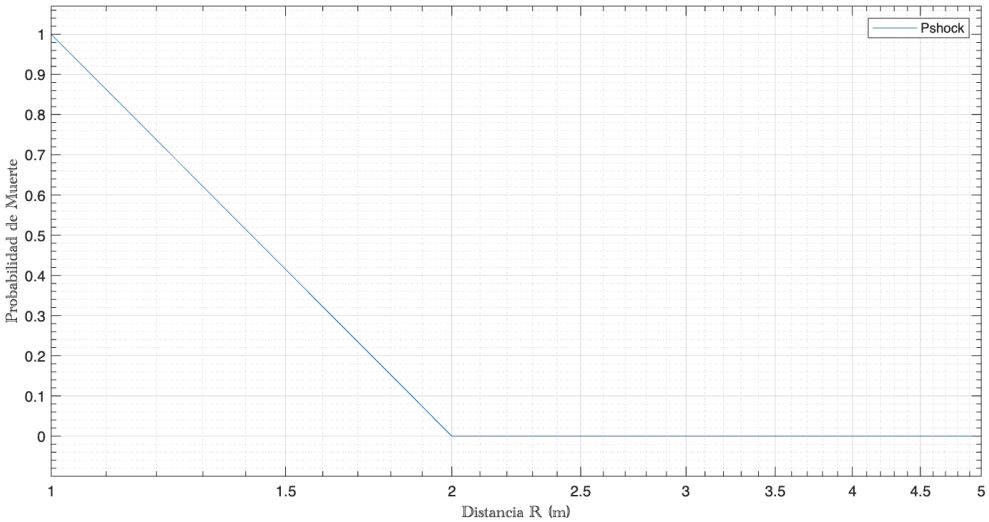


Figura 36. Probabilidad de muerte por incidencia de la onda de choque de FUGRAD.

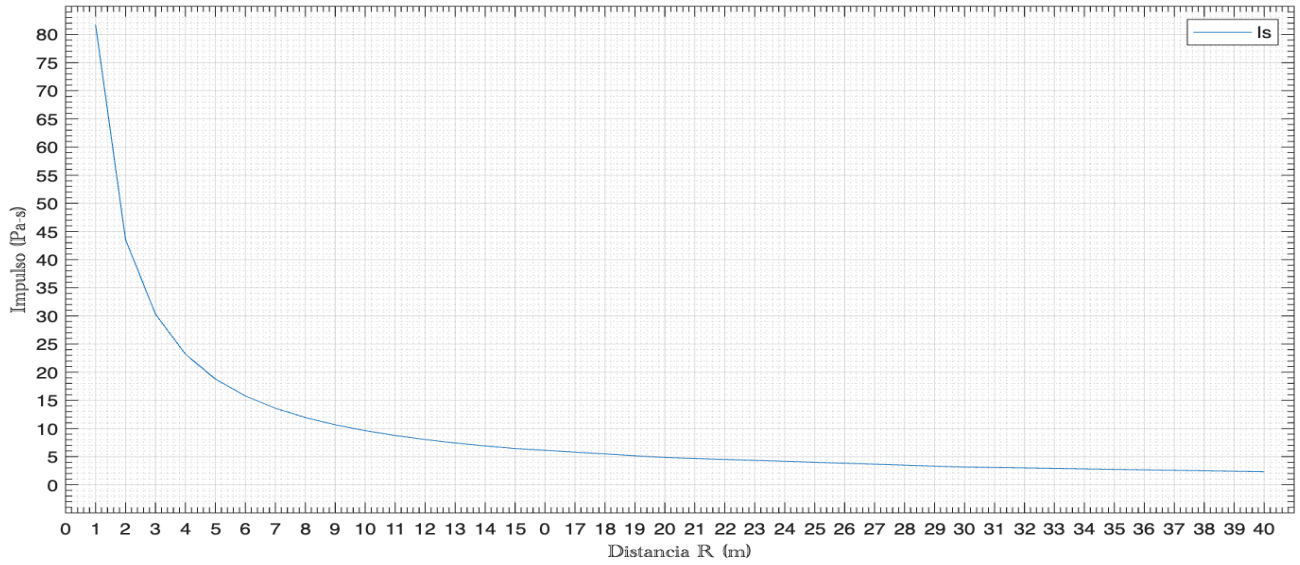
Paso 3. Evaluación de efectos Secundarios

Tabla 23. Datos característicos del mecanismo por daño secundario de FUGRAD.

R (m)	VR (m/s)	Ec (J)	q(R) (#f/m²)	Ph	Pfrag	Ph*Pfrag
1	1768.18	232.623	53.476	1.0000	1.000	1.0000
2	1658.00	204.535	13.369	0.9996	1.000	0.9996
3	1554.68	179.838	5.942	0.9681	1.000	0.9680
4	1457.80	158.123	3.342	0.8561	1.000	0.8559
5	1366.95	139.030	2.139	0.7108	1.000	0.7104
6	1281.77	122.243	1.485	0.5775	0.999	0.5769
7	1201.90	107.482	1.091	0.4690	0.998	0.4681
8	1127.00	94.504	0.836	0.3841	0.996	0.3827
9	1056.77	83.093	0.660	0.3181	0.994	0.3161
10	990.92	73.060	0.535	0.2667	0.989	0.2638
11	929.17	64.238	0.442	0.2261	0.982	0.2220
12	871.27	56.481	0.371	0.1938	0.971	0.1882
13	816.98	49.661	0.316	0.1677	0.956	0.1603
14	766.07	43.665	0.273	0.1464	0.934	0.1367
15	718.33	38.393	0.238	0.1288	0.904	0.1164
20	520.72	20.175	0.134	0.0746	0.626	0.0467
30	273.64	5.571	0.059	0.0339	0.049	0.0017
40	143.80	1.538	0.033	0.0192	0.000	0.0000

Paso 4. Evaluación de efectos terciarios

1. Cálculo del impulso específico (I_s) para cada (R)



R (m)	Is (psi-ms)	Is (Pa-s)	R (m)	Is (psi-ms)	Is (Pa-s)	R (m)	Is (psi-ms)	Is (Pa-s)	R (m)	Is (psi-ms)	Is (Pa-s)
1	11.704	81.748	6	2.257	15.768	11	1.253	8.750	20	0.692	4.834
2	6.240	43.586	7	1.946	13.591	12	1.150	8.032	30	0.450	3.143
3	4.340	30.312	8	1.710	11.942	13	1.062	7.421	40	0.332	2.316
4	3.321	23.193	9	1.525	10.649	14	0.987	6.894			
5	2.688	18.774	10	1.375	9.607	15	0.921	6.436			

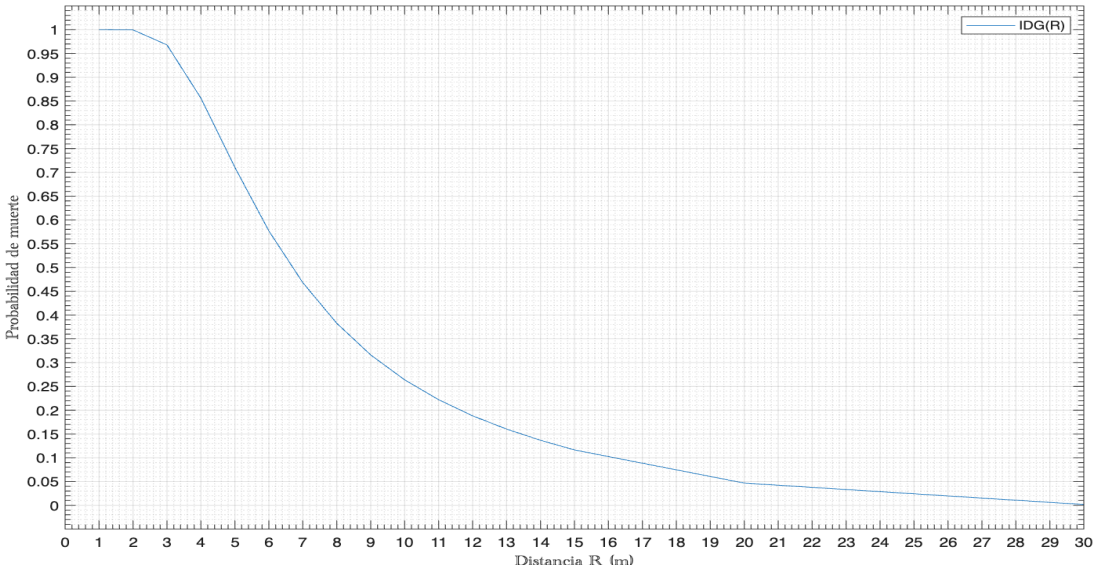
Figura 37. Curva característica de Impulso específico de FUGRAD.

2. Cálculo el valor de la función Probit para muerte por desplazamiento para cada R, ecuación 2-28 y usando la Tabla 4 obtenemos probabilidad de daño por desplazamiento P_{desp}:

Tabla 24. Probabilidad del mecanismo terciario.

R (m)	Pdesp	R (m)	Pdesp
1	0.00	10	0.00
2	0.00	11	0.00
3	0.00	12	0.00
4	0.00	13	0.00
5	0.00	14	0.00
6	0.00	15	0.00
7	0.00	20	0.00
8	0.00	30	0.00
9	0.00	40	0.00

Paso 5. Evaluación del Índice de Gradualidad de Daño IGD(R) para cada R



R (m)	IGD(R)	R (m)	IGD(R)	R (m)	IGD(R)	R (m)	IGD(R)
1	1.0000	6	0.5769	11	0.2220	20	0.0467
2	0.9996	7	0.4681	12	0.1882	30	0.0017
3	0.9680	8	0.3827	13	0.1603	40	0.0000
4	0.8559	9	0.3161	14	0.1367		
5	0.7104	10	0.2638	15	0.1164		

Figura 38. Decaimiento del índice de gradualidad de daño de FUGRAD.

Conclusión.

La evaluación del modelo FUGRAD muestra una mayor eficacia de los mecanismos de daño, preponderantemente el secundario al tener control sobre la cantidad y peso de los fragmentos al tener una mayor densidad de fragmentos, al mismo tiempo que estos fragmentos pierden su capacidad de perforación al cruzar el umbral de los 10 m, en el caso de retirar la camisa prefragmentada se reduce su letalidad a niveles de la granada MKIIIA3.

5.5. Comparación de las características de los modelos MKIIIA3, M26M y FUGRAD.

En la evaluación teórica de los 3 modelos se tiene que el mecanismo de daño primario por onda de choque producto de la carga explosiva, el modelo MKIIIA3 es la que genera el mayor pico de sobrepresión como se muestra en la Figura 39 esto no representa una diferencia sustancial en probabilidad de muerte por este mecanismo comparado con los modelos M26M y FUGRAD como se muestra en la Figura 40.

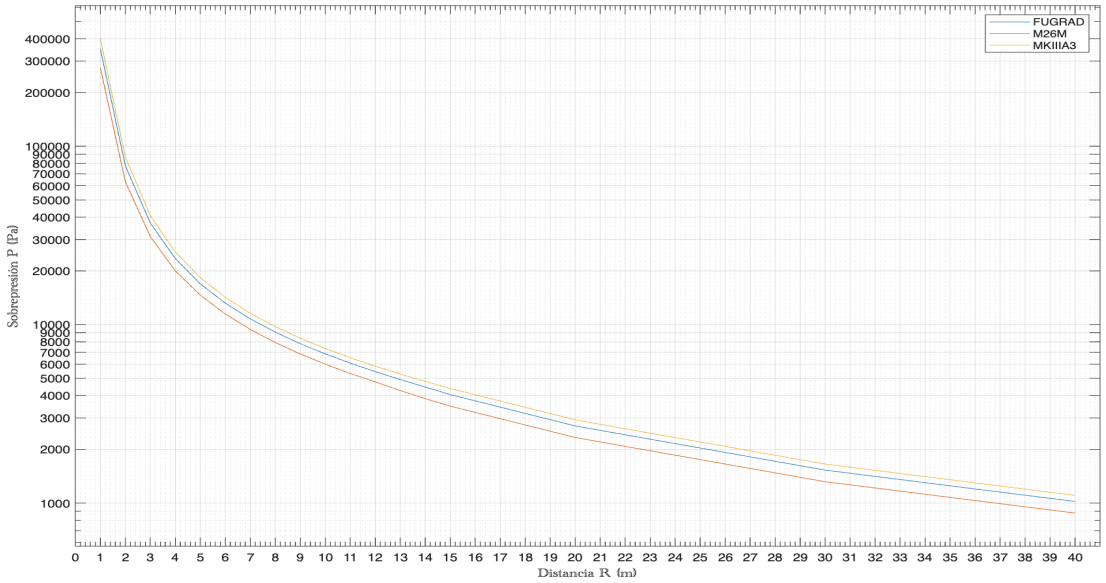


Figura 39. Comparación del pico de sobrepresión con respecto a la distancia.

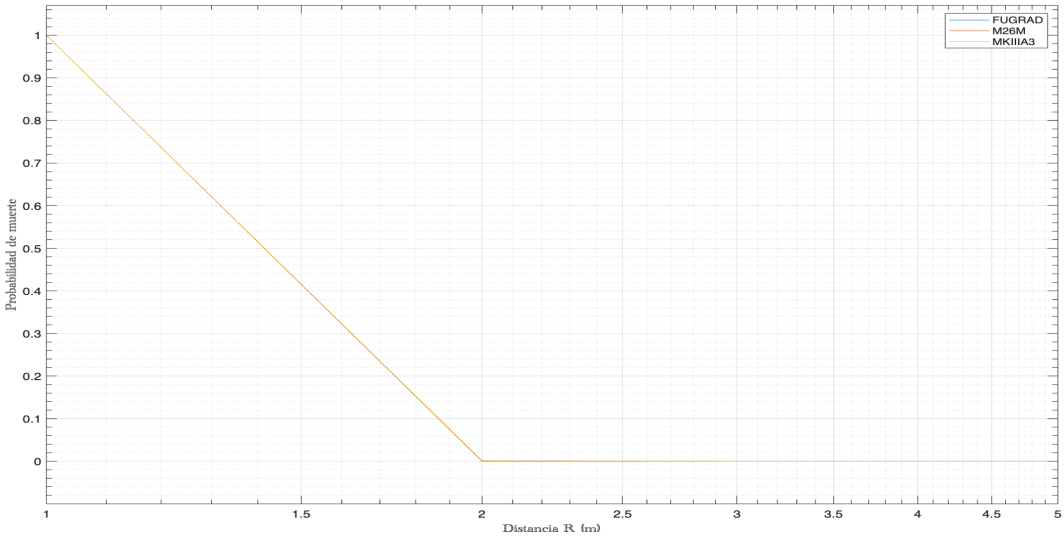


Figura 40. Probabilidad de muerte por mecanismo primario, comparación.

Por lo que se refiere al mecanismo de daño secundario, solo está presente en los modelos de granadas M26M y FUGRAD debido a que la granada MKIIIA3 no presenta fragmentación; en el caso de los dos primeros modelos la energía cinética de los fragmentos es mayor en la granada FUGRAD en los primeros 20 m, en comparación con

la granada M26M (ver Figura 41), el modelo FUGRAD presenta una mayor densidad de fragmentos en los primeros 10 m, en comparación con la granada M26M (ver Figura 42).

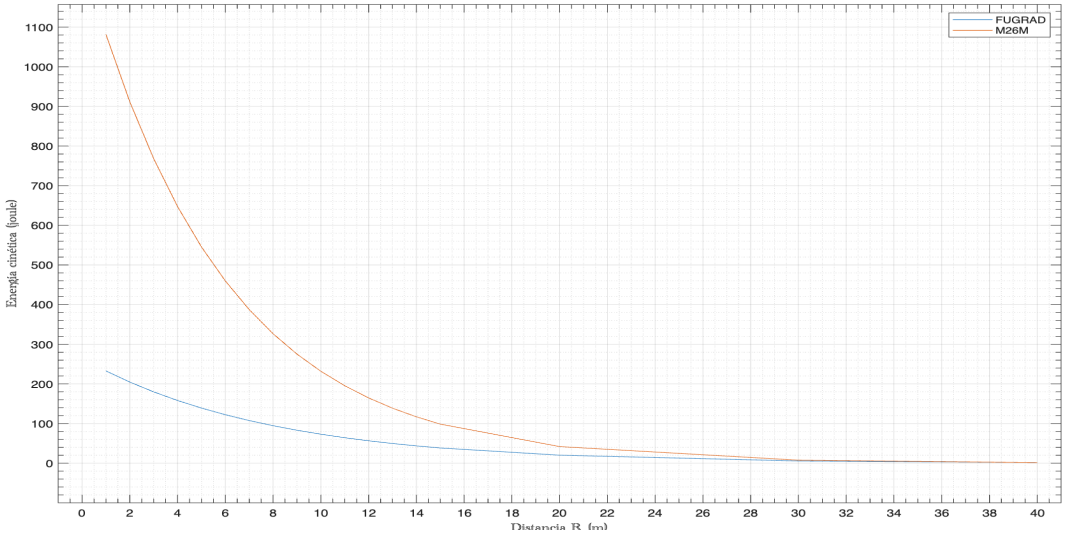


Figura 41. Comparación del decaimiento de la energía cinética del fragmento promedio.

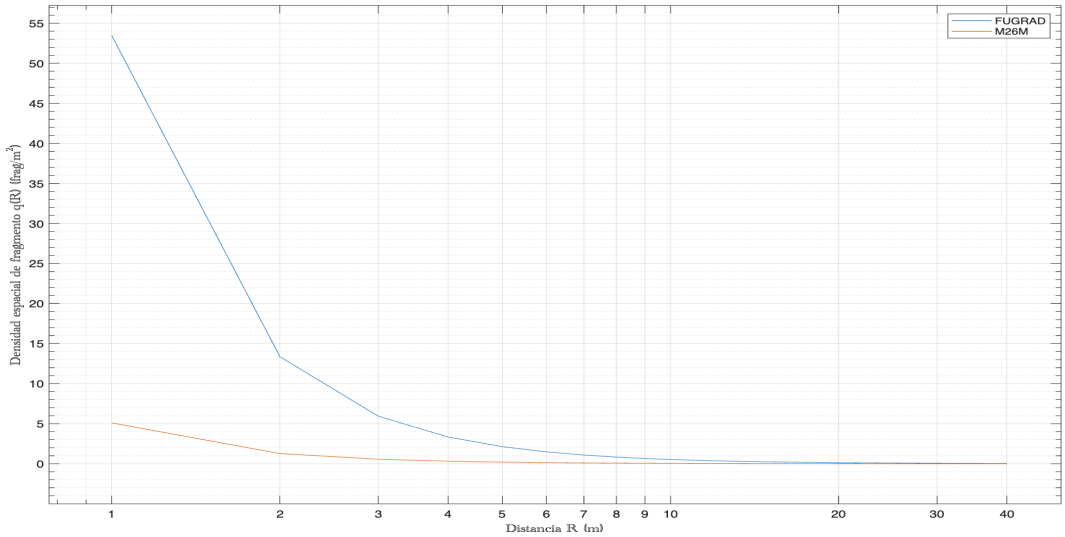


Figura 42. Comparación de la densidad de fragmento.

La granada FUGRAD al presentar un mecanismo de fragmentación preformada en comparación de la fragmentación natural de la granada M26M se mejora la probabilidad de impacto como se muestra en la Figura 43 al mismo tiempo de generar el colapso de la probabilidad de que el fragmento impactado sea peligroso, como se muestra en la Figura 44.

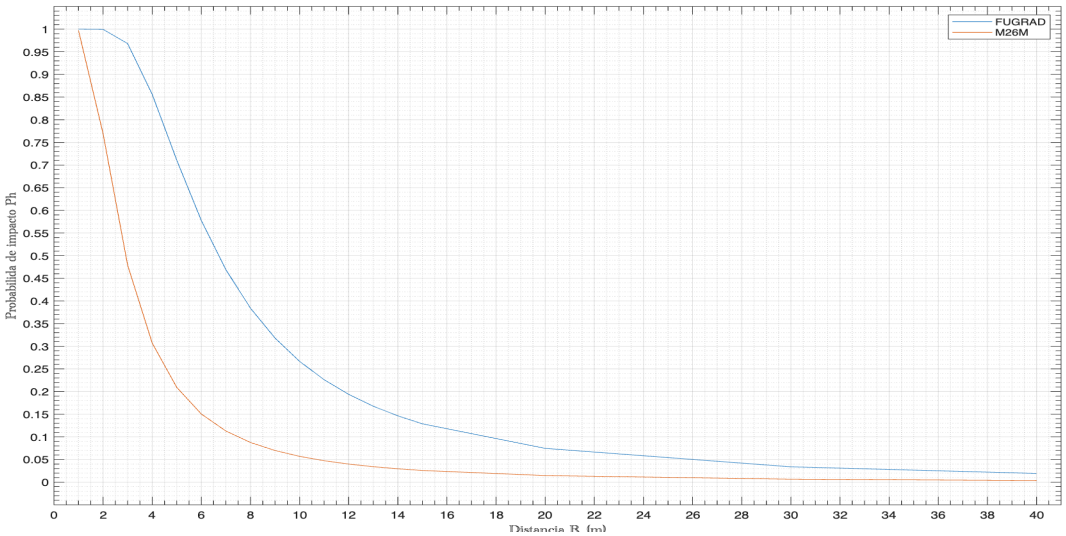


Figura 43. Probabilidad de impacto por mecanismo de daño secundario.

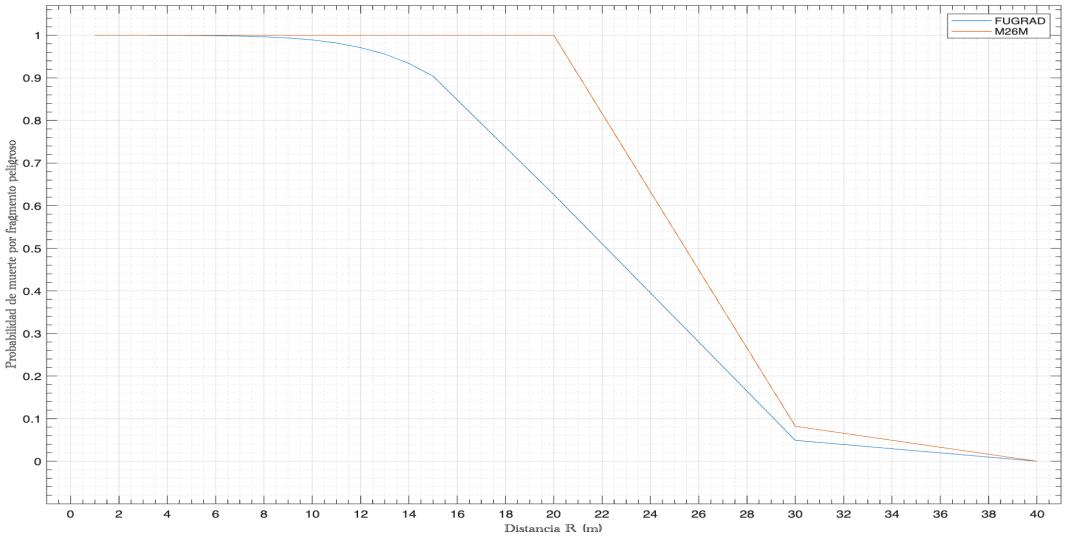


Figura 44. Probabilidad de muerte por fragmento peligroso.

Por lo que respecta al mecanismo de daño terciario en los tres modelos resulta irrelevante al no presentarse en ninguno de los modelos esto debido a la baja carga explosiva con la que cuentan.

5.6. Determinación y evaluación de los índices de comunalidad.

Para este estudio, se evalúa la arquitectura de la plataforma FUGRAD bajo una premisa de carga explosiva fija (TNT), donde la variabilidad del sistema y su Índice de Gradualidad de Daño (IGD) se modulan exclusivamente a través de la presencia, ausencia o configuración del número de fragmentos de la camisa de acero prefragmentada.

Este enfoque de diseño se basa en la capacidad del cuerpo de polímero de poseer dos cámaras internas, permitiendo la inserción o remoción de componentes de efecto secundario sin alterar la cadena cinemática de la detonación primaria.

1. Definición de la Familia de Productos FUGRAD

Para el cálculo de los índices de comunalidad, se define una familia de tres modelos tácticos fundamentales:

1. Modelo A (Conmoción): Configuración sin camisa de acero; prioriza el daño primario (onda de choque).
2. Modelo B (Fragmentación Controlada - N1): Configuración con camisa de acero de 168 marcas grandes para baja densidad de fragmentos.
3. Modelo C (Fragmentación Saturada - N2): Configuración con camisa de acero de 672 marcas cuadradas para máxima saturación.

2. Descomposición y Matriz de Piezas

A continuación, se tabulan los componentes del sistema para identificar las partes comunes y las variantes únicas:

No.	Componente	Función Técnica	Tipo	Φ_j (Frecuencia)
1	Cuerpo de Polímero	Alojamiento bi-cameral	Común	3
2	Cuerpo de Espoleta	Interfaz mecánica	Común	3
3	Palanca de Seguridad	Retención del percutor	Común	3
4	Conjunto de Percusión	Iniciación del tren	Común	3
5	Pasador y Argolla	Seguro de transporte	Común	3
6	Carga de TNT (Fija)	Fuente de energía	Común	3
7	Tapa Inferior	Cierre del alojamiento	Común	3
8	Detonador/Retardo	Tren de detonación	Común	3
9	Camisa Acero (N1)	Fragmentación suave	Única	1
10	Camisa Acero (N2)	Fragmentación letal	Única	1

- Total, de productos finales (i): 3.
- Total, de componentes distintos (d): 10.
- Componentes comunes (C): 8.
- Componentes únicos/variantes (u): 2.

3. Modelado Matemático y Memoria de Cálculo

A. Índice de Grado de Comunalidad (DCI)

El DCI (Degree of Commonality Index) mide el promedio de aplicaciones de cada parte distinta dentro de la familia.

- Fórmula: $DCI = \frac{\sum_{j=1}^{d} \Phi_j}{d}$
- Operación:

  $\sum \Phi_j = (8\ partes\ comunes\ x\ 3\ modelos) + (2\ camisas\ unicas\ x\ 1\ modelo) =$
  $24 + 2 = 26$
  $d = 10$

- Resultado: $DCI = \frac{26}{10} = 2.60$
- Justificación: Este valor indica que, en promedio, cada pieza física se utiliza en 2.6 de los 3 modelos de la familia, reflejando una estandarización superior al 80% en la línea de montaje.

B. Índice de Comunalidad Constante Total (TCCI)

El TCCI normaliza el DCI en un rango de 0 a 1 para permitir comparaciones con otros sistemas de armas.

- Fórmula: $TCCI = \frac{DCI-1}{i-1}$
- Operación:

  $i = 3\ (modelos)$

  $TCCI = \frac{2.60-1}{3-1} = \frac{1.6}{2}$

- Resultado: $TCCI = 0.80$
- Justificación: Un valor de 0.80 es extremadamente alto para armamento táctico. Indica que el diseño modular es altamente eficiente, permitiendo que el 80% de la arquitectura permanezca estática mientras se cambia radicalmente el efecto terminal de la granada.

C. Commonality Index (CI - Martin & Ishii)

Este índice es el estándar de oro para la logística militar, ya que mide la reducción de la complejidad de inventario.

- Fórmula: $CI = 1 - \frac{u}{N_{total}}$
- Operación:

  $u = 2$ $(las\ dos\ camisas\ variantes)$.
  N_{total} $(Suma\ de\ todas\ las\ piezas\ de\ todos\ los\ modelos)$:

  - M1 (Conmoción): 8 piezas
  - M2 (Frag N1): 9 piezas (8 comunes + 1 camisa)
  - M3 (Frag N2): 9 piezas (8 comunes + 1 camisa)
  - $N_{total} = 8 + 9 + 9 = 26$

- Cálculo: $CI = 1 - \left(\frac{2}{26}\right) = 1 - 0.0769$
- Resultado: $CI = 0.923$
- Justificación: El sistema FUGRAD alcanza una comunalidad del 92.3%. Esto significa que el personal logístico en el campo solo debe gestionar un 7.7% de partes diferenciadas para transformar una granada de Sobrepresión solamente a una de fragmentación letal.

4. Análisis del diseño y Commonality Index

La arquitectura modular de la FUGRAD, fundamentada en un cuerpo de polímero con cámaras independientes, permite una gradualidad de daño aguda sin los costos asociados a la fabricación de múltiples cuerpos metálicas.

1. Flexibilidad de Empleo: Al mantener la carga de TNT fija, el impulso de la onda de choque (P_{shock}) es una constante de diseño, permitiendo que el operador se concentre únicamente en la modulación del riesgo balístico ($P_h\ y\ P_{frag}$) mediante el intercambio de camisas.

2. Optimización Productiva: Un CI de 0.92 valida que el sistema FUGRAD es, desde el punto de vista de la ingeniería de manufactura, una plataforma única con accesorios de efecto, y no tres granadas diferentes.

Conclusión de la evaluación de los índices

El diseño del sistema FUGRAD demuestra una eficiencia de plataforma con un TCCI de 0.80 y un CI del 92.3%, el diseño del dispositivo cumple con la modularidad industrial. Esta configuración permite que las fuerzas del orden público ajusten el nivel de daño (gradualidad) en tiempo real o según la misión, garantizando el cumplimiento de los principios de necesidad y proporcionalidad del uso de la fuerza mediante un sistema logísticamente simplificado.

5.7. Fabricación del modelo físico experimental de la FUGRAD y pruebas de laboratorio (TRL_4)

La fabricación del modelo físico experimental (MFE) se realizó utilizando métodos de fabricación aditiva y mecanizado en torno. La camisa de la granada se fabricó por medio de impresión 3D utilizando filamento de ácido poliláctico (PLA) e impresora 3D de la marca Flashforge, modelo Creator Pro como se muestra en la Figura 45.

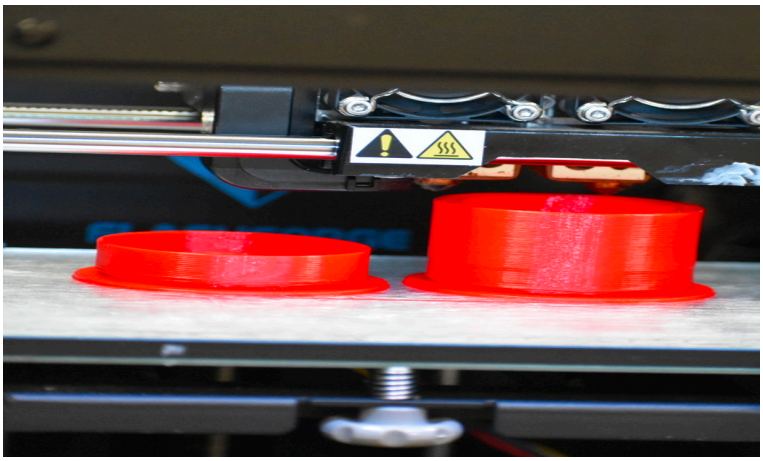


Figura 45. Fabricación del cuerpo bi-cameral de la FUGRAD.

La camisa prefragmentada se fabricó en torno convencional utilizando tubo de acero AISI 1008 sin costura donde se le dio las dimensiones conforme a diseño (ver Figura 46).

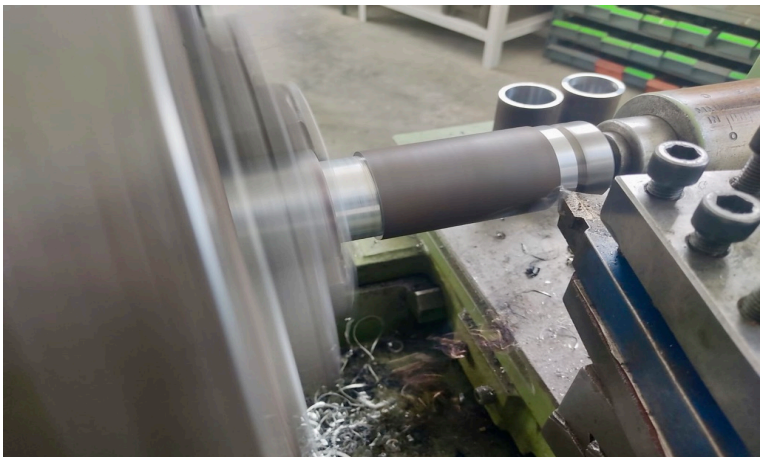


Figura 46. Proceso de fabricación de la camisa prefragmentada de la FUGRAD.

Las marcas de prefragmentado también se realizaron utilizando torno convencional generando 672 huellas de fragmento con geometría cuadrada como se observa en las figuras 47 y 48.

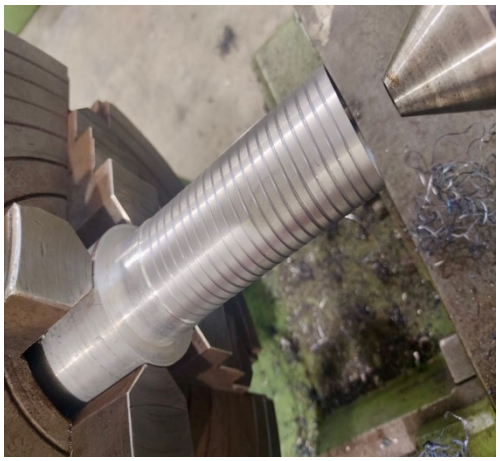


Figura 47. Marcado de huella de fragmentación en camisa.

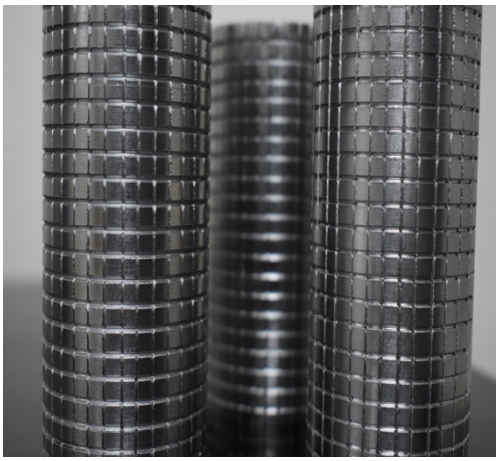


Figura 48. Camisa Prefragmentada de La Granada FUGRAD.

Una vez fabricado los componentes (ver Figura 49), se organizó y cargo con explosivo la granada, el explosivo empleado fue el trinitrotolueno (TNT), obteniendo el MFE de la granada FUGRAD (ver Figura 50).

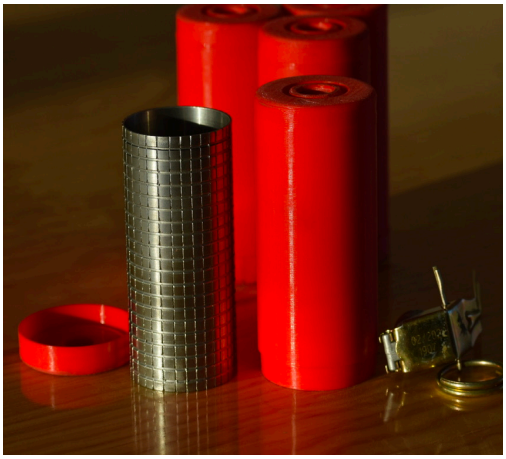


Figura 49. Componentes de la granada FUGRAD (camisa, cuerpo y espoleta).



Figura 50. Granada FUGRAD ensamblada.

5. Inspección y verificación de la calidad de los componentes

a) Inspección por radiografiado Industrial.

Se verifico la calidad de los componentes por medio de radiografiado del cuerpo de acero utilizando un sistema de rayos "x", marca V.J. Technologies modelo VJ20-450kv, con tubo de rayos "x" marca Comet, modelo MXR-451HP/11 con potencias de 700 watt/ 1500 watt; como se observa en la Figura 51 el espesor de la pared de la camisa prefragmentada es 1.98mm a lo largo de toda la camisa.

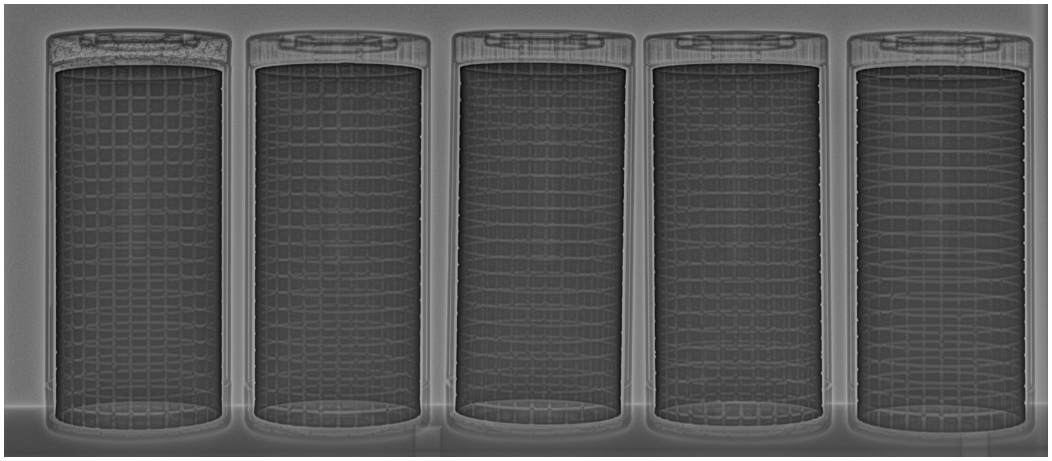


Figura 51. Imagen radiográfica de conjunto cuerpo-camisa-carga de la FUGRAD.

b) Prueba de fragmentación de cuerpo.

La prueba de fragmentación busca obtener los fragmentos producto de la explosión de la carga de explosivo contenida en el cuerpo, para esta prueba se cargó el cuerpo FUGRAD con 165g de explosivo TNT, se utilizó un detonador eléctrico del número 8 de la marca Austin powder y se colocó el cuerpo cargado y cebado en arena con el fin de contener y poder recuperar los fragmentos generados como se ilustra en las figuras 52 y 53.



Figura 52. Prueba de fragmentación de la FUGRAD en fosa de prueba.



Figura 53. Arreglo para prueba de fragmentación.

La recuperación de fragmentos se realizó utilizando un imán industrial, el cual se hizo pasar por la arena recuperada después de la explosión los cuales se separaron, cuantificaron y pesaron cada uno de los fragmentos (ver Figura 54), utilizando una balanza de la marca mettler toledo modelo MS1602TS/00 capacidad máxima de 1620g y división de 0.01g



Figura 54. Fragmentos de la granada FUGRAD.

Se realizó el registro de los pesos de cada fragmento recuperada para cada una de las cinco granadas de FUGRAD sometidas a la prueba de fragmentación, con anterioridad a la prueba se pesó el cuerpo vacío como después de carga generando con estos datos la Tabla 25, donde el promedio de fragmentos que genera el cuerpo de la

granada FUGRAD es de 301 fragmentos, con un peso promedio por fragmento de 0.3416g.

Tabla 25. Peso y número de fragmentos de la granada FUGRAD.

Test	Wct	Wc	Wcv	Wcc	Wtnt	Wtf	Wc - Wtf	Wfmin	Wfmax	Wpf	Ntf	Nfa	Ntfa
1	65.00	106.77	171.77	336.15	164.38	100.54	6.23	0.1796	1.5926	0.9058	111	7	118
2	70.17	93.82	163.99	327.10	163.11	81.74	12.08	0.1424	0.5536	0.2357	341	51	392
3	69.85	100.91	170.76	333.74	162.98	72.92	27.99	0.1437	0.7120	0.2114	345	132	477
4	70.10	83.86	153.96	314.67	160.71	81.88	1.98	0.1342	0.5350	0.2287	298	9	307
5	70.46	100.60	171.06	332.64	161.58	93.42	7.18	0.1609	0.6960	0.2242	386	32	418
6	65.47	91.30	156.77	319.48	162.71	87.90	3.40	0.1518	0.6947	0.2441	326	14	340
Promedio	68.51	96.21	164.72	327.30	162.58	86.4	9.81	0.1521	0.7973	0.3416	301.17	40.86	342.03
Desv.Std.	2.55	8.19	7.82	8.59	1.28	9.75	9.57	0.02	0.40	0.2766	97.46	47.93	125.00

c) Prueba de velocidad de fragmento.

La prueba de velocidad se realizó a una muestra de cinco granadas de FUGRAD, utilizando el mismo equipo que en la prueba con la granada M26M, cámara de alta velocidad marca Photron, modelo Fastcam SA-Z y óptica marca Nikon 28-105mm (ver Figura 24).

Los cuerpos cargados con explosivo se colocaron sobre placa de 50cm x 50cm de acero en la posición de acostado como se muestra en la Figura 55.

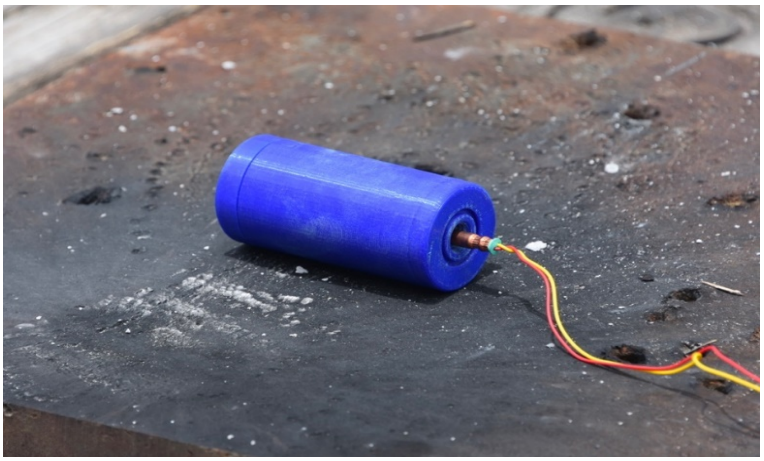


Figura 55. Posición de la granada FUGRAD en placa de acero.

La detonación de la granada se realizó a distancia utilizando detonador eléctrico del número 8, de la marca Austin powerd (ver Figura 55). Las grabaciones con la cámara de alta velocidad se realizaron a una velocidad de 12,000 fps (ver Figura 56), obteniéndose los videos para cada una de las cinco muestras probadas.

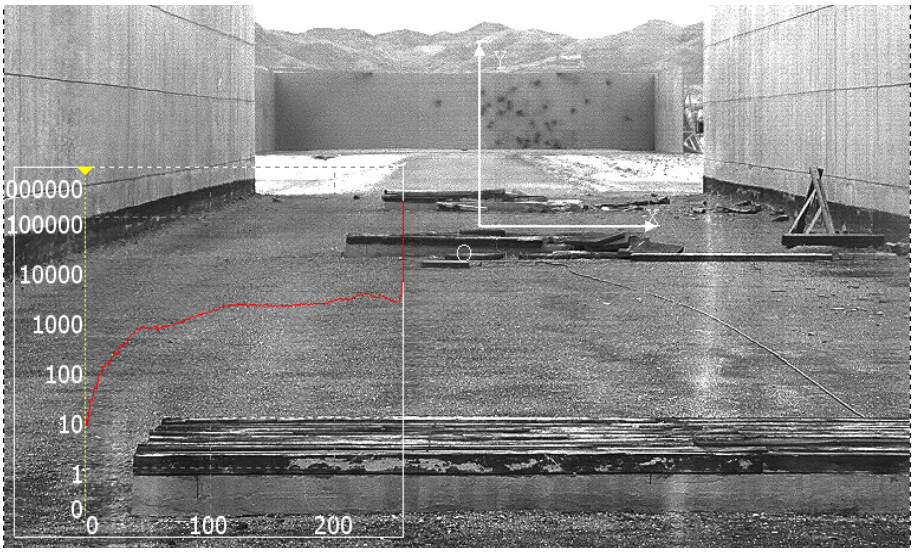


Figura 56. Imagen tomada con la cámara FASTCAM SA-Z.

Dentro de estas pruebas se obtuvieron registro del ángulo con el cual salen proyectados los fragmento siendo de 12º como se puede ver en las Figuras 57 y 58.

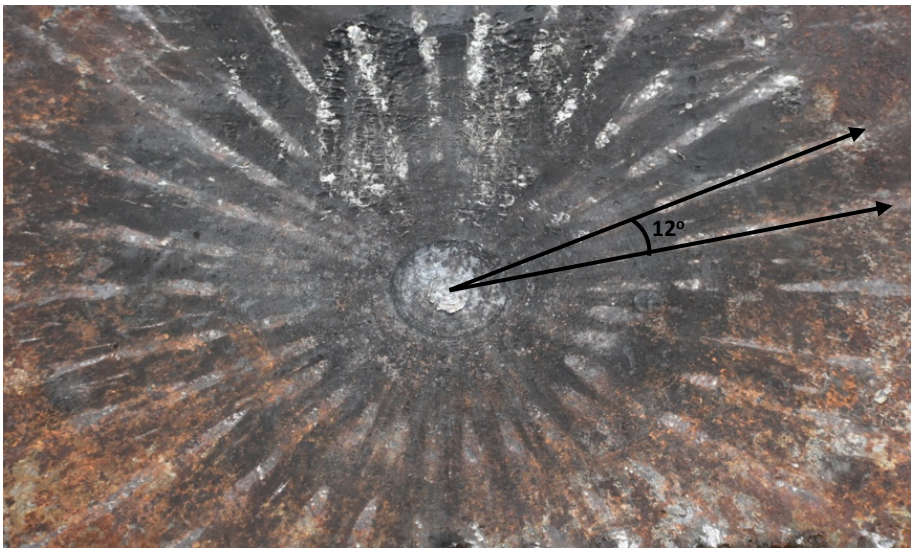


Figura 57. Registro de la distribución radial de los fragmentos de la FUGRAD.

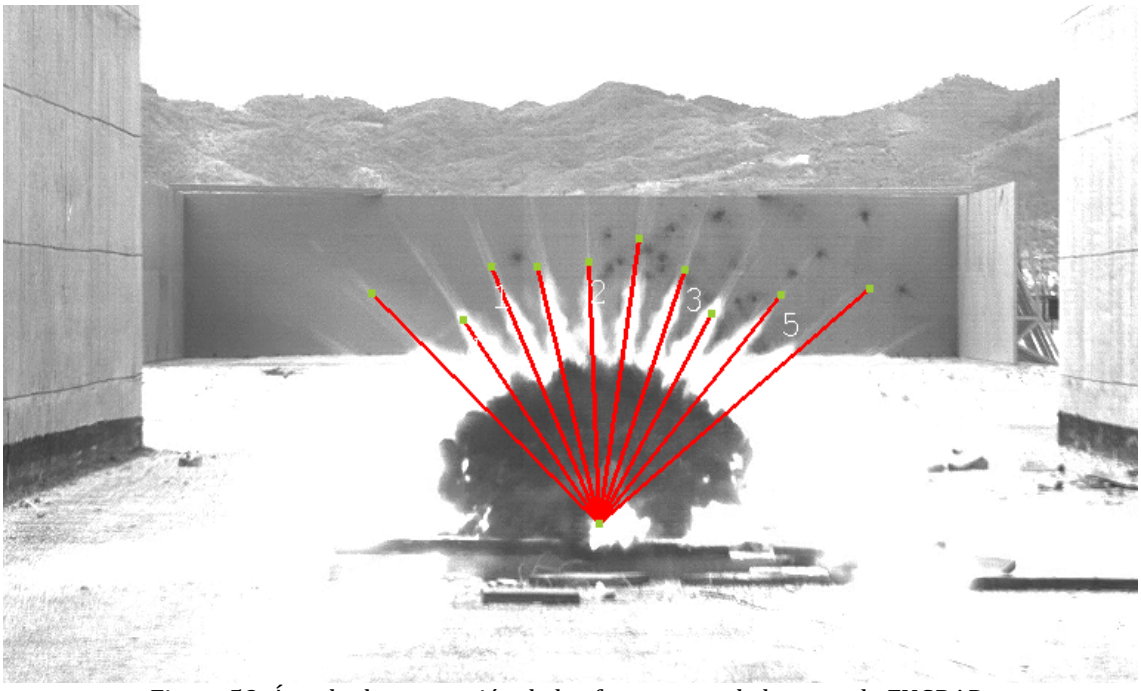


Figura 58. Ángulo de proyección de los fragmentos de la granada FUGRAD.

Otro de los registros que se obtuvo es la distribución de los impactos sobre pared a 5 m de distancia del punto de detonación (ver Figura 59)

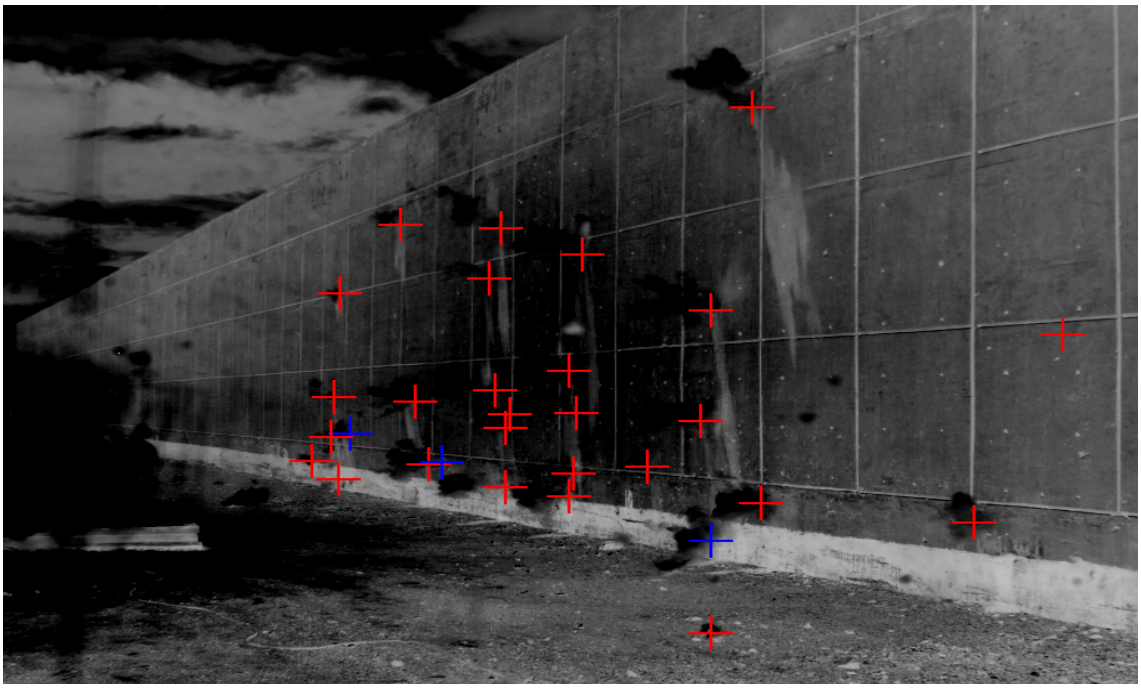


Figura 59. Distribución de impactos de los fragmentos de la granada FUGRAD.

En las pruebas para determinar la velocidad de los fragmentos se observó que en la FUGRAD los fragmentos tienen una velocidad 2.3 veces superior a la de la granada M26M, teniendo en promedio los fragmentos una velocidad de 1449 m/s y 637 m/s de la FUGRAD y M26M respectivamente como se muestra en la Figura 60 y Figura 61.

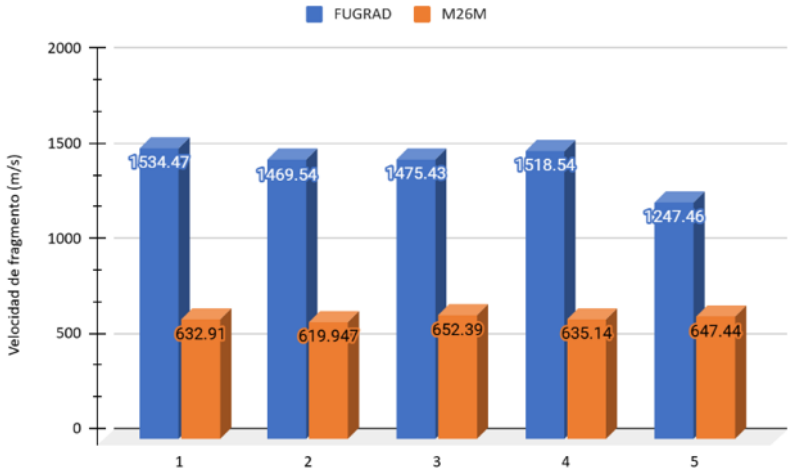


Figura 60. Comparación de la velocidad de fragmento de FUGRAD vs M26M.

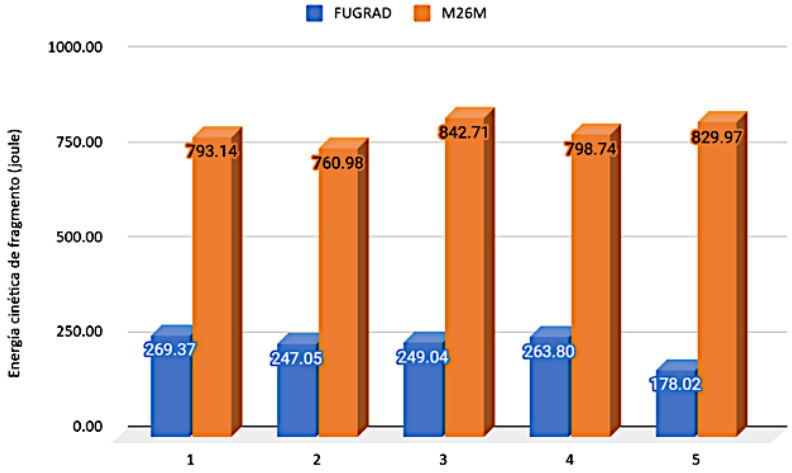


Figura 61. Comparación de la energía cinética de fragmento FUGRAD vs M26M.

Con los resultados obtenidos en las pruebas a los modelos físico-experimentales de la FUGRAD con fragmentación, se actualiza el algoritmo para el cálculo del índice de daño gradual, observando en la Figura 62 un corrimiento en la curva de ≈21% de los datos experimentales con respecto a las estimaciones teóricas, lo cual implica una disminución de las zonas de gradualidad al aplicar los criterios de la Tabla 12 al pasar el inicio del Límite de Seguridad para Población Civil (zona 3) de 16 m a 12.5 m.

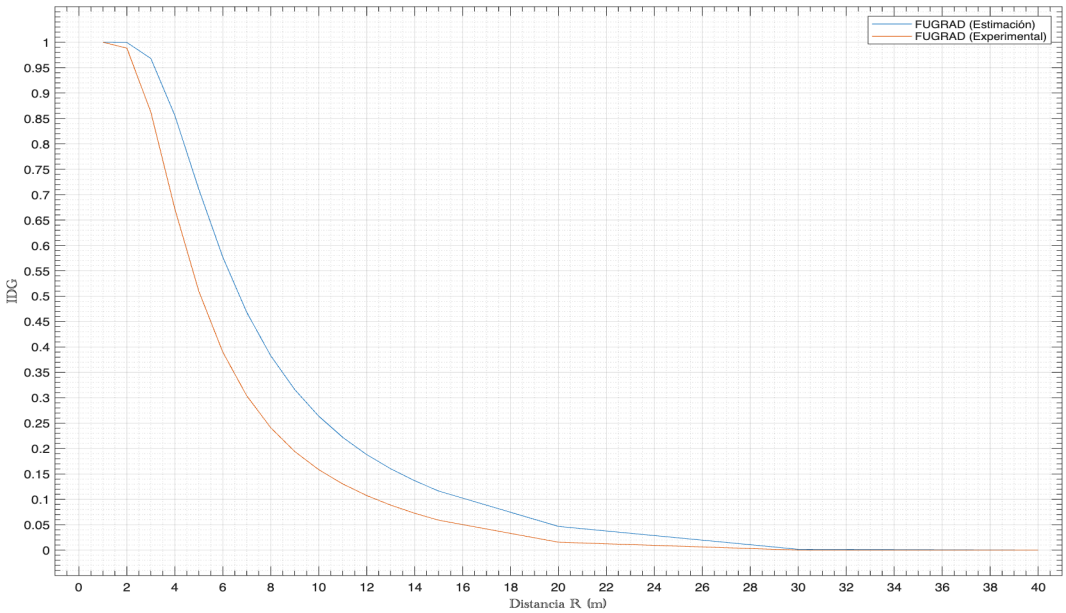


Figura 62. Comparación del IGD de la FUGRAD teórico vs. Experimental.

Como parte del establecimiento de nuevo índice de daño gradual, como herramienta de diseño la cual permite medir el impacto de las características físicas en el diseño de dispositivos de dispersión de energía, como es el caso de las granadas al establecer de manera unificada la relación de estas con su potencial daño, lo que permite contribuir al cambio de paradigma de municiones o granadas de fragmentación convencional a “sistemas de efectos localizados”. Alineándose estos sistemas a los nuevos enfoques del uso de la fuerza al armonizar los criterios de gradualidad con los de racionalidad y proporcionalidad en el uso de la fuerza que normas como la ley nacional sobre el uso de la fuerza establece.

Conclusiones.

El sistema FUGRAD representa una ruptura paradigmática con respecto a las municiones de fragmentación convencionales (como la M26M), transitando de un modelo de "arma de área indiscriminada" a un "sistema de efectos localizados" diseñado bajo los principios de proporcionalidad, necesidad y racionalidad exigidos por el marco normativo actual.

Los resultados apuntan que es físicamente posible y matemáticamente predecible graduar el daño mediante la manipulación de la inercia del fragmento. El sistema FUGRAD logra un punto de inflexión crítico entre los 4 y 6 m, donde la sobrepresión primaria deja de ser el vector letal, permitiendo que el daño colateral sea gobernado exclusivamente por una nube de fragmentos de baja inercia.

A diferencia de la granada M26M, cuyos fragmentos pesados (3.9 g) conservan niveles letales de energía cinética (>400 J) a distancias mayores, el sistema FUGRAD emplea el concepto de fusible aerodinámico, esto se logra mediante el diseño de la camisa prefragmentada de 672 proyectiles de 0.1488 g, FUGRAD genera una probabilidad de impacto (Ph) superior a la M26M en el radio de 0 a 4m, Colapsando Energéticamente debido a su bajo peso de fragmento, estos pierden su capacidad de perforación (Pfrag) al cruzar el umbral de los 10 m, situándose por debajo de los 79 J antes de alcanzar a la población civil en el radio colateral de los 12.5 m.

El proyecto ha transitado con éxito hasta el Nivel de Maduración Tecnológica TRL 4, validando la arquitectura modular en un entorno de laboratorio.

- Se ha fabricado un MFE funcional utilizando manufactura aditiva para el cuerpo de polímero y mecanizado de precisión para la camisa de acero AISI 1008.
- Las pruebas con cámara de ultra alta velocidad (50,000 fps) confirmaron velocidades (V) promedio de 1449 m/s, consistentes con los modelos analíticos de Gurney para geometría cilíndrica.

El diseño de doble cámara proporciona una ventaja logística y táctica al permitir configurar una familia de productos (ofensivas de presión pura, defensivas de fragmentación de baja densidad o alta densidad) utilizando una espoleta y cuerpo base comunes, lo que reduce costos y optimiza la respuesta según el nivel de daño que se busque.

El sistema FUGRAD es la respuesta tecnológica a la Ley Nacional sobre el Uso de la Fuerza. El Índice de Gradualidad de Daño (IGD) proporciona a las fuerzas del orden público una certidumbre estadística: puede neutralizar una amenaza real e inminente en el radio de 0 a 4 m con la seguridad técnica de que, fuera de los 10 m, el artefacto se comporta como un dispositivo de aturdimiento minimizando el daño colateral.

Capítulo 6.

Resultados y discusión

Se diseñó la granada FUGRAD como se detalla en el capítulo 5 con las siguientes características:

La configuración modular de la FUGRAD reduce los alcances o distancia de las zonas de daño evaluados a través del índice de daño gradual. Se analizó y caracterizó las granadas M26M y MKIIIA3 y se evaluó su IGD a cada uno de acuerdo con su configuración fija. Tomando como base en nivel de daño de las granadas de configuración fija se definió para la FUGRAD una carga de 165 g de explosivo TNT. Durante el diseño se establecieron dos primeros conceptos los cuales evolucionaron al diseño final de la FUGRAD. Se modelaron sus características de daño a partir de la aplicación del algoritmo para el cálculo de su índice de daño obteniendo su curva característica de daño y los alcances de las zonas de gradualidad. Se realizaron pruebas de laboratorio para verificar el nivel de daño que el MFE genera; de igual forma se determinó su CI el cual resulto en 92.3%.

6.1 Registros de propiedad industrial ante el instituto mexicano de la propiedad industrial (IMPI).

A partir del desarrollo del sistema FUGRAD, esta investigación permite la solicitud de una patente por invención del sistema FUGRAD y tres registros de diseño industrial que han sido presentadas y otorgadas por Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI). Para más detalles, consulte el Apéndice al final de este documento.

1. Solicitud de patente MX/a/2026/005091: este registro se refiere a la invención del “Dispositivo para la dispersión controlada de energía y masa fragmentaria mediante un índice de gradualidad de daño” (Análisis de fondo). (Anexo A)

2. Diseño industrial (modelo industrial, MX/f/2023/000328): este registro se refiere a la configuración del sistema FUGRAD con desfogue de energía y todos sus componentes (Otorgado). (Anexo B)

3. Diseño industrial (modelo industrial, MX/f/2023/000329): este registro se refiere a la configuración del sistema FUGRAD de secciones apilables y todos sus componentes (Otorgado). (Anexo C)

4. Diseño industrial (modelo industrial, MX/f/2023/000330): este registro se refiere al modelo del sistema FUGRAD de camisa prefragmentada desmontable y todos sus componentes (Otorgado). (Anexo D)

Capítulo 7.

Conclusión y trabajos futuros

Este trabajo propone el diseño y desarrollo de una granada con gradualidad en los daños. Este sistema está diseñado para crear una plataforma de producto que permita diferentes configuraciones de acuerdo con el efecto que se desee, como son sobrepresión pura, con fragmentación de alta o baja densidad. Todas estas configuraciones permiten tener una gradualidad en los daños.

Una de las contribuciones de este trabajo es una metodología para el diseño de dispositivos explosivos de mano, así como una evaluación a partir de un índice de daño propuesto en función de sus características técnicas. Durante el trabajo se desarrollaron las siguientes tareas y se destacan como aspectos críticos del proyecto.

- Se caracterizaron y documentaron los efectos de las granadas explosivas que actualmente utilizan las fuerzas del orden público.
- Se determinaron las relaciones de la carga explosiva y propiedades del contenedor.
- Se definieron los criterios y limitaciones de diseño del sistema FUGRAD.
- Se desarrolló y fabricó el modelo físico experimental de la granada FUGRAD.
- Se valido el funcionamiento de la granada FUGRAD en un entorno controlado.

Este proyecto elimina las lagunas de conocimiento identificadas en el estado del arte mediante la integración de un modelo matemático unificado, la validación física de simulaciones idealizadas y la creación de una escala de letalidad continua.

Como trabajo futuro se considera la validación del sistema FUGRAD con el fin de monitorear la usabilidad por parte del usuario en ambientes relevantes. Además, durante su empleo los usuarios pueden realizar cambios en el diseño de la granada FUGRAD para mejorar su rendimiento. Podría ser conveniente materializar las demás configuraciones de la plataforma de productos FUGRAD para ampliar los casos de usabilidad para diferentes necesidades de uso.

Otro trabajo futuro es el ampliar la evaluación del índice de daño para otros dispositivos explosivos, así como realizar ajuste de requerirlo que permitan que el índice de daño pueda generalizarse a más casos.

Bibliografía

[1] Cámara de Diputados del Honorable Congreso de la Unión, Ley Nacional Sobre El Uso De La Fuerza. 2019, pp. 1–12.
[2] Congreso de México, LEY FEDERAL DE ARMAS DE FUEGO Y EXPLOSIVOS. 2025.
[3] J. Dalton, J. Gott, P. Parker, M. Mcandrew, y C. Bowling, Unified Facilities Criteria (UFC) Structures To Resist the Effects of Accidental Explosions. 2008.
[4] P. Cooper, Explosives Engineering. Wiley-VCH, 1996.
[5] M. Berthelot, Explosives and Their Power: Translated and Condensed from the French of M. Berthelot. London, 1892.
[6] G. F. Kinney y K. J. Graham, Explosive Shocks in Air. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1985. doi: 10.1007/978-3-642-86682-1.
[7] D. E. Grady, Ed., Fragmentation of Rings and Shells: The Legacy of N.F. Mott. en Shock Wave and High Pressure Phenomena. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006. doi: 10.1007/b138675.
[8] C. Zhao, S. Wang, C. Guo, D. Liu, y F. Ma, "Experimental study on fragmentation of explosive loaded steel projectile", Int. J. Impact Eng., vol. 144, núm. April, p. 103610, oct. 2020, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103610.
[9] Z. Zhang, F. Huang, Y. Cao, y C. Yan, "A fragments mass distribution scaling relations for fragmenting shells with variable thickness subjected to internal explosive loading", Int. J. Impact Eng., vol. 120, pp. 79–94, oct. 2018, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2018.05.013.
[10] G. Gurney R. W., "'The Initial Velocities of Fragments from Bombs, Shells and Grenades'", No 405, sep. 1943.
[11] M. J. Kamlet y M. Finger, "An alternative method for calculating gurney velocities", Combust. Flame, vol. 34, núm. C, pp. 213–214, ene. 1979, doi: 10.1016/0010-2180(79)90095-6.
[12] M. J. Harwick, J. Hall, J. W. Tatom, y R. G. Baker, APPROVED METHODS AND ALGORITHMS FOR DOD RISK-BASED EXPLOSIVES SITING. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 2009. doi: 10.21236/ADA463571.
[13] M. Crull y S. Hamilton, Methodologies for Calculating Primary Fragment Characteristics. Department of Defense Explosives Safety Board, 2012.
[14] NATO, Manual of Nato Safety Principles for the Storage of Military Ammunition and Explosives, núm. November. Brussels: NATO Standardization Office, 2025. [En línea]. Disponible en: https://nso.nato.int/nso/nsdd/main/standards/ap-details/3740/EN
[15] European Commission. Joint Research Centre., "A survey of computational models for blast induced human injuries for security and defence applications.", Publications Office, LU, 2020. doi: 10.2760/685.
[16] D. of D. E. S. B. (DDESB), "Defense Explosives Safety Regulation (DESR) 6055.09", DoD Environment, Safety & Occupational Health Network and Information Exchange, 2025.

[17] Assessing Explosives Safety Risks, Deviations, And Consequences. Alexandria, VA: Department of Defense Explosives Safety Board, 2009.
[18] E. G. Duperón, M. M. Gil, B. G. Francés, y E. G. Ferradás, "Analysis of effects of detonation of explosive substances on humans from characteristic curves explosive mass–distance from the origin of the explosion", Process Saf. Prog., vol. 35, núm. 3, pp. 233–240, nov. 2015, doi: 10.1002/prs.11794.
[19] S. E. Turmo, "NTP 291: Modelos de vulnerabilidad de las personas por accidentes mayores: método Probit". Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, España, 1991.
[20] B. Van Stratum y M. Eckel, "US8136437 Multi-purpose modular hand grenade.", el 12 de marzo de 2012
[21] C. Thuman, H. Hamdan, F. Thuvander, O. Malmqvist, B. Johansson, y A. Bark, "WO2022245264A1 Method for fastening preformed projectiles to a warhead.", el 24 de noviembre de 2022
[22] J. Vestlund y O. Thor, "US20240035790A1 Warhead with molded casing and integrated metal elements.", el 1 de febrero de 2024
[23] W. E. MCNICHOLAS, J. E. GWALTNEY, E. SCHEID, M. E. CUMMINGS, y A. R. DAVIS, "US20240044623A1 Fragmentation pattern, optimized for drawn cups warheads with a dome and cylindrical wall.", el 8 de febrero de 2024
[24] "US20210018306 SYSTEM, IN PARTICULAR HAND GRENADE". Consultado: el 3 de junio de 2021. [En línea]. Disponible en: https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US315291102&_cid=P11-KPGF65-39328-1
[25] "SK20170279 Hand defence grenade". Consultado: el 3 de junio de 2021. [En línea]. Disponible en: https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=SK290819045&_cid=P11-KPGFX5-45986-1
[26] "US20160305753 ADVANCED FRAGMENTATION HAND GRENADE". Consultado: el 3 de junio de 2021. [En línea]. Disponible en: https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US178413970&_cid=P10-KPGH1M-21409-1
[27] "US20160273898 Rubber fragmentation grenade". Consultado: el 3 de junio de 2021. [En línea]. Disponible en: https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US177797510&_cid=P11-KPGFX5-45986-1
[28] C. Zhang, M. Abedini, y J. Mehrmashhadi, "Development of pressure-impulse models and residual capacity assessment of RC columns using high fidelity Arbitrary Lagrangian-Eulerian simulation", Eng. Struct., vol. 224, p. 111219, 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111219.
[29] M. Abedini y C. Zhang, "Dynamic vulnerability assessment and damage prediction of RC columns subjected to severe impulsive loading", Struct. Eng. Mech., vol. 77, núm. 4, pp. 441–461, 2021, [En línea]. Disponible en: https://lens.org/103-197-994-873-250

[30] S. E. Rigby et al., "Preliminary yield estimation of the 2020 Beirut explosion using video footage from social media", Shock Waves, vol. 30, núm. 6, pp. 671–675, sep. 2020, doi: 10.1007/s00193-020-00970-z.
[31] C. Tong et al., "Shock waves increase pulmonary vascular leakage, inflammation, oxidative stress, and apoptosis in a mouse model.", Exp. Biol. Med. Maywood NJ, vol. 243, núm. 11, pp. 934–944, jul. 2018, doi: 10.1177/1535370218784539.
[32] L. Liu, Z. Zong, y M. Li, "Numerical Study of Damage Modes and Assessment of Circular RC Pier under Noncontact Explosions", J. Bridge Eng., vol. 23, núm. 9, p. 04018061, 2018, doi: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0001273.
[33] A. K. Raina, "Influence of Joint Conditions and Blast Design on Pre-split Blasting Using Response Surface Analysis", Rock Mech. Rock Eng., vol. 52, núm. 10, pp. 4057–4070, may 2019, doi: 10.1007/s00603-019-01822-8.
[34] C. Pilger et al., "Yield estimation of the 2020 Beirut explosion using open access waveform and remote sensing data", Copernicus GmbH, mar. 2021. doi: 10.5194/egusphere-egu21-89.
[35] A. N. Pratomo, S. P. Santosa, L. Gunawan, D. Widagdo, y I. S. Putra, "Numerical study and experimental validation of blastworthy structure using aluminum foam sandwich subjected to fragmented 8 kg TNT blast loading", Int. J. Impact Eng., vol. 146, p. 103699, 2020, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103699.
[36] S.-C. Lin, D. Li, y B. Yang, "Experimental study and numerical simulation on damage assessment of reinforced concrete beams", Int. J. Impact Eng., vol. 132, p. 103323, 2019, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103323.
[37] P. Żochowski, R. Warchoł, M. Miszczak, M. Nita, Z. Pankowski, y M. Bajkowski, "Experimental and Numerical Study on the PG-7VM Warhead Performance against High-Hardness Armor Steel.", Mater. Basel Switz., vol. 14, núm. 11, p. 3020, jun. 2021, doi: 10.3390/ma14113020.
[38] S. Qi, G. Huang, X. Zhi, F. Fan, y R. G. J. Flay, "External blast load factors for dome structures based on reliability", Def. Technol., vol. 18, núm. 2, pp. 170–182, feb. 2022, doi: 10.1016/j.dt.2021.01.004.
[39] Z. Wenhai et al., "A Novel Method to Evaluate the Effect of Slope Blasting under Impact Loading", Shock Vib., vol. 2020, pp. 1–17, abr. 2020, doi: 10.1155/2020/6029190.
[40] F. Hernandez, H. Hao, y X. Zhang, "On the effectiveness of ventilation to mitigate the damage of spherical chambers subjected to confined trinitrotoluene detonations", Adv. Struct. Eng., vol. 22, núm. 2, pp. 486–501, ago. 2018, doi: 10.1177/1369433218791610.
[41] B. Choubey, S. C. Dutta, G. K. V. Prakhya, P. Mandal, y R. K. Tanwar, "Blast pressure analysis due to confined explosion-after effects", Structures, vol. 28, pp. 521–536, 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.08.057.
[42] H. Wang et al., "Global gene expression profiling of blast lung injury of goats exposed to shock wave.", Chin. J. Traumatol. Zhonghua Chuang Shang Za Zhi, vol. 23, núm. 5, pp. 249–257, ago. 2020, doi: 10.1016/j.cjtee.2020.08.005.

[43] G. Deng y X. Yu, "Numerical study on the case effect of a bomb air explosion", Def. Technol., vol. 17, núm. 4, pp. 1461–1470, 2021, doi: 10.1016/j.dt.2020.08.003.
[44] H. Li, L. Lu, X. Zhang, y X. Zhang, "Space Projectile Explosion Position Parameters Measurement Method and Target Damage Probability Calculation Analysis", IEEE Access, vol. 9, pp. 29118–29126, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3059541.
[45] A. Malciu, C. Puica, C. Pupaza, D. Pintilie, y F. Iancu, "RESEARCH ON THE MITIGATION OF SHAPED CHARGE EFFECT", Proc. Romanian Acad. - Ser. Math. Phys. Tech. Sci. Inf. Sci., vol. 21, pp. 281–290, nov. 2020.
[46] L. Gan, Z. Zong, C. Gao, M. Li, y H. Qian, "Influence of shape of cuboid explosives on response of plates subjected to blast loads", Thin-Walled Struct., vol. 174, pp. 109077–109077, 2022, doi: 10.1016/j.tws.2022.109077.
[47] P. K. Parchuri et al., "Characterization of Shock Wave Damages in Explosion Welded Mo/Cu Clads", Metals, vol. 11, núm. 3, p. 501, mar. 2021, doi: 10.3390/met11030501.
[48] Z. Liu, N. Jiang, C. Zhou, L. Ji, y L. Xuedong, "Damage Effect of Terrorist Attack Explosion-induced Shock Wave in a Double-deck Island Platform Metro Station", Period. Polytech. Civ. Eng., oct. 2020, doi: 10.3311/ppci.16929.
[49] M. Chi, H. Jiang, X. Lan, T. Xu, y Y. Jiang, "Study on Overpressure Propagation Law of Vapor Cloud Explosion under Different Building Layouts.", ACS Omega, vol. 6, núm. 49, pp. 34003–34020, nov. 2021, doi: 10.1021/acsomega.1c05332.
[50] P. M. Budema et al., "Hand grenade blast injuries in the Eastern Democratic Republic of Congo: a case series of 38 patients.", BMC Emerg. Med., vol. 22, núm. 1, p. 43, mar. 2022, doi: 10.1186/s12873-022-00599-4.
[51] Ç. Susantez y A. B. Caldeira, "Genetic Algorithm Optimisation of a TNT Solidification Model", Def. Sci. J., vol. 69, núm. 6, pp. 545–549, dic. 2019, doi: 10.14429/dsj.69.14037.
[52] L. Türker, "Thermobaric and enhanced blast explosives (TBX and EBX)", Def. Technol., vol. 12, núm. 6, pp. 423–445, dic. 2016, doi: 10.1016/j.dt.2016.09.002.
[53] Y. Zhang et al., "Exploration and implementation of commonality valuation method in commercial aircraft family design", Chin. J. Aeronaut., vol. 32, núm. 8, pp. 1828–1846, ago. 2019, doi: 10.1016/j.cja.2019.05.005.
[54] V. M. Gold, "Engineering Model for Design of Explosive Fragmentation Munitions": Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, VA, el 1 de febrero de 2007. doi: 10.21236/ADA462991.
[55] H. J. Thevenot y T. W. Simpson, "Commonality indices for product family design: a detailed comparison", J. Eng. Des., vol. 17, núm. 2, pp. 99–119, abr. 2006, doi: 10.1080/09544820500275693.
[56] T. J. Kwak y J. T. Peterson, "Community Indices, Parameters,and Comparisons".
[57] J. Dehn, Probability Formulas for Describing Fragment Size Distributions: Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 1981. doi: 10.21236/ADA102350.
[58] M. Mott N. F. y E. H. MLinfoot, "A Theory of Fragmentation", 3348, 1943.

[59] “UFC 3-340-02 Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions”, p. 1943, 2008.

Anexo A. Solicitud de patente del Sistema FUGRAD

IMPI
INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL

MX/E/2026/031239

MX/a/2026/005091

DIRECCIÓN DIVISIONAL DE PATENTES.

SUBDIRECCIÓN DIVISIONAL DE PROCESAMIENTO ADMINISTRATIVO DE PATENTES.

COORDINACIÓN DEPARTAMENTAL DE RECEPCIÓN Y CONTROL DE DOCUMENTOS.

EXPEDIENTE: MX/a/2026/005091

FOLIO DE RECEPCIÓN: MX/E/2026/031239

IDENTIFICADOR DE LA SOLICITUD: 234602

LUGAR, FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN DE LA SOLICITUD:
CIUDAD DE MÉXICO 27/04/2026 01:25:33 p. m.

ACUSE DE RECIBO DE LA SOLICITUD DE:

Patente

SOLICITANTE(S)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

REPRESENTANTE LEGAL:

Maria Del Rosario VILCHIS BERNAL

DOCUMENTOS DE LA SOLICITUD:

DOCUMENTO	NOMBRE ARCHIVO	TAMAÑO	HOJA(S)
SOLICITUD	Solicitud_000234602_27_04_2026.pdf	501.67 KB	5
COMPROBANTE DE PAGO	Pago.pdf	22.69 KB	1
HOJA DE DESCUENTO	HOJA DE DESCUENTO.pdf	25.26 KB	1
CONSTANCIA RGP	2026 .pdf	183.35 KB	2
MEMORIA_TECNICA	2026_22_FUGRAD.pdf	1671.04 KB	57
OTROS	A.UNIVERSITARIOCESIO¿NMI26Afugradlaza.pdf	138.6 KB	2
OTROS	A.ALUMNOCESIÓNDEPATENTEindividualJRMGfugrad.pdf	127 KB	1

TOTAL DE HOJAS: 69 (No se incluyen hoja(s) del acuse)

Los documentos adjuntos están sujetos al estudio correspondiente que el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial realice de conformidad con la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial o la Ley de la Propiedad Industrial, según sea el caso, considerando la fecha de recepción de su solicitud; así como de conformidad al Reglamento de la Ley de la Propiedad Industrial, aplicable a ambas legislaciones en términos de lo dispuesto por los artículos Transitorios Cuarto y Noveno del Decreto por el que se expide la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial, publicado el día 01 de julio de 2020 en el diario oficial de la federación

La presente solicitud se recibe en términos del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de servicios electrónicos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial; por lo tanto, previo a su presentación, el usuario aceptó lo siguiente:

I.- Que el trámite se efectúe, desde su inicio hasta su conclusión, a través de medios de comunicación electrónica;

II.- Bajo protesta de decir verdad, que revisó en la vista previa la información capturada y los anexos a la solicitud y que éstos son correctos; así mismo que, una vez concluido el proceso, no podría editar o variar la información o sus anexos;

III.- Bajo protesta de decir verdad, indicó que la información capturada es cierta;

IV.- Consultar su tablero, al menos, los días quince y último de cada mes, o bien, el día hábil siguiente si alguno de éstos fuere inhábil y que, en caso de no hacerlo, la notificación se tendría por hecha el día hábil siguiente a los días quince y último de cada mes, y

V.- Dar aviso por escrito, a través del correo electrónico buzon@impi.gob.mx, a la Dirección Divisional de Patentes, dentro de los tres días hábiles siguientes a aquel en que se vea imposibilitado, por causas imputables al Instituto, a consultar el tablero o abrir los archivos depositados en el mismo, en los días señalados en la fracción IV anterior.

A efecto de que los documentos presentados a través del Sistema de Patentes en Línea, produzcan los mismos efectos que los documentos firmados autógrafamente y tengan el mismo valor probatorio, manifestó bajo protesta de decir verdad, que los documentos son copia íntegra e inalterada del documento impreso; que se encuentren digitalizados en formato PDF (Portable Document Format), y que los remitió de forma legible.

Arenal #550, Pueblo Santa María Tepepan, Xochimilco, 16020, Ciudad de México.
(55) 53340700 - www.gob.mx/impi

IMPI
INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL

MX/E/2026/031239

MX/a/2026/005091

Asimismo, desde su registro en el Portal de Acceso a Servicios Electrónicos, manifestó reconocer como propia la CURP, la cual no podrá ser sustituida con posterioridad; reconoció como propia y válida la dirección de correo electrónico proporcionada y aceptó que en ella se le envíe cualquier comunicación relacionada con la cuenta; aceptó que el uso de la contraseña queda bajo su exclusiva responsabilidad y que deberá notificar oportunamente al Instituto, cualquier situación que pudiera implicar un uso indebido; reconoció como propia, veraz y auténtica la información que envíe a través del PASE o de los servicios electrónicos del Instituto, ya sea haciendo uso de su CURP y contraseña o, en su caso, su e-firma; aceptó que el uso de su CURP y contraseña o, en su caso, e-firma, por persona distinta quedará bajo su exclusiva responsabilidad y acepta como propia la información que ésta envíe o descargue a través del PASE o de los servicios electrónicos del Instituto; asumió cualquier tipo de responsabilidad derivada del mal uso que hagan de su CURP y contraseña o, en su caso, su e-firma; y reconoció que el simple uso de los servicios electrónicos del Instituto constituye la aceptación más amplia de las condiciones señaladas en el artículo 11 del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de servicios electrónicos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

El presente documento electrónico ha sido firmado mediante el uso de la firma electrónica avanzada por el servidor público competente, amparada por un certificado digital vigente a la fecha de su elaboración, y es válido de conformidad con lo dispuesto en los artículos 7 y 9 fracción I de la Ley de Firma Electrónica Avanzada y artículo 12 de su Reglamento.
El presente documento electrónico, su integridad y autoría, se podrá comprobar en www.gob.mx/impi.
Asimismo, se emitió conforme lo previsto por los artículos 1° fracción III; 2° fracción VI; 37, 38 y 39 del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de Servicios Electrónicos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

Cadena Original

JAVIER ARIZMENDI SHOl00001000000514523498lSERVICIO DE ADMINISTRACION TRIBUTARIAl234602l
MX/a/2026/005091lMX/E/2026/031239l27/04/2026 13:25:33lDocumento_Firma_Electronica.pdfl1l4902.47 KBl
+rFXTKCq6is1LnRH9oBNx17lW9g=

Sello Digital

AyVSLE
+vXoLQmj6ePo3Rf/402OwMLCYliMzk1ajTQX3eONqTBsQK5OTSBfHAaux2F2XufikRAvCeaJv3OeFrRbQEyGSvRAU9jO
+cnlGriw/7AMbh08C4k2oMxjKHLBrUcUQsyD5ZNLLt7/UqtNVBd9JHRGLCMFyZvXwvzDdPIqx5s
+xb2gtgshAIRD7b4XVENt9NKoZV0wyFla9TmZAqWuPrF5VBYodGuHg1PHDBThKxtXDTx5OfLeML30Ve7RWEaCmoBfQLfmc0
HILq56bs3Hp5iXJMJJU5kk69/4Z+EDD5W9cqc7QHmf3OqX/eFRUOgorOruT09uonBYN0V1zFMg==

Para verificar la autenticidad del presente documento, podrá ingresar a la página electrónica https://validadocumento.impi.gob.mx/, escaneando el código bidimensional QR que aparece a un costado de la e-firma del Servidor Público que signó el mismo, indicando, en su caso, el tipo de documento que pretende validar (solicitud, acuse, oficio o promoción); lo anterior, con fundamento en lo dispuesto por los artículos 1° fracción III; 2° fracción VI; 37, 38 y 39 del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de Servicios Electrónicos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial; en caso de no contar con lector QR o en su defecto no pueda ser leído por su dispositivo, digitar en la página antes referida el siguiente código: Qb8RXK6Y7CZHa2ANJLF2/pjA1jw=

MX/a/2026/005091

gob mx

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial

REPRESENTACIÓN DE LA SOLICITUD DE REGISTRO DE PATENTE ENVIADA A TRAVÉS DEL PORTAL DE ACCESO A SERVICIOS ELECTRÓNICOS (PASE).

Homoclave del formato	Folio
IMPI-00-009	Folio: MX/E/2026/031239

Fecha de solicitud del trámite
27 I 04 I 2026

Datos generales de la solicitud

◉ Solicitud de Patente **Normal** ○ Solicitud de Registro de Modelo de Utilidad ○ Solicitud de Registro de Diseño Industrial Especifique cual: ○ Modelo Industrial ○ Dibujo Industrial	Expediente: MX/a/2026/005091 ID Solicitud: 234602 Fecha: 27/04/2026 01:25:33

Datos del (de los) solicitante(s)

Personas físicas	Personas morales
CURP:	RFC: UAE560321II2
Nombre(s):	Denominación o razón social: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
Primer apellido:	
Segundo apellido:	
Género:	
Nacionalidad:	Nacionalidad: MÉXICO
Teléfono (Lada, Número, Extensión):	Teléfono (Lada, Número, Extensión):
Correo electrónico:	Correo electrónico: mrvilchisb@uaemex.mx
○ Continúa en anexo	◉ Continúa en anexo

MÉXICO PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA CONAMER IMPI

Contacto:
Arenal # 550, Pueblo Santa María Tepepan, Xochimilco, 16020, Ciudad de México.
Teléfono: 55-53-34-07-00 en la Ciudad de México y área metropolitana, del interior de la República sin costo para el usuario 800-570-59-90.
Correo electrónico: buzon@impi.gob.mx

Página 1 de 5

MX/a/2026/005091

gob mx

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial

Domicilio del (de los) solicitante(s)	
Código postal: 50000	
Calle: INSTITUTO LITERARIO OTE.	
Número exterior: 100	Número interior:
Colonia:	
Municipio o delegación:	Localidad:
Estado o entidad federativa: ESTADO DE MÉXICO	Entre calles:
País: MÉXICO	

Datos del (de los) inventor(es) /diseñador(es)
CURP:
Nombre(s): Luis Adrián
Primer apellido: ZÚÑIGA
Segundo apellido: AVILES
Nacionalidad: MÉXICO
Teléfono (Lada, Número, Extensión):
Género: Masculino
Correo electrónico: ◉ Continúa en anexo

Domicilio del (de los) inventor(es)/diseñador(es)	
Código postal: 50280	
Calle: REFORMA	
Número exterior: 21	Número interior:
Colonia:	
Municipio o delegación:	Localidad:
Estado o entidad federativa: ESTADO DE MÉXICO	Entre calles:
País: MÉXICO	

MX/a/2026/005091

gob mx

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial

Datos del (de los) apoderado(s)	
CURP: VIBR741007MMCLRS01	RGP: RGP-DDAJ-000124/2026
Nombre(s): Maria Del Rosario	Personas autorizadas para oír/recibir notificaciones:
Primer apellido: VILCHIS	
Segundo apellido: BERNAL	
Nacionalidad: MÉXICO	
Teléfono (Lada, Número, Extensión):	
Correo electrónico: charovb@gmail.com ○ Continúa en anexo	

Domicilio del (de los) apoderado(s)	
Código postal: 50000	
Calle: INSTITUTO LITERARIO OTE.	
Número exterior: 100	Número interior:
Colonia: CENTRO	
Municipio o delegación: TOLUCA	Localidad:
Estado o entidad federativa: ESTADO DE MÉXICO	Entre calles:
País: MÉXICO	

Datos de la Solicitud
Denominación o título de la invención: DISPOSITIVO PARA LA DISPERSIÓN CONTROLADA DE ENERGÍA Y MASA FRAGMENTARIA MEDIANTE UN ÍNDICE DE GRADUALIDAD DE DAÑO
Fecha divulgación previa:

Divisional de la solicitud
Fecha presentación:
Número:
Figura jurídica:

Prioridad Reclamada			
País:	Fecha de Presentación:	Número de Serie:	Código DAS

MX/a/2026/005091

gob mx

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial

Observaciones

Bajo protesta de decir verdad, el firmante manifiesta que los datos asentados en esta solicitud son ciertos y que en caso de actuar como mandatario, cuenta con facultades para llevar a cabo el presente trámite.

Cadena Original

MARIA DEL ROSARIO VILCHIS BERNALICURPIVIBR741007MMCLRS01IRENAPOI27/04/2026 13:25:32I1248237I69I Documento_Firma_Electronica.pdfI4615.86 KBI+rFXTKCq6is1LnRH9oBNx17IW9g=I000234602IPATENTEINormalI DISPOSITIVO PARA LA DISPERSIÓN CONTROLADA DE ENERGÍA Y MASA FRAGMENTARIA MEDIANTE UN ÍNDICE DE GRADUALIDAD DE DAÑOIUNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICOIMORALILuis Adrián ZÚÑIGA AVILESI Maria Del Rosario VILCHIS BERNALIVIBR741007MMCLRS01I

Sello Digital

2T8isdFjYJMZuwrx/ghodOhyZijFyZipKO3yVhvZSLY=

Anexo(s)	
Hoja anexa a la solicitud ID: 234602	De Fecha: 27/04/2026 01:25:33

MX/a/2026/005091

gob mx

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial

Lista Inventores/Diseñadores

Inventor/Diseñador 2

- Nombre: Adriana Herlinda VILCHIS GONZÁLEZ
- CURP:
- Género: Femenino
- Nacionalidad: MÉXICO
- Domicilio: Calle RAFAEL GARCÍA MORENO, Ext. 109, C. P. 50130
- Población, Estado y País: , ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

Inventor/Diseñador 3

- Nombre: José Martín HERRERA RAMÍREZ
- CURP:
- Género: Masculino
- Nacionalidad: MÉXICO
- Domicilio: Calle CASTILLA, Ext. 11692, C. P. 31207
- Población, Estado y País: , CHIHUAHUA, MÉXICO

Inventor/Diseñador 4

- Nombre: Juan Ramón MEDA GUTIÉRREZ
- CURP:
- Género: Masculino
- Nacionalidad: MÉXICO
- Domicilio: Calle PAYNANI, Ext. 6, C. P. 50250
- Población, Estado y País: , ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

Número de Páginas Manifestadas

- Número de Páginas: 69

MÉXICO PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA CONAMER IMPI

Contacto:
Arenal # 550, Pueblo Santa María Tepepan, Xochimilco, 16020, Ciudad de México.
Teléfono: 55-53-34-07-00 en la Ciudad de México y área metropolitana, del interior de la República sin costo para el usuario 800-570-59-90.
Correo electrónico: buzon@impi.gob.mx

DISPOSITIVO PARA LA DISPERSIÓN CONTROLADA DE ENERGÍA Y MASA FRAGMENTARIA MEDIANTE UN ÍNDICE DE GRADUALIDAD DE DAÑO

CAMPO DE LA INVENCIÓN

La presente invención se refiere al campo de la ingeniería mecánica, balística aplicada, modelado físico y simulación computacional, particularmente al diseño de dispositivos capaces de generar dispersión controlada de energía y masa fragmentaria, así como a métodos matemáticos y computacionales para cuantificar la distribución espacial de los efectos generados.

Más específicamente, la invención se relaciona con un dispositivo físico y un método de evaluación cuantitativa basado en un índice de gradualidad de daño, el cual permite caracterizar la intensidad relativa de los efectos producidos por la dispersión de energía y fragmentos en función de la distancia y de las condiciones del entorno.

El sistema propuesto permite integrar variables físicas asociadas a la propagación de energía y masa fragmentaria dentro de un modelo matemático cuantificable, permitiendo su utilización en: sistemas de simulación física, análisis de dispersión energética, evaluación de escenarios de ingeniería, sistemas de entrenamiento, análisis de seguridad y evaluación de riesgos.

OBJETO DE LA INVENCIÓN

El objeto de la presente invención consiste en proporcionar un dispositivo y un método para la dispersión controlada de energía y masa fragmentaria, capaces de generar una distribución espacial predecible y cuantificable de los efectos producidos por la liberación controlada de energía.

Otro objeto de la invención consiste en proporcionar un método matemático y computacional para evaluar la gradualidad espacial de los efectos generados, mediante la determinación de un índice cuantificable de gradualidad de daño, el cual integra múltiples variables físicas dependientes de la distancia respecto al origen del fenómeno.

Un objeto adicional de la invención consiste en proporcionar un sistema de análisis que permita modelar, simular y cuantificar la distribución de energía y masa fragmentaria, permitiendo evaluar diferentes configuraciones de diseño del dispositivo y las condiciones del entorno en las que ocurre la dispersión.

Asimismo, constituye un objeto de la invención proporcionar una herramienta cuantitativa para la evaluación de la intensidad relativa de los efectos generados en función de la distancia, mediante la normalización e integración de variables físicas representativas del fenómeno de dispersión.

Otro objeto de la invención consiste en proporcionar un modelo matemático que permita integrar variables físicas asociadas a la propagación de energía y fragmentos dentro de un único parámetro adimensional, facilitando la comparación entre diferentes escenarios de dispersión y permitiendo su implementación en sistemas de simulación, análisis de ingeniería y evaluación de escenarios.

Finalmente, es objeto de la presente invención proporcionar un método reproducible para cuantificar la gradualidad espacial del daño o efecto generado por la dispersión de energía y masa fragmentaria, mediante un índice normalizado que permite representar la intensidad relativa del fenómeno dentro de un intervalo acotado y facilitar su análisis en plataformas computacionales de simulación y modelado físico.

ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

En diversas áreas de la ingeniería, tales como la ingeniería balística, la seguridad industrial, la ingeniería de explosivos y la simulación de fenómenos energéticos, resulta necesario evaluar la dispersión espacial de energía y masa fragmentaria generada por eventos de liberación energética.

Los fenómenos de dispersión energética se caracterizan por la generación simultánea de diversos efectos físicos, entre los cuales se incluyen:

- propagación de ondas de choque;
- dispersión de fragmentos;

- transferencia de energía cinética al medio circundante;
- probabilidad de impacto de fragmentos sobre objetivos ubicados en el entorno.

La evaluación de estos fenómenos resulta particularmente relevante en aplicaciones tales como:

- análisis de seguridad industrial;
- simulación de explosiones;
- diseño de dispositivos de dispersión energética;
- evaluación de riesgos asociados a eventos energéticos.

Sin embargo, el análisis de dichos fenómenos presenta una complejidad significativa debido a la interacción simultánea de múltiples variables físicas dependientes de la distancia respecto al origen del evento energético.

En el estado de la técnica se conocen diversas tecnologías relacionadas con dispositivos de fragmentación, sistemas de dispersión explosiva y herramientas de simulación de fenómenos energéticos.

Algunas tecnologías se enfocan en el diseño estructural de dispositivos fragmentarios, en los cuales se utilizan camisas prefragmentadas o estructuras metálicas destinadas a generar fragmentos tras la liberación de energía.

Otras tecnologías se orientan hacia modelos computacionales de simulación de explosiones, en los cuales se analizan fenómenos tales como la propagación de ondas de choque o el comportamiento dinámico de fragmentos.

Asimismo, existen sistemas enfocados en el modelado balístico de proyectiles o fragmentos, en los cuales se estudia el movimiento de cuerpos en función de parámetros aerodinámicos.

No obstante, dichas tecnologías suelen abordar de manera independiente cada uno de estos fenómenos físicos.

Con el fin de analizar el estado de la técnica, se realizó una revisión comparativa de diversas patentes internacionales relacionadas con dispositivos de fragmentación, simulación de explosiones y modelado balístico.

El análisis incluyó patentes publicadas en oficinas de propiedad intelectual tales como: USPTO (Estados Unidos), EPO (Europa) y WIPO (PCT). La Tabla muestra una matriz comparativa entre diversas tecnologías conocidas y la presente invención denominada FUGRAD.

Patente	Tipo de tecnología	Fragmentación	Modelo físico	Modelo matemático	Índice cuantitativo	Sistema computacional
US 4,986,190	Granada fragmentaria	✓	✗	✗	✗	✗
US 5,413,048	Munición fragmentaria	✓	✗	✗	✗	✗
US 6,311,611	Dispositivo fragmentario	✓	✗	✗	✗	✗
US 7,493,846	Simulación de explosiones	✗	✓	✓	✗	✓
US 7,784,374	Modelado balístico	✗	✓	✓	✗	✓
US 8,707,908	Análisis de dispersión explosiva	✓	✓	✗	✗	✓
US 9,046,264	Simulación de ondas de choque	✗	✓	✓	✗	✓
US 9,377,377	Evaluación de efectos explosivos	✓	✓	✗	✗	✓
US 9,863,707	Modelado de fragmentación	✓	✓	✓	✗	✗
EP 1483975	Granada fragmentaria	✓	✗	✗	✗	✗
EP 2103345	Simulación de explosiones	✗	✓	✓	✗	✓
EP 2648476	Modelado balístico	✗	✓	✓	✗	✓
WO 2008/134733	Sistema de análisis explosivo	✓	✓	✗	✗	✓
WO 2012/056417	Simulación de fragmentación	✓	✓	✓	✗	✓
WO 2018/204937	Evaluación de riesgo explosivo	✓	✓	✓	✗	✓
Sistema FUGRAD	Dispositivo + modelo integrado	✓	✓	✓	✓	✓

5

4

Limitaciones del estado de la técnica

Tal como se observa en la Tabla, las tecnologías existentes presentan diversas limitaciones técnicas.

Entre las principales limitaciones se encuentran:

1. Análisis fragmentado del fenómeno físico, en el cual cada variable del fenómeno se estudia de manera independiente.
2. Ausencia de métricas cuantitativas integradas, que permitan representar la intensidad relativa del fenómeno de dispersión energética.
3. Limitada capacidad de comparación entre diferentes escenarios de dispersión energética, debido a la falta de indicadores normalizados.
4. Escasa integración entre dispositivos físicos y modelos matemáticos, lo cual dificulta el análisis cuantitativo del fenómeno.

En particular, ninguna de las tecnologías analizadas integra simultáneamente:

- un dispositivo generador de dispersión energética;
- un modelo físico de propagación energética;
- un modelo matemático de dispersión fragmentaria;
- un modelo probabilístico de impacto de fragmentos;
- un índice cuantificable que represente la gradualidad espacial del fenómeno;
- y un sistema computacional para evaluar y simular dicho fenómeno.

Problema técnico

Derivado de las limitaciones del estado de la técnica, surge la necesidad de desarrollar un sistema técnico que permita integrar múltiples variables físicas asociadas al fenómeno de dispersión energética y representar cuantitativamente la intensidad relativa del fenómeno en función de la distancia radial respecto al origen.

En particular, existe la necesidad de un sistema que permita cuantificar la gradualidad espacial del daño generado por la dispersión de energía y masa fragmentaria mediante un parámetro cuantificable que integre múltiples variables físicas.

Solución técnica propuesta

La presente invención propone un dispositivo y método para la dispersión controlada de energía y masa fragmentaria mediante un índice cuantificable de gradualidad de daño.

La solución técnica consiste en la integración de:

- un dispositivo generador de dispersión energética configurado para liberar energía y acelerar elementos fragmentarios;
- un modelo físico de propagación energética y dispersión fragmentaria;
- un modelo matemático integrado capaz de combinar múltiples variables físicas dependientes de la distancia radial;
- un índice cuantificable de gradualidad de daño que representa la intensidad relativa del fenómeno;
- y un sistema computacional configurado para evaluar y simular escenarios de dispersión energética.

El índice cuantificable de gradualidad de daño puede definirse como:

$$IGD(R) = \frac{U(R)}{1 + U(R)}$$

donde la función agregada $U(R)$integra múltiples variables físicas normalizadas dependientes de la distancia radial.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

Los aspectos novedosos que se consideran característicos de la presente invención se establecen con particularidad en las reivindicaciones anexas; sin embargo, la invención misma, tanto por su organización como por su modo de operación, conjuntamente con otros objetos y ventajas de la misma, se comprenderá mejor con referencia a la siguiente descripción tomada en conjunto con los dibujos adjuntos, en los cuales:

Figura 1. Muestra una representación general del sistema configurado para la dispersión controlada de energía y masa fragmentaria.

Figura 2. Ilustra los principales componentes estructurales del dispositivo generador de dispersión energética, incluyendo el cuerpo contenedor, la estructura fragmentaria, el medio generador de energía y el mecanismo de activación.

Figura 3. Muestra un esquema conceptual de la dispersión radial de fragmentos generados por el dispositivo a partir del punto de liberación energética.

Figura 4. Ilustra la distribución espacial de la energía transferida al medio circundante en función de la distancia radial respecto al origen del evento energético.

Figura 5. Muestra el conjunto de variables físicas consideradas para el análisis del fenómeno de dispersión energética.

Figura 6. Presenta el proceso de normalización de variables físicas utilizado para transformar las variables del sistema en variables adimensionales.

Figura 7. Ilustra el esquema conceptual de integración ponderada de variables normalizadas mediante una función agregada.

Figura 8. Muestra la evolución del índice cuantificable de gradualidad de daño en función de la distancia radial respecto al origen del evento energético.

Figura 9. Ilustra un esquema general del sistema computacional configurado para simular el fenómeno de dispersión energética y calcular el índice de gradualidad de daño.

Figura 10. Muestra un esquema representativo de la propagación de la onda de choque generada por la liberación energética.

Figura 11. Ilustra la distribución espacial de la presión asociada a la onda de choque en el medio circundante.

Figura 12. Presenta una vista general del dispositivo generador de dispersión energética.

Figura 13. Muestra una vista detallada de la estructura fragmentaria del dispositivo.

Figura 14. Ilustra el mecanismo de activación configurado para iniciar el evento de dispersión energética.

Figura 15. Muestra un modelo conceptual de la probabilidad de impacto de fragmentos sobre un objetivo en función de la densidad de fragmentos y del área efectiva del objetivo.

Figura 16. Ilustra la arquitectura funcional del sistema para el análisis y simulación del fenómeno de dispersión energética.

Figura 17. Muestra la representación conceptual del modelo científico integrado que describe la interacción entre propagación energética, dispersión fragmentaria, variables físicas del sistema y el cálculo del índice cuantificable de gradualidad de daño.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCIÓN.

PRIMERA SECCIÓN: DESCRIPCIÓN GENERAL

La presente invención se refiere a un sistema para la generación, análisis y cuantificación de la dispersión controlada de energía y masa fragmentaria, el cual integra un dispositivo generador de dispersión energética, un modelo físico de propagación energética y dispersión fragmentaria, un modelo matemático de integración de variables físicas y un sistema computacional de simulación configurado para determinar un índice cuantificable de gradualidad de daño (IGD).

En diversas aplicaciones técnicas, tales como el análisis de fenómenos de dispersión energética, la simulación balística y la evaluación de riesgos asociados a eventos de liberación de energía, resulta necesario evaluar de manera cuantitativa la evolución espacial del daño generado por la dispersión de energía y fragmentos en un medio circundante. Sin embargo, en el estado de la técnica los sistemas existentes suelen abordar dichos fenómenos de manera

parcial, analizando por separado variables físicas como la propagación de ondas de choque, la dispersión de fragmentos o la energía transferida al medio.

Como consecuencia, los sistemas conocidos presentan limitaciones significativas para describir de manera integrada la evolución espacial del fenómeno y para cuantificar la intensidad relativa del daño generado por la dispersión energética.

El problema técnico que resuelve la presente invención consiste en proporcionar un sistema capaz de integrar múltiples variables físicas asociadas a un fenómeno de dispersión energética y representarlas mediante un parámetro cuantificable que permita evaluar la intensidad relativa del daño en función de la distancia respecto al origen del evento.

La solución técnica propuesta consiste en un sistema que integra:

- un dispositivo generador de dispersión energética;
- un modelo físico que describe la propagación energética y la dispersión fragmentaria;
- un modelo matemático de integración de variables físicas; y
- un sistema computacional de simulación.

Mediante esta integración se obtiene un índice cuantificable de gradualidad de daño, el cual permite representar de manera continua la intensidad relativa del fenómeno de dispersión energética.

Tal como se muestra en la Figura 1, el sistema comprende un dispositivo generador de dispersión energética configurado para liberar energía desde una región inicial y producir la aceleración radial de una pluralidad de fragmentos hacia el entorno. Esta liberación energética genera simultáneamente diversos fenómenos físicos, incluyendo la propagación de ondas de choque, la dispersión fragmentaria y la transferencia de energía cinética al medio circundante.

La Figura 2 ilustra los componentes principales del dispositivo generador de dispersión energética, incluyendo un cuerpo estructural contenedor, una estructura fragmentaria configurada para generar fragmentos durante la liberación energética, un medio generador de energía y un mecanismo de activación configurado para iniciar el evento de dispersión energética.

Como se observa en la Figura 3, la liberación de energía desde el dispositivo genera una dispersión radial de fragmentos y una propagación energética en el medio circundante. Este fenómeno se caracteriza por la variación espacial de diversas variables físicas en función de la distancia radial respecto al origen del evento energético.

La Figura 4 muestra la distribución de energía transferida en función de la distancia radial desde el punto de dispersión. En general, la intensidad energética disminuye progresivamente conforme aumenta la distancia respecto al origen del fenómeno, debido a la disipación energética en el medio circundante.

Con el propósito de cuantificar la evolución espacial de dicho fenómeno, el sistema de la invención considera una pluralidad de variables físicas representativas del comportamiento del sistema. Tal como se ilustra en la Figura 5, dichas variables pueden incluir, entre otras, la energía transferida al medio, la densidad espacial de fragmentos, la velocidad de los fragmentos, la presión generada por la onda de choque y la probabilidad de impacto de fragmentos sobre un objetivo.

Estas variables físicas se procesan mediante un modelo matemático configurado para integrar la información asociada al fenómeno de dispersión energética. En una realización preferente, las variables físicas se transforman en variables adimensionales normalizadas, tal como se muestra en la Figura 6, con el propósito de permitir su integración dentro de una función agregada.

Posteriormente, las variables normalizadas se combinan mediante una función de agregación ponderada, cuya estructura conceptual se representa en la Figura 7. A partir de dicha función agregada se obtiene el índice cuantificable de gradualidad de daño (IGD), el cual representa la intensidad relativa del fenómeno de dispersión energética.

La Figura 8 muestra la evolución del índice de gradualidad de daño en función de la distancia radial respecto al origen del evento energético. En general, el índice presenta una disminución progresiva conforme aumenta la distancia al origen, reflejando la reducción gradual de la intensidad del fenómeno.

El análisis del fenómeno puede realizarse mediante un sistema computacional configurado para simular diferentes escenarios de dispersión energética. Tal como se muestra en la Figura 9, el sistema computacional permite procesar las variables físicas del fenómeno y generar representaciones espaciales del índice de gradualidad de daño.

Las Figuras 10 y 11 ilustran ejemplos de la propagación de ondas de choque y la distribución de presión generadas por la liberación energética en el medio circundante.

Por su parte, las Figuras 12 a 14 muestran diferentes vistas del dispositivo generador de dispersión energética, incluyendo la estructura general del dispositivo, la configuración de la estructura fragmentaria y el mecanismo de activación.

La Figura 15 ilustra un modelo probabilístico de impacto de fragmentos sobre un objetivo, el cual depende de la densidad de fragmentos y del área efectiva del objetivo.

Finalmente, las Figuras 16 y 17 muestran la arquitectura funcional del sistema y la representación conceptual del modelo científico que integra el fenómeno de dispersión energética, el modelo matemático del índice de gradualidad de daño y el sistema computacional de simulación.

De esta manera, la presente invención introduce una integración técnica novedosa entre un dispositivo generador de dispersión energética, un modelo físico del fenómeno, un modelo matemático de integración de variables y un sistema computacional de simulación, lo cual permite cuantificar la evolución espacial del daño generado por fenómenos de dispersión energética mediante el uso de un índice cuantificable de gradualidad de daño.

SEGUNDA SECCIÓN: DESCRIPCIÓN DETALLADA

En una realización preferente de la invención, el sistema para la generación, análisis y cuantificación de la dispersión controlada de energía y masa fragmentaria comprende un conjunto de elementos físicos y modelos matemáticos configurados para describir y analizar la evolución espacial del fenómeno de dispersión energética.

El sistema comprende un dispositivo generador de dispersión energética configurado para liberar energía desde una región inicial y producir la aceleración radial de una pluralidad de fragmentos hacia el medio circundante. Durante la liberación energética se generan simultáneamente diversos fenómenos físicos, incluyendo la propagación de ondas de choque, la dispersión fragmentaria y la transferencia de energía al medio circundante.

Tal como se muestra en las Figuras 12 a 14, el dispositivo generador de dispersión energética comprende un cuerpo estructural contenedor, una estructura fragmentaria configurada para

generar una pluralidad de fragmentos durante la liberación energética, un medio generador de energía y un mecanismo de activación configurado para iniciar el evento de dispersión energética.

Modelo físico de propagación energética

Cuando el dispositivo es activado, la liberación de energía genera una propagación energética en el medio circundante, cuya evolución espacial puede representarse mediante un campo energético dependiente del espacio y del tiempo.

En una realización del modelo físico de la invención, la evolución del campo energético $E(x,t)$puede describirse mediante la ecuación:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = D\nabla^2 E - \alpha E + S(x,t)$$

donde:

- $E(x,t)$representa la energía distribuida en el medio,
- Drepresenta un coeficiente de difusión energética,
- αrepresenta un coeficiente de disipación energética,
- $S(x,t)$representa la fuente energética generada por el dispositivo.

En una aproximación radial simplificada, la energía transferida al medio puede representarse mediante:

$$E(R) = E_0 e^{-\lambda R}$$

donde:

- E_0representa la energía inicial liberada,
- Rrepresenta la distancia radial respecto al origen del evento energético,
- λrepresenta un coeficiente de atenuación energética del medio.

Modelo de dispersión fragmentaria

La dispersión de fragmentos generados por el dispositivo puede representarse mediante un modelo de distribución espacial de fragmentos. En una realización preferente, la densidad espacial de fragmentos puede aproximarse mediante:

$$\rho_f(R) = \frac{N}{4\pi R^2}$$

donde Nrepresenta el número total de fragmentos generados.

La velocidad de los fragmentos puede representarse mediante una función decreciente de la distancia radial:

$$v(R) = v_0 e^{-\beta R}$$

donde $v_0$representa la velocidad inicial de los fragmentos.

La velocidad inicial puede estimarse mediante:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2E}{m}}$$

donde $m$representa la masa del fragmento.

Modelo probabilístico de impacto

La probabilidad de impacto de fragmentos sobre un objetivo puede representarse mediante:

$$P_{hit}(R) = 1 - e^{-\rho_f(R)A}$$

donde:

- Arepresenta el área efectiva del objetivo,
- $\rho_f(R)$representa la densidad de fragmentos.

Normalización de variables físicas

Para integrar las variables físicas del fenómeno, dichas variables se transforman en variables adimensionales normalizadas:

$$\Phi_k(R) = \frac{X_k(R)}{X_{k,ref}}$$

donde:

- $X_k(R)$representa la k-ésima variable física del sistema,
- $X_{k,ref}$representa un valor de referencia.

Modelo matemático del índice de gradualidad de daño

Las variables normalizadas se integran mediante una función agregada:

$$U(R) = \sum_{k=1}^{n} w_k \, \Phi_k(R)$$

donde $w_k$representa coeficientes de ponderación.

A partir de esta función agregada se calcula el índice cuantificable de gradualidad de daño:

$$IGD(R) = \frac{U(R)}{1 + U(R)}$$

Este índice se encuentra acotado en el intervalo:

$$0 \leq IGD(R) \leq 1$$

y representa la intensidad relativa del fenómeno de dispersión energética.

Modelo tensorial del fenómeno

En una realización avanzada, el fenómeno puede representarse mediante un campo tensorial de daño energético:

$$\mathbb{D}(\mathrm{x}, t)$$

el cual describe la distribución espacial del daño energético en el medio circundante.

La evolución del campo tensorial puede representarse mediante una ecuación que integra:

- propagación energética,
- dispersión fragmentaria,
- efectos de la onda de choque.

El índice IGD puede obtenerse como una proyección escalar del campo tensorial:

$$IGD(\mathrm{x}, t) = \mathcal{P}(\mathbb{D}(\mathrm{x}, t))$$

Modelo unificado del sistema FUGRAD

En una formulación general, el fenómeno de dispersión energética puede representarse mediante un modelo unificado que integra todas las variables físicas relevantes.

El índice de gradualidad de daño puede expresarse mediante:

$$IGD(R) = \frac{\sum_{k=1}^{n} w_k \, \Phi_k(R) + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=i+1}^{n} \omega_{ij} \, \Phi_i(R) \Phi_j(R)}{1 + \sum_{k=1}^{n} w_k \, \Phi_k(R) + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=i+1}^{n} \omega_{ij} \, \Phi_i(R) \Phi_j(R)}$$

donde:

- $w_k$representan coeficientes de ponderación,
- ω_{ij}representan coeficientes de interacción entre variables físicas.

Este modelo unificado permite representar la interacción entre diferentes fenómenos físicos asociados a la dispersión energética.

Sistema computacional de simulación

Tal como se muestra en las Figuras 16 y 17, el sistema comprende un entorno computacional configurado para simular el fenómeno de dispersión energética.

El sistema computacional puede comprender:

- un módulo de captura de parámetros del escenario,
- un módulo de cálculo de variables físicas,
- un módulo de normalización de variables,
- un módulo de cálculo del índice de gradualidad de daño,
- y un módulo de visualización de resultados.

Este sistema permite generar representaciones espaciales del fenómeno y analizar diferentes configuraciones del dispositivo generador de dispersión energética.

Interpretación del modelo

El sistema propuesto permite integrar de manera cuantitativa:

- la propagación energética,
- la dispersión fragmentaria,
- la interacción con el medio circundante,
- y la probabilidad de impacto.

El modelo unificado del índice de gradualidad de daño proporciona un marco matemático que permite analizar y cuantificar la evolución espacial del daño generado por fenómenos de dispersión energética.

Modelo físico generalizado de dispersión energética

El fenómeno de dispersión energética generado por el dispositivo puede representarse mediante un campo energético dependiente del espacio y del tiempo:

$$E(\mathrm{x}, t)$$

cuya evolución puede describirse mediante la ecuación de transporte energético:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla E) - \alpha E + S(\mathrm{x}, t)$$

donde:

- Drepresenta el coeficiente de difusión energética del medio
- αrepresenta el coeficiente de disipación energética
- $S(\mathrm{x}, t)$representa la fuente energética generada por el dispositivo.

Dinámica de fragmentos

La dinámica de los fragmentos puede describirse mediante la ecuación de movimiento:

$$m\frac{d\mathrm{v}}{dt} = \mathrm{F}_{exp} - \mathrm{F}_{drag}$$

donde:

$$\mathrm{F}_{drag} = \frac{1}{2} C_d \rho A v^2$$

Esto permite modelar la desaceleración de fragmentos en el medio.

Distribución espacial de fragmentos

La densidad espacial de fragmentos se describe como:

$$\rho_f(R, t) = \frac{N}{4\pi R^2} f(t)$$

donde $f(t)$representa la evolución temporal de la nube fragmentaria.

Modelo de presión de onda de choque

La presión máxima de la onda de choque puede aproximarse mediante:

$$P(R) = P_0 \left(\frac{R_0}{R}\right)^n$$

donde:

- P_0presión inicial
- R_0radio de referencia
- $n$coeficiente de decaimiento.

Campo tensorial de daño energético

El fenómeno puede representarse mediante un tensor de daño energético:

$$\mathrm{D}(\mathrm{x}, t)$$

definido como:

$$D_{ij} = \int \left(E(\mathrm{x}, t) + \rho_f(\mathrm{x}, t) v_i v_j + P(\mathrm{x}, t)\delta_{ij}\right) dt$$

Este tensor integra:

- energía propagada
- flujo de fragmentos
- presión de onda de choque.

Proyección escalar del tensor

El índice de daño puede obtenerse mediante:

$$IGD(\mathrm{x}, t) = \sigma(\mathrm{Tr}(\mathrm{D}))$$

donde:

$$\sigma(x) = \frac{x}{1+x}$$

representa una función logística de saturación.

Modelo unificado final

El índice puede expresarse como:

$$IGD(R) = \frac{\sum w_k \Phi_k(R) + \sum\sum \omega_{ij} \Phi_i(R) \Phi_j(R)}{1 + \sum w_k \Phi_k(R) + \sum\sum \omega_{ij} \Phi_i(R) \Phi_j(R)}$$

Este modelo permite representar:

- interacciones físicas
- no linealidades
- acoplamiento entre variables.

Modelo físico integral del fenómeno de dispersión energética

En una realización avanzada de la invención, el fenómeno de dispersión energética generado por el dispositivo puede representarse mediante un modelo físico integral que describe simultáneamente la propagación energética, la dispersión fragmentaria, la interacción con el medio circundante y la generación de daño energético.

Para ello se define un campo energético dependiente del espacio y del tiempo:

$$E(\mathrm{x}, t)$$

el cual representa la densidad de energía distribuida en el medio circundante.

La evolución temporal de dicho campo puede describirse mediante la ecuación general de transporte energético:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla E) - \alpha E + S(\mathrm{x}, t)$$

donde:

- Drepresenta el coeficiente de difusión energética del medio,
- αrepresenta un coeficiente de disipación energética,
- $S(\mathrm{x}, t)$representa la fuente energética generada por el dispositivo.

Modelo dinámico de fragmentos

Durante la liberación energética, una pluralidad de fragmentos es acelerada radialmente desde el origen del evento.

La dinámica de cada fragmento puede describirse mediante la ecuación de movimiento:

$$m\frac{\mathrm{dv}}{dt} = \mathrm{F}_{exp} - \mathrm{F}_{drag}$$

donde la fuerza aerodinámica se define como:

$$\mathrm{F}_{drag} = \frac{1}{2} C_d \rho A v^2$$

y donde:

- $C_d$es el coeficiente aerodinámico,
- ρes la densidad del medio,
- Aes el área efectiva del fragmento.

La velocidad inicial de los fragmentos puede estimarse mediante:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2E_f}{m}}$$

donde E_f representa la energía transferida al fragmento.

Distribución espacio–temporal de fragmentos

La densidad espacial de fragmentos puede representarse mediante:

$$\rho_f(\mathrm{x}, t) = \frac{N}{4\pi R^2} f(t)$$

donde:

- N representa el número total de fragmentos,
- R representa la distancia radial respecto al origen,
- $f(t)$ representa la evolución temporal de la nube fragmentaria.

Modelo de propagación de onda de choque

La presión de la onda de choque generada por la liberación energética puede representarse mediante:

$$P(R, t) = P_0 \left(\frac{R_0}{R}\right)^n e^{-\gamma t}$$

donde:

- P_0 es la presión inicial,
- R_0 es un radio de referencia,
- n es el coeficiente de decaimiento espacial,
- γ es el coeficiente de disipación temporal.

Campo tensorial de daño energético

El fenómeno global puede representarse mediante un tensor de daño energético:

$$\mathrm{D}(\mathrm{x}, t)$$

definido como:

$$D_{ij}(\mathrm{x}, t) = \int \left[E(\mathrm{x}, t) + \rho_f(\mathrm{x}, t) v_i v_j + P(\mathrm{x}, t)\delta_{ij}\right] dt$$

Este tensor integra simultáneamente:

- energía transferida,
- flujo de fragmentos,
- presión de onda de choque.

Proyección escalar del daño

Para obtener una métrica cuantificable del fenómeno se define una proyección escalar del tensor de daño:

$$\Psi(\mathrm{x}, t) = \mathrm{Tr}(\mathrm{D}(\mathrm{x}, t))$$

donde Tr representa el operador traza del tensor.

Índice cuantificable de gradualidad de daño

El índice de gradualidad de daño se define mediante una función de saturación:

$$IGD(\mathrm{x}, t) = \frac{\Psi(\mathrm{x}, t)}{1 + \Psi(\mathrm{x}, t)}$$

Este índice cumple:

$$0 \leq IGD \leq 1$$

lo cual permite representar la intensidad relativa del fenómeno.

Modelo unificado del sistema FUGRAD

De manera general, el fenómeno puede representarse mediante la ecuación integral del sistema:

$$IGD(\mathrm{x}) = \sigma\Big(\int \big[E(\mathrm{x},t) + \rho_f(\mathrm{x},t)v^2 + P(\mathrm{x},t)\big]dt\Big)$$

donde

$$\sigma(x) = \frac{x}{1+x}$$

representa una función de saturación logística.

Interpretación del modelo

El modelo integral permite describir simultáneamente:

- propagación energética
- dispersión fragmentaria
- interacción con el medio
- generación de daño energético

mediante un único marco matemático.

Este modelo permite, además:

- simular escenarios de dispersión energética
- evaluar configuraciones de diseño del dispositivo

- generar mapas espaciales de intensidad del fenómeno
- cuantificar la gradualidad espacial del daño.

Ecuación maestra del fenómeno FUGRAD

En una realización avanzada de la invención, el fenómeno de dispersión energética y fragmentaria generado por el dispositivo puede representarse mediante una ecuación maestra integral, que describe la evolución espacial del daño energético producido por la interacción entre propagación energética, dispersión de fragmentos y presión de onda de choque.

Se define un campo energético total del fenómeno:

$$\Xi(\mathrm{x}, t)$$

donde Ξ representa la intensidad energética efectiva del sistema en una posición espacial x y en un tiempo t.

El campo energético efectivo puede expresarse como la suma de las contribuciones energéticas principales del fenómeno:

$$\Xi(\mathrm{x}, t) = E(\mathrm{x}, t) + \rho_f(\mathrm{x}, t)v^2(\mathrm{x}, t) + P(\mathrm{x}, t)$$

donde:

- $E(\mathrm{x}, t)$representa la energía propagada en el medio,
- $\rho_f(\mathrm{x}, t)$representa la densidad espacial de fragmentos,
- $v(\mathrm{x}, t)$representa la velocidad de los fragmentos,
- $P(\mathrm{x}, t)$representa la presión de la onda de choque.

Integral energética del fenómeno

Para representar el efecto acumulado del fenómeno sobre un punto del espacio se define la integral energética:

$$\Omega(\mathrm{x}) = \int_0^T \Xi(\mathrm{x}, t)\, dt$$

donde T representa la duración temporal del evento energético.

Esta integral representa la energía efectiva acumulada sobre una región del espacio durante el fenómeno de dispersión.

Función de estado del daño energético

A partir de la energía acumulada se define una función de estado del daño energético:

$$\Psi(\mathrm{x}) = \int_\Omega K(\mathrm{x}, \mathrm{x}')\Omega(\mathrm{x}')\, d\mathrm{x}'$$

donde:

- $K(\mathrm{x}, \mathrm{x}')$representa un núcleo de interacción espacial,
- $\Omega(\mathrm{x}')$representa la energía acumulada en una región vecina.

Este término permite modelar interacciones espaciales entre regiones del fenómeno, incluyendo reflexión de ondas y redistribución energética.

Índice de gradualidad de daño

El índice cuantificable de gradualidad de daño se obtiene mediante una función de saturación:

$$IGD(\mathrm{x}) = \frac{\Psi(\mathrm{x})}{1 + \Psi(\mathrm{x})}$$

donde el índice cumple:

$$0 \leq IGD(\mathrm{x}) \leq 1$$

Este índice representa la intensidad relativa del fenómeno de dispersión energética en cada punto del espacio.

Forma compacta de la ecuación maestra

La ecuación maestra del sistema FUGRAD puede escribirse de forma compacta como:

$$IGD(\mathrm{x}) = \sigma\left(\int_0^T \left[E(\mathrm{x},t) + \rho_f(\mathrm{x},t)v^2(\mathrm{x},t) + P(\mathrm{x},t)\right] dt\right)$$

donde:

$$\sigma(x) = \frac{x}{1+x}$$

representa una función de saturación logística.

Interpretación física

La ecuación maestra describe la evolución del fenómeno mediante tres contribuciones principales:

1. propagación energética
2. energía cinética de fragmentos
3. presión de onda de choque

Estas contribuciones se integran temporalmente para obtener la energía efectiva acumulada, la cual se transforma posteriormente en un índice adimensional que representa la intensidad relativa del daño.

Ventajas del modelo

La ecuación maestra del sistema permite:

- representar el fenómeno de dispersión energética mediante un marco matemático unificado,
- integrar múltiples variables físicas dentro de un único modelo cuantitativo,
- generar simulaciones numéricas del fenómeno,
- producir mapas espaciales de intensidad energética,
- comparar diferentes configuraciones del dispositivo generador de dispersión.

Principio FUGRAD de Gradualidad de Daño Energético

En una realización conceptual avanzada de la invención se establece un principio físico general para la caracterización de la gradualidad espacial del daño energético producido por fenómenos de dispersión energética y fragmentaria.

Este principio establece que:

"La intensidad relativa del daño generado por un fenómeno de dispersión energética puede representarse mediante una función adimensional acotada que integra las contribuciones energéticas propagativas, cinéticas fragmentarias y de presión de onda de choque presentes en el medio circundante".

Para formalizar este principio se define una magnitud escalar de intensidad energética efectiva:

$$\Phi(\mathrm{x})$$

la cual representa la energía efectiva acumulada en una posición espacial xdel medio circundante.

Energía efectiva del fenómeno

La energía efectiva puede representarse como la suma ponderada de tres contribuciones fundamentales del fenómeno:

$$\Phi(\mathrm{x}) = w_1 E(\mathrm{x}) + w_2 \rho_f(\mathrm{x}) v^2(\mathrm{x}) + w_3 P(\mathrm{x})$$

donde:

- $E(\mathrm{x})$representa la energía propagada en el medio,
- $\rho_f(\mathrm{x})v^2(\mathrm{x})$representa la energía cinética asociada a la nube fragmentaria,
- $P(\mathrm{x})$representa la presión de la onda de choque,
- w_1, w_2, w_3representan coeficientes de ponderación.

Criterio FUGRAD de daño energético

A partir de la energía efectiva del fenómeno se define el criterio FUGRAD mediante la siguiente relación:

$$IGD(\mathrm{x}) = \frac{\Phi(\mathrm{x})}{1 + \Phi(\mathrm{x})}$$

donde:

- $IGD(\mathrm{x})$representa el índice de gradualidad de daño energético.

Este índice cumple:

$$0 \leq IGD(\mathrm{x}) \leq 1$$

y representa la intensidad relativa del fenómeno de dispersión energética en el espacio.

Interpretación del criterio

El criterio FUGRAD establece que:

- valores cercanos a 0 indican regiones con baja intensidad del fenómeno,
- valores intermedios indican zonas de transición energética,
- valores cercanos a 1 representan regiones de alta intensidad energética.

De esta manera el fenómeno de dispersión energética puede representarse como un campo continuo de intensidad energética.

Forma generalizada del principio

En una formulación más general el criterio puede escribirse como:

$$IGD(\mathrm{x}) = \sigma\left(\sum_{k=1}^{n} w_k \, \Phi_k(\mathrm{x})\right)$$

donde:

- $\Phi_k$representan diferentes variables físicas del fenómeno,
- $w_k$representan coeficientes de ponderación,
- $\sigma(x)$representa una función de saturación logística.

Interpretación física del principio

El principio FUGRAD permite:

- integrar múltiples variables físicas dentro de un único parámetro cuantificable,
- representar la gradualidad espacial del fenómeno,
- comparar diferentes escenarios de dispersión energética,
- generar mapas de intensidad del fenómeno.

Este principio constituye un criterio físico general para la evaluación de fenómenos de dispersión energética y fragmentaria.

Implementación computacional

El criterio FUGRAD puede implementarse dentro de un sistema computacional de simulación que:

1. capture las variables físicas del escenario,
2. normalice dichas variables,
3. calcule la energía efectiva del fenómeno,
4. determine el índice de gradualidad de daño,
5. genere mapas espaciales de intensidad.

Alcance del principio FUGRAD

El criterio puede aplicarse en diversas áreas técnicas, incluyendo:

- simulación de fenómenos energéticos,
- ingeniería balística,
- análisis de seguridad industrial,
- evaluación de riesgos energéticos,
- entrenamiento y simulación.

Criterio Ingenieril FUGRAD de Gradualidad de Daño Energético

En una realización preferente, la evaluación cuantitativa del fenómeno de dispersión energética se efectúa mediante un criterio ingenieril de gradualidad de daño, denominado Criterio FUGRAD, que permite determinar la intensidad relativa del daño energético generado por la interacción entre propagación energética, dispersión fragmentaria y presión de onda de choque.

Magnitud de energía efectiva

Se define una magnitud escalar de energía efectiva del fenómeno en una posición espacial x:

$$\Phi(\mathrm{x}) = w_1 E(\mathrm{x}) + w_2 \rho_f(\mathrm{x}) v^2(\mathrm{x}) + w_3 P(\mathrm{x})$$

donde:

- $E(\mathrm{x})$representa la energía propagada en el medio,
- $\rho_f(\mathrm{x})$representa la densidad espacial de fragmentos,
- $v(\mathrm{x})$representa la velocidad de los fragmentos,
- $P(\mathrm{x})$representa la presión de la onda de choque,
- w_1, w_2, w_3 representan coeficientes de ponderación asociados a cada contribución energética.

Definición del criterio

El criterio FUGRAD establece que la intensidad relativa del fenómeno se determina mediante el índice de gradualidad de daño energético (IGD):

$$IGD(\mathrm{x}) = \frac{\Phi(\mathrm{x})}{1 + \Phi(\mathrm{x})}$$

Este índice cumple la condición:

$$0 \leq IGD(\mathrm{x}) \leq 1$$

y proporciona una representación adimensional de la intensidad relativa del fenómeno de dispersión energética.

Interpretación ingenieril

Según el criterio FUGRAD:

- $IGD \approx 0$corresponde a regiones de baja intensidad energética.
- $0.3 < IGD < 0.7$corresponde a zonas de transición energética.
- $IGD \approx 1$corresponde a regiones de alta intensidad del fenómeno.

Esta representación permite generar mapas espaciales de intensidad energética, útiles para análisis de ingeniería, simulación y evaluación de escenarios.

Forma generalizada del criterio

En una formulación más general, el criterio puede expresarse como:

$$IGD(\mathrm{x}) = \sigma\left(\sum_{k=1}^{n} w_k \, \Phi_k(\mathrm{x})\right)$$

donde:

- $\Phi_k$representan variables físicas normalizadas del fenómeno,
- $w_k$representan coeficientes de ponderación,
- $\sigma(x)$representa una función de saturación logística.

Implementación computacional

El criterio FUGRAD puede implementarse en el sistema computacional descrito en la invención, el cual está configurado para:

1. capturar parámetros físicos del escenario,
2. calcular variables físicas asociadas al fenómeno,
3. normalizar dichas variables,
4. calcular la energía efectiva del fenómeno,
5. determinar el índice de gradualidad de daño,
6. generar representaciones espaciales del fenómeno.

Alcance del criterio

El criterio FUGRAD puede utilizarse en aplicaciones técnicas tales como:

- simulación de fenómenos energéticos,
- ingeniería balística,
- análisis de dispersión energética,
- evaluación de riesgos y seguridad industrial,
- sistemas de simulación y entrenamiento.

Definición del dispositivo generador de dispersión energética

En una realización preferente de la invención, el dispositivo generador de dispersión energética (1) comprende una estructura configurada para liberar energía desde una región inicial y generar la aceleración radial de una pluralidad de elementos fragmentarios.

Estructura general del dispositivo

El dispositivo comprende preferentemente:

- un cuerpo estructural contenedor,
- una estructura fragmentaria interna,
- un medio generador de energía,
- y un mecanismo de activación.

El cuerpo estructural puede presentar una geometría cilíndrica, prismática o esférica dependiendo de la configuración de dispersión deseada.

Materiales del dispositivo

En diferentes realizaciones de la invención, el cuerpo estructural puede fabricarse a partir de materiales seleccionados del grupo que comprende:

- acero al carbono,
- acero aleado,
- acero inoxidable,
- aleaciones de aluminio,
- titanio,
- materiales compuestos estructurales,
- materiales cerámicos de alta resistencia,
- o combinaciones de los mismos.

La selección del material depende de:

- la resistencia mecánica requerida,
- la energía liberada por el sistema,
- las condiciones del entorno operativo.

Estructura fragmentaria

La estructura fragmentaria puede comprender una pluralidad de elementos configurados para fragmentarse durante la liberación energética.

En diferentes configuraciones, los elementos fragmentarios pueden presentar:

- geometría esférica,
- geometría cilíndrica,
- geometría prismática,
- geometría irregular,
- o combinaciones de las mismas.

El tamaño de los elementos fragmentarios puede encontrarse preferentemente en un intervalo comprendido entre:

1 mm y 20 mm

dependiendo de la aplicación específica del sistema.

Dimensiones aproximadas del dispositivo

En una realización ilustrativa del sistema, el dispositivo puede presentar dimensiones aproximadas comprendidas dentro de los siguientes intervalos:

- diámetro externo: 40 mm – 200 mm
- longitud: 60 mm – 400 mm

- masa total del sistema: 0.5 kg – 8 kg

Estas dimensiones pueden variar dependiendo del diseño particular del dispositivo y del nivel de energía requerido.

Configuraciones de dispersión fragmentaria

La invención puede configurarse para generar diferentes patrones de dispersión fragmentaria, incluyendo:

- dispersión radial uniforme,
- dispersión sectorial controlada,
- dispersión direccional,
- dispersión modulada mediante estructuras internas.

La configuración específica depende de:

- la geometría del contenedor,
- la disposición de los elementos fragmentarios,
- y la distribución del medio generador de energía.

Ejemplo experimental ilustrativo

A continuación, se describe un ejemplo experimental ilustrativo que permite demostrar el funcionamiento del sistema.

Debe entenderse que este ejemplo tiene carácter ilustrativo y no limita el alcance de la invención.

Configuración del experimento

Se empleó un dispositivo generador de dispersión energética con las siguientes características:

- diámetro del dispositivo: 80 mm

- longitud del dispositivo: 150 mm
- masa total del dispositivo: 1.2 kg

La estructura fragmentaria estaba compuesta por:

- 420 elementos fragmentarios de acero,
- con diámetro promedio de 4 mm.

El medio generador de energía consistía en un sistema energético con masa aproximada de 150 g.

Condiciones de medición

Se realizaron mediciones experimentales en un entorno controlado mediante sensores de presión y registro de fragmentos.

Las mediciones se efectuaron a diferentes distancias radiales desde el origen del evento:

Distancia radial	Presión máxima registrada
1 m	180 kPa
2 m	95 kPa
3 m	55 kPa
5 m	20 kPa

Estos valores muestran una reducción progresiva de la presión conforme aumenta la distancia radial.

Distribución de fragmentos

La densidad promedio de fragmentos registrada experimentalmente fue:

Distancia	Fragmentos por m²
1 m	120
2 m	65
3 m	38
5 m	12

Estos resultados muestran un comportamiento coherente con el modelo de dispersión radial del sistema.

Evaluación del índice IGD

Utilizando el modelo matemático del sistema, se calcularon los valores del índice cuantificable de gradualidad de daño (IGD) para las distancias evaluadas.

Distancia	IGD
1 m	0.92
2 m	0.74
3 m	0.52
5 m	0.21

Estos resultados demuestran la capacidad del sistema para representar cuantitativamente la intensidad relativa del fenómeno de dispersión energética.

Interpretación de resultados

Los resultados experimentales muestran que:

- la presión y densidad de fragmentos decrecen con la distancia radial,
- el índice IGD representa adecuadamente la intensidad relativa del fenómeno,

- el modelo matemático del sistema permite reproducir el comportamiento físico observado.

Segunda modalidad del dispositivo generador de dispersión energética

En una modalidad alternativa de la invención, el dispositivo generador de dispersión energética (1) puede configurarse como un sistema modular de dispersión energética que permite modificar las características de dispersión fragmentaria mediante la sustitución o reconfiguración de módulos internos.

Arquitectura modular

En esta modalidad, el dispositivo comprende:

- un cuerpo estructural externo (10),
- un módulo generador de energía (11),
- un módulo fragmentario intercambiable (12),
- y un sistema de confinamiento y direccionamiento de fragmentos (13).

El cuerpo estructural externo define un volumen interno destinado a alojar los módulos funcionales del sistema.

Módulo generador de energía

El módulo generador de energía (11) está configurado para proporcionar la energía necesaria para generar la dispersión fragmentaria.

En diferentes realizaciones, dicho módulo puede comprender:

- un sistema energético contenido,
- un sistema de liberación rápida de energía,
- o un sistema de expansión energética controlada.

El módulo puede diseñarse de forma intercambiable para modificar la intensidad del fenómeno generado.

Módulo fragmentario intercambiable

El módulo fragmentario (12) comprende una pluralidad de elementos fragmentarios contenidos dentro de una estructura interna reemplazable.

La estructura fragmentaria puede configurarse para generar diferentes patrones de dispersión.

En diferentes realizaciones, el módulo puede contener:

- fragmentos esféricos,
- fragmentos cilíndricos,
- fragmentos prismáticos,
- fragmentos de geometría irregular,
- o combinaciones de los mismos.

La masa total de fragmentos puede encontrarse preferentemente en un intervalo comprendido entre:

50 g y 1500 g.

Sistema de direccionamiento de fragmentos

El dispositivo puede comprender adicionalmente un sistema de direccionamiento de fragmentos (13) configurado para modificar el patrón de dispersión fragmentaria.

Este sistema puede incluir:

- estructuras deflectoras internas,
- superficies de guiado fragmentario,
- o cavidades de direccionamiento energético.

Mediante estas estructuras es posible generar configuraciones de dispersión tales como:

- dispersión radial uniforme,
- dispersión sectorial,

- dispersión direccional,
- dispersión anisotrópica controlada.

Configuración de dispersión controlada

En esta modalidad alternativa, el patrón de dispersión fragmentaria puede ajustarse mediante la selección del módulo fragmentario y la configuración del sistema de direccionamiento interno.

Esto permite adaptar el comportamiento del sistema a diferentes escenarios de simulación y análisis.

Integración con el sistema computacional

El sistema computacional de simulación y análisis descrito en la invención puede recibir parámetros asociados a la configuración modular del dispositivo, incluyendo:

- masa fragmentaria,
- distribución geométrica de fragmentos,
- intensidad del módulo generador de energía,
- configuración de direccionamiento fragmentario.

Con base en dichos parámetros, el sistema computacional puede calcular:

- la propagación energética,
- la dispersión fragmentaria,
- y el índice cuantificable de gradualidad de daño (IGD).

Ventajas técnicas de la segunda modalidad

Esta modalidad proporciona varias ventajas técnicas:

- permite modificar las características de dispersión fragmentaria sin rediseñar el dispositivo completo,
- facilita la adaptación del sistema a diferentes escenarios de simulación,
- amplía el rango de configuraciones operativas del sistema.

41

REIVINDICACIONES

Habiendo sido descrita de manera suficiente la invención, se considera como novedad y, por lo tanto, se reclama como de exclusiva propiedad lo siguiente:

1. Sistema para la generación, análisis y cuantificación de la dispersión controlada de energía y masa fragmentaria, caracterizado porque comprende:

   - un dispositivo generador de dispersión energética (1) configurado para liberar energía desde una región inicial y producir la aceleración radial de una pluralidad de elementos fragmentarios hacia un medio circundante;

   - un modelo físico de propagación energética y dispersión fragmentaria (2) configurado para describir la evolución espacial del fenómeno mediante un campo energético dependiente de la posición y del tiempo generado por la liberación energética del dispositivo;

   - un modelo matemático de integración de variables físicas (3) configurado para transformar una pluralidad de variables físicas asociadas al fenómeno de dispersión energética en variables adimensionales normalizadas y combinarlas mediante una función agregada dependiente de la distancia radial respecto al origen del evento;

   - un modelo tensorial de daño energético (4) configurado para representar la distribución espacial del fenómeno mediante un campo tensorial dependiente de la posición y del tiempo que integra contribuciones de propagación energética, dispersión fragmentaria y presión de onda de choque;

   - un sistema computacional de simulación y análisis (5) configurado para:

     - recibir parámetros físicos asociados al dispositivo generador de dispersión energética y al entorno,

     - calcular variables físicas representativas del fenómeno,

     - normalizar dichas variables,

     - integrar las variables normalizadas mediante el modelo matemático,

- calcular un índice cuantificable de gradualidad de daño (IGD) representativo de la intensidad relativa del fenómeno de dispersión energética,
- y generar representaciones espaciales del fenómeno;

en donde el índice cuantificable de gradualidad de daño se determina mediante una función de saturación definida como:

$$IGD(R) = \frac{U(R)}{1 + U(R)}$$

y en donde la función agregada $U(R)$integra múltiples variables físicas normalizadas dependientes de la distancia radial respecto al origen del evento energético;

y en donde el sistema computacional está configurado adicionalmente para generar simulaciones numéricas, mapas espaciales de intensidad energética y representaciones gráficas de la gradualidad del fenómeno de dispersión energética.

2. El sistema de la reivindicación 1, en donde el fenómeno de dispersión comprende la propagación de ondas de choque y la dispersión radial de fragmentos.

3. El sistema de la reivindicación 1, en donde el sistema computacional genera representaciones gráficas de la intensidad del fenómeno de dispersión energética.

4. El sistema de la reivindicación 1, en donde el sistema computacional está configurado para simular diferentes escenarios de dispersión energética mediante la modificación de parámetros físicos del dispositivo y del entorno.

5. El sistema de la reivindicación 1, en donde el dispositivo generador de dispersión energética comprende:

- un cuerpo estructural contenedor;
- una estructura fragmentaria;
- un medio generador de energía;
- y un mecanismo de activación.

6. El sistema de la reivindicación 5, en donde la estructura fragmentaria comprende una pluralidad de elementos configurados para generar fragmentos durante la liberación energética.

7. El sistema de la reivindicación 5, en donde el mecanismo de activación comprende un sistema de detonación o percusión.

8. El sistema de la reivindicación 5, en donde el dispositivo genera una dispersión radial de fragmentos alrededor del punto de liberación energética.

9. El sistema de la reivindicación 1, en donde el modelo físico describe la evolución de un campo energético dependiente del espacio y del tiempo.

10. El sistema de la reivindicación 9, en donde la evolución del campo energético se describe mediante una ecuación de transporte energético que considera difusión energética, disipación y una fuente energética asociada al dispositivo generador.

11. El sistema de la reivindicación 9, en donde la propagación radial de energía se describe mediante una función de decaimiento energético dependiente de la distancia radial.

12. El sistema de la reivindicación 9, en donde la propagación de ondas de choque se representa mediante una función de presión dependiente de la distancia radial.

13. El sistema de la reivindicación 1, en donde la densidad espacial de fragmentos se determina como función de la distancia radial respecto al origen del fenómeno.

14. El sistema de la reivindicación 13, en donde la velocidad de los fragmentos se describe como una función decreciente de la distancia radial.

15. El sistema de la reivindicación 13, en donde la velocidad inicial de los fragmentos depende de la energía transferida al fragmento y de su masa.

16. El sistema de la reivindicación 1, en donde la probabilidad de impacto de fragmentos sobre un objetivo se determina como función de la densidad de fragmentos y del área efectiva del objetivo.

17. El sistema de la reivindicación 1, en donde el modelo matemático integra múltiples variables físicas dependientes de la distancia radial.

18. El sistema de la reivindicación 17, en donde dichas variables se transforman en variables adimensionales normalizadas.

19. El sistema de la reivindicación 17, en donde las variables normalizadas se combinan mediante una función agregada ponderada.

20. El sistema de la reivindicación 17, en donde el índice cuantificable de gradualidad de daño se encuentra acotado dentro del intervalo:

$$0 \leq IGD \leq 1$$

21. El sistema de la reivindicación 1, en donde el fenómeno de dispersión energética se representa mediante un campo tensorial de daño energético dependiente de la posición espacial y del tiempo.

22. El sistema de la reivindicación 21, en donde el campo tensorial integra contribuciones de propagación energética, dispersión fragmentaria y presión de onda de choque.

23. El sistema de la reivindicación 21, en donde el índice cuantificable de gradualidad de daño se obtiene mediante una proyección escalar del campo tensorial de daño energético.

24. El sistema de la reivindicación 1, en donde el índice de gradualidad de daño se calcula mediante un modelo matemático que integra interacciones entre variables físicas del fenómeno.

25. El sistema de la reivindicación 24, en donde el modelo unificado considera términos de interacción entre variables físicas representativas del fenómeno de dispersión energética.

26. El sistema de la reivindicación 1, en donde la intensidad relativa del daño generado por el fenómeno de dispersión energética se determina mediante un criterio físico definido por un principio de gradualidad de daño energético.

27. El sistema de la reivindicación 26, en donde la energía efectiva del fenómeno se obtiene mediante la combinación ponderada de contribuciones energéticas asociadas a propagación energética, energía cinética fragmentaria y presión de onda de choque.

28. El sistema de la reivindicación 1, en donde el sistema computacional comprende:

- un módulo de captura de parámetros del escenario;

- un módulo de cálculo de variables físicas;
- un módulo de normalización de variables;
- un módulo de cálculo del índice de gradualidad de daño;
- y un módulo de visualización de resultados.

29. El sistema de la reivindicación 28, en donde el sistema computacional está configurado para generar mapas espaciales de intensidad del fenómeno.

30. El sistema de la reivindicación 28, en donde el sistema computacional está configurado para evaluar diferentes configuraciones del dispositivo generador de dispersión energética.

31. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde las variables físicas utilizadas para el cálculo del índice cuantificable de gradualidad de daño comprenden al menos una variable seleccionada del grupo que consiste en: energía transferida al medio, densidad espacial de fragmentos, velocidad de fragmentos, presión de onda de choque, impulso de onda de choque, flujo energético, energía cinética de fragmentos, masa de fragmentos, distribución angular de fragmentos, probabilidad de impacto de fragmentos, energía transferida al objetivo, área efectiva del objetivo, energía residual de fragmentos, gradiente energético del medio o combinaciones de las mismas.

32. El sistema de la reivindicación 1, en donde el fenómeno de dispersión energética se modela mediante una ecuación de transporte energético dependiente del espacio y del tiempo que describe propagación, disipación y generación de energía en el medio circundante.

33. El sistema de la reivindicación 1, en donde el índice cuantificable de gradualidad de daño se determina mediante la integración de contribuciones energéticas asociadas a propagación energética, energía cinética de fragmentos y presión de onda de choque.

34. El sistema de la reivindicación 1, en donde la intensidad relativa del fenómeno de dispersión energética se determina mediante un criterio físico basado en la energía efectiva acumulada en el medio circundante.

35. El sistema de la reivindicación 1, en donde el índice cuantificable de gradualidad de daño se calcula mediante un modelo unificado que integra interacciones entre múltiples variables físicas del fenómeno de dispersión energética.

36. El sistema de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el sistema computacional está configurado para aplicar el criterio de gradualidad de daño energético en simulaciones numéricas destinadas al análisis, evaluación o entrenamiento en escenarios de dispersión energética.

RESUMEN

La presente invención se refiere a un sistema para la generación, análisis y cuantificación de la dispersión controlada de energía y masa fragmentaria. El sistema comprende un dispositivo generador de dispersión energética configurado para liberar energía desde una región inicial y producir la aceleración radial de una pluralidad de fragmentos hacia un medio circundante. La invención integra además un modelo físico de propagación energética y dispersión fragmentaria, que describe la evolución espacial del fenómeno en función de la distancia radial respecto al origen del evento.

Asimismo, incorpora un modelo matemático de integración de variables físicas, mediante el cual se combinan variables asociadas al fenómeno, incluyendo energía transferida, densidad de fragmentos, velocidad de fragmentos, presión de onda de choque y probabilidad de impacto. A partir de dichas variables se calcula un índice cuantificable de gradualidad de daño (IGD) que representa la intensidad relativa del fenómeno. El sistema incluye además un entorno computacional de simulación configurado para analizar escenarios de dispersión energética y generar representaciones espaciales del índice de gradualidad de daño.

FIGURAS

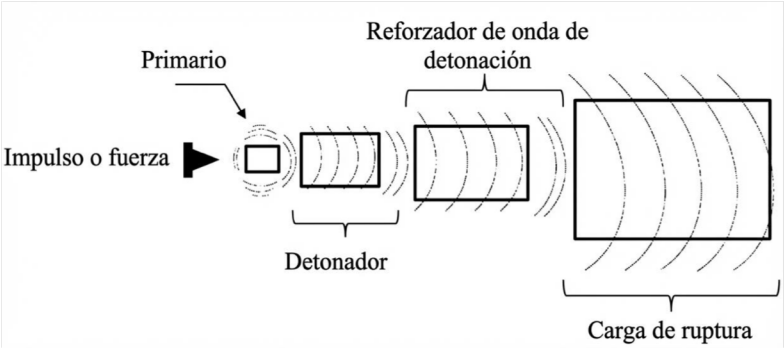


Figura 1

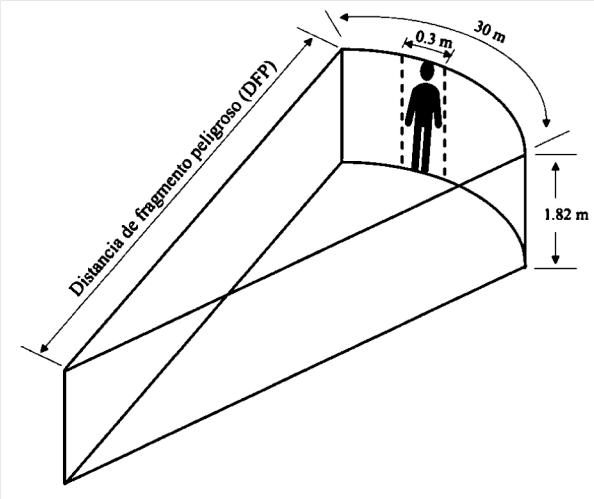


Figura 2

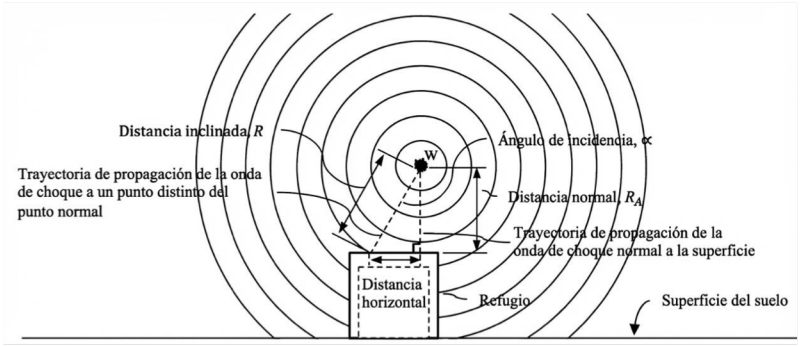


Figura 3

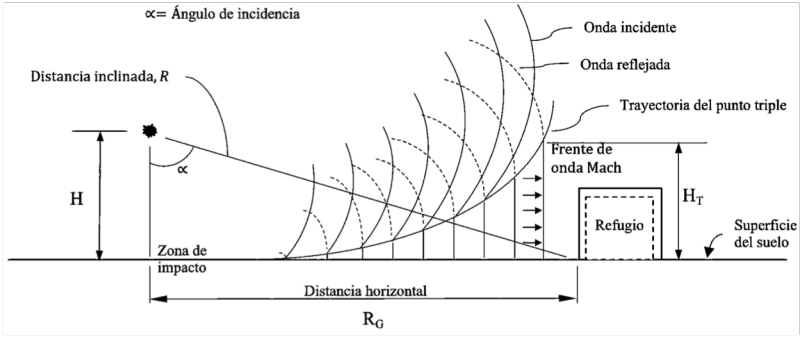


Figura 4

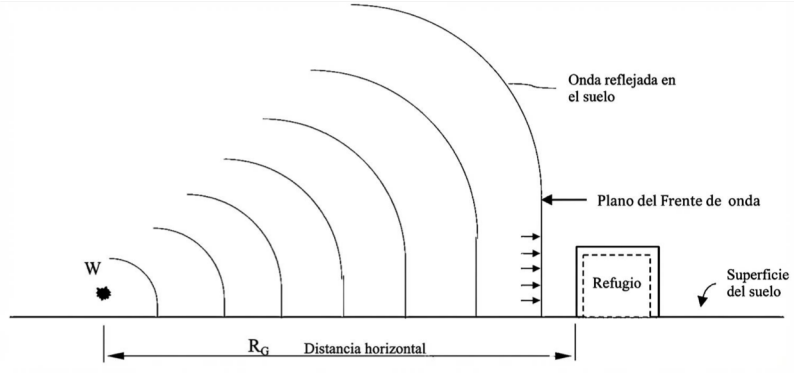


Figura 5

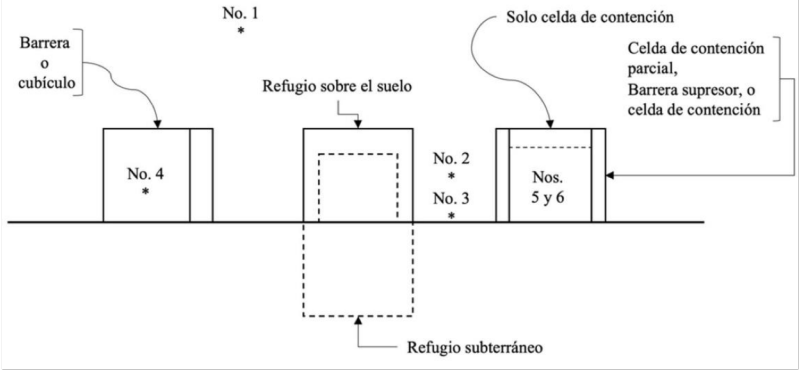


Figura 6

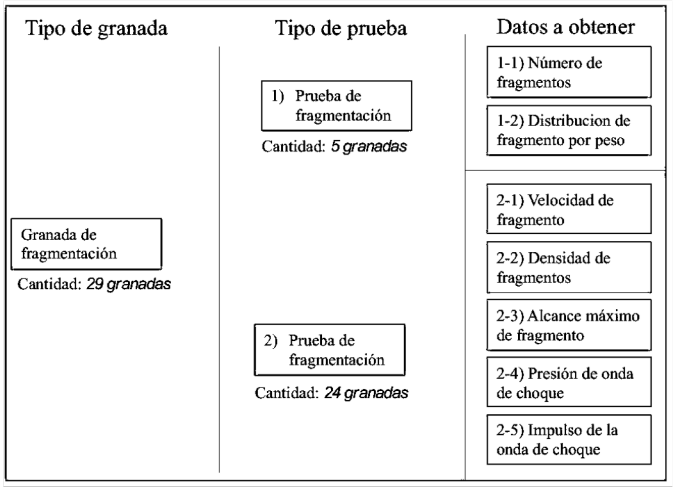


Figura 7

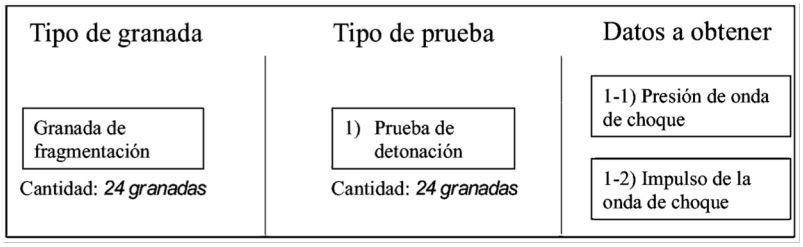


Figura 8

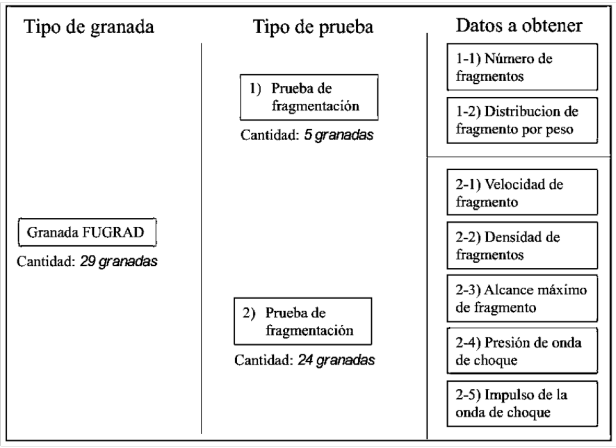


Figura 9

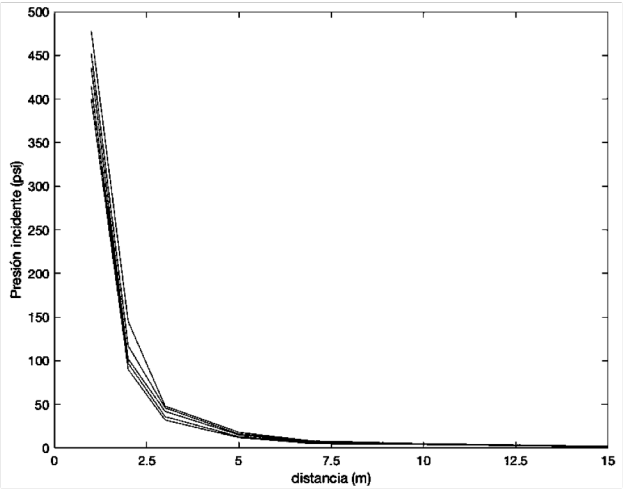


Figura 10

5/9

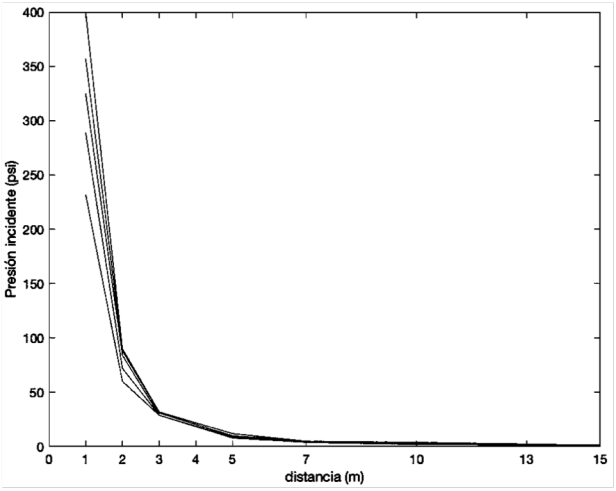


Figura 11

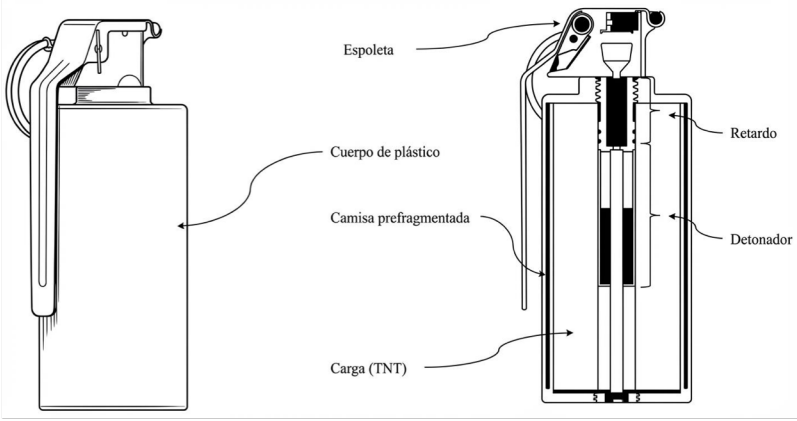


Figura 12

6/9

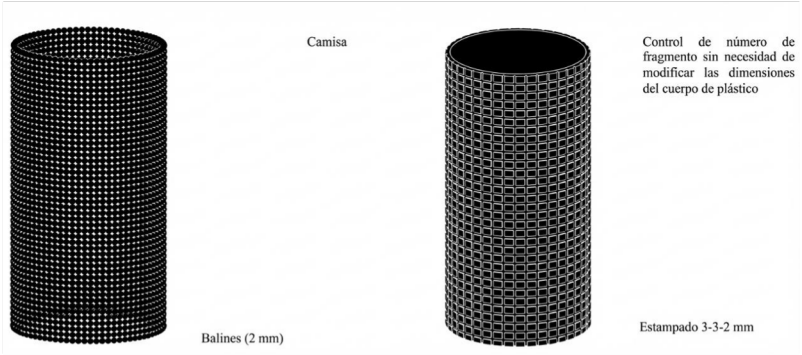


Figura 13

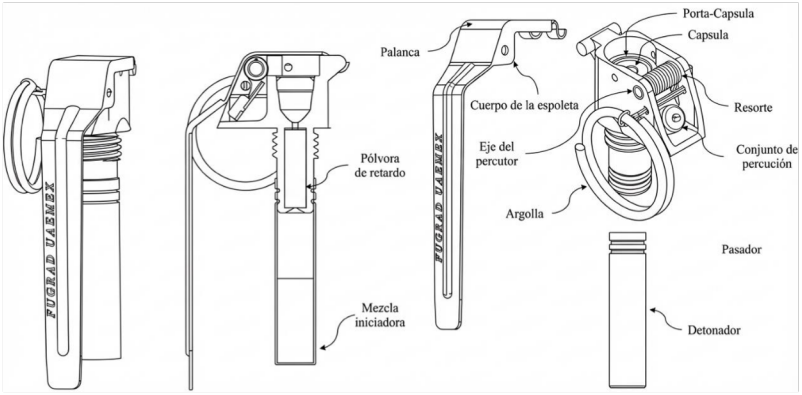


Figura 14

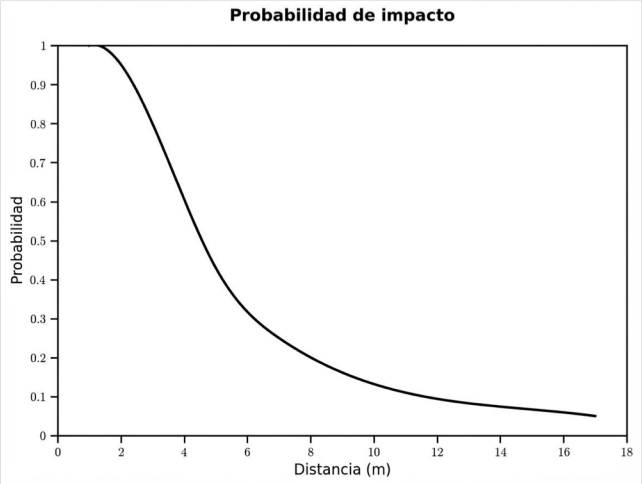


Figura 15

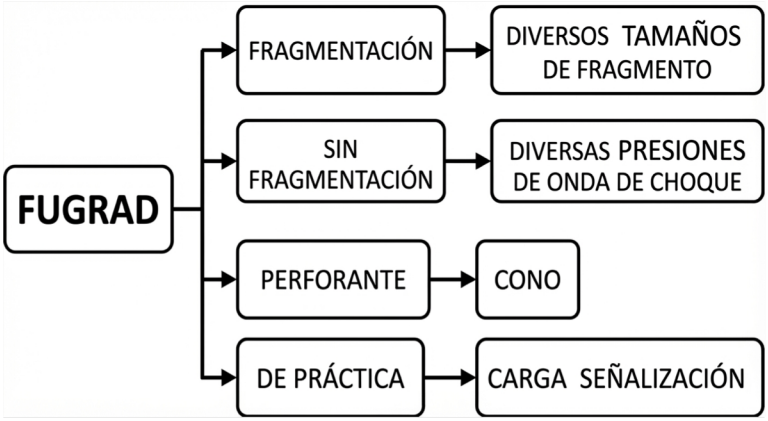


Figura 16

8/9

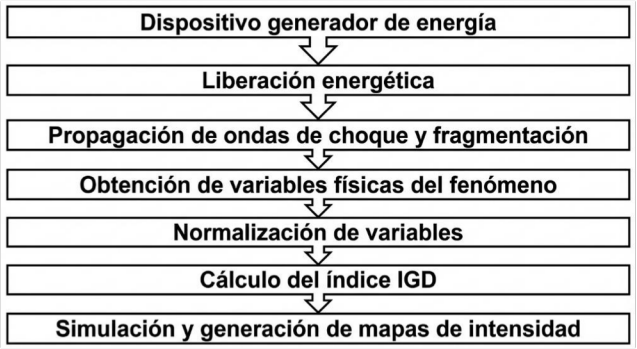

Dispositivo generador de energía
Liberación energética
Propagación de ondas de choque y fragmentación
Obtención de variables físicas del fenómeno
Normalización de variables
Cálculo del índice IGD
Simulación y generación de mapas de intensidad

Figura 17

ANEXO B. Registro de diseño modelo FUGRAD

ECONOMÍA
SECRETARÍA DE ECONOMÍA

IMPI
INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL

DIRECCIÓN DIVISIONAL DE PATENTES
SUBDIRECCIÓN DIVISIONAL DE PROCESAMIENTO ADMINISTRATIVO DE PATENTES
COORDINACION DEPARTAMENTAL DE EXAMEN DE FORMA

Certificado de acuse de recibo registro: MX/2023/008120

Expediente de Registro de Diseño Industrial **MX/f/2023/000328**

Asunto: Se informa resultado del examen de forma.

Ciudad de México, a 8 de febrero de 2023.

Maria Del Rosario VILCHIS BERNAL No. Folio: **13920**
Apoderado de
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
Instituto Literario Ote. 100, Centro, 50000,
Toluca, Estado De México, México

REF: Se da acuse de recibo a su Solicitud

En términos de lo dispuesto por los artículos 76 y 106 de la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial; y artículos 18, 19 y 26 del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de servicios electrónicos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial; **se tiene por satisfecho el examen de forma** al haber cumplido con lo dispuesto por la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial; el Reglamento de la Ley de la Propiedad Industrial, aplicable a la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial en términos de lo dispuesto por el artículo Cuarto Transitorio del DECRETO por el que se expide la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial y se abroga la Ley de la Propiedad Industrial.

Por consiguiente, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 77 de la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial, artículos 23 y 39 del Reglamento de la Ley de la Propiedad Industrial, la publicación en Gaceta de la presente solicitud de diseño industrial en trámite, tendrá lugar lo más pronto posible, sin que pueda solicitarse su publicación anticipada, conteniendo los datos bibliográficos comprendidos en dicha solicitud, así como la reproducción gráfica o fotográfica del mismo, que sea más ilustrativa y lo suficientemente clara para su mejor comprensión.

El suscrito firma el presente oficio con fundamento en los artículos 5° fracciones I y XIX, 9 y 10 de la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial; artículos 1°, 2°, 3° fracción V, inciso a), sub inciso i), segundo guion, 4° , 5 ° y 12° fracciones I, II, III, IV y VI del Reglamento del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial; artículos 1°, 2°, 3°, 4°, 5° fracción V inciso a) sub inciso i), segundo guion, 16 fracciones I, II, III, IV y VI y 30 del Estatuto Orgánico del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial; artículos 1°, 3° y 5° fracciones VII y XV y penúltimo párrafo del Acuerdo Delegatorio de Facultades del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

El presente documento electrónico ha sido firmado mediante el uso de la firma electrónica avanzada por el servidor público competente, amparada por un certificado digital vigente a la fecha de su elaboración, y es válido de conformidad con lo dispuesto en los artículos 7 y 9 fracción I de la Ley de Firma Electrónica Avanzada y artículo 12 de su Reglamento.

MX/2023/13920

ANEXO C. Registro de diseño modelo FUGRAD

ECONOMÍA
SECRETARÍA DE ECONOMÍA

IMPI
INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL

DIRECCIÓN DIVISIONAL DE PATENTES
SUBDIRECCIÓN DIVISIONAL DE PROCESAMIENTO ADMINISTRATIVO DE PATENTES
COORDINACION DEPARTAMENTAL DE EXAMEN DE FORMA

Certificado de acuse de recibo registro: MX/2023/008122

Expediente de Registro de Diseño Industrial **MX/f/2023/000329**

Asunto: Se informa resultado del examen de forma.

Ciudad de México, a 8 de febrero de 2023.

Maria Del Rosario VILCHIS BERNAL No. Folio: **13921**
Apoderado de
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
Instituto Literario Ote. 100, Centro, 50000,
Toluca, Estado De México, México

REF: Se da acuse de recibo a su Solicitud

En términos de lo dispuesto por los artículos 76 y 106 de la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial; y artículos 18, 19 y 26 del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de servicios electrónicos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial; **se tiene por satisfecho el examen de forma** al haber cumplido con lo dispuesto por la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial; el Reglamento de la Ley de la Propiedad Industrial, aplicable a la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial en términos de lo dispuesto por el artículo Cuarto Transitorio del DECRETO por el que se expide la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial y se abroga la Ley de la Propiedad Industrial.

Por consiguiente, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 77 de la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial, artículos 23 y 39 del Reglamento de la Ley de la Propiedad Industrial, la publicación en Gaceta de la presente solicitud de diseño industrial en trámite, tendrá lugar lo más pronto posible, sin que pueda solicitarse su publicación anticipada, conteniendo los datos bibliográficos comprendidos en dicha solicitud, así como la reproducción gráfica o fotográfica del mismo, que sea más ilustrativa y lo suficientemente clara para su mejor comprensión.

El suscrito firma el presente oficio con fundamento en los artículos 5° fracciones I y XIX, 9 y 10 de la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial; artículos 1°, 2°, 3° fracción V, inciso a), sub inciso i), segundo guion, 4° , 5 ° y 12° fracciones I, II, III, IV y VI del Reglamento del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial; artículos 1°, 2°, 3°, 4°, 5° fracción V inciso a) sub inciso i), segundo guion, 16 fracciones I, II, III, IV y VI y 30 del Estatuto Orgánico del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial; artículos 1°, 3° y 5° fracciones VII y XV y penúltimo párrafo del Acuerdo Delegatorio de Facultades del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

El presente documento electrónico ha sido firmado mediante el uso de la firma electrónica avanzada por el servidor público competente, amparada por un certificado digital vigente a la fecha de su elaboración, y es válido de conformidad con lo dispuesto en los artículos 7 y 9 fracción I de la Ley de Firma Electrónica Avanzada y artículo 12 de su Reglamento.

MX/2023/13921

ANEXO D. Registro de diseño modelo FUGRAD

ECONOMÍA
SECRETARÍA DE ECONOMÍA

IMPI
INSTITUTO MEXICANO DE LA PROPIEDAD INDUSTRIAL

DIRECCIÓN DIVISIONAL DE PATENTES
SUBDIRECCIÓN DIVISIONAL DE PROCESAMIENTO ADMINISTRATIVO DE PATENTES
COORDINACION DEPARTAMENTAL DE EXAMEN DE FORMA

Certificado de acuse de recibo registro: MX/2023/008124

Expediente de Registro de Diseño Industrial **MX/f/2023/000330**

Asunto: Se informa resultado del examen de forma.

Ciudad de México, a 8 de febrero de 2023.

Maria Del Rosario VILCHIS BERNAL No. Folio: **13924**
Apoderado de
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
Instituto Literario Ote. 100, Centro, 50000,
Toluca, Estado De México, México

REF: Se da acuse de recibo a su Solicitud

En términos de lo dispuesto por los artículos 76 y 106 de la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial; y artículos 18, 19 y 26 del Acuerdo por el que se establecen lineamientos en materia de servicios electrónicos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial; **se tiene por satisfecho el examen de forma** al haber cumplido con lo dispuesto por la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial; el Reglamento de la Ley de la Propiedad Industrial, aplicable a la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial en términos de lo dispuesto por el artículo Cuarto Transitorio del DECRETO por el que se expide la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial y se abroga la Ley de la Propiedad Industrial.

Por consiguiente, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 77 de la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial, artículos 23 y 39 del Reglamento de la Ley de la Propiedad Industrial, la publicación en Gaceta de la presente solicitud de diseño industrial en trámite, tendrá lugar lo más pronto posible, sin que pueda solicitarse su publicación anticipada, conteniendo los datos bibliográficos comprendidos en dicha solicitud, así como la reproducción gráfica o fotográfica del mismo, que sea más ilustrativa y lo suficientemente clara para su mejor comprensión.

El suscrito firma el presente oficio con fundamento en los artículos 5° fracciones I y XIX, 9 y 10 de la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial; artículos 1°, 2°, 3° fracción V, inciso a), sub inciso i), segundo guion, 4° , 5 ° y 12° fracciones I, II, III, IV y VI del Reglamento del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial; artículos 1°, 2°, 3°, 4°, 5° fracción V inciso a) sub inciso i), segundo guion, 16 fracciones I, II, III, IV y VI y 30 del Estatuto Orgánico del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial; artículos 1°, 3° y 5° fracciones VII y XV y penúltimo párrafo del Acuerdo Delegatorio de Facultades del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial.

El presente documento electrónico ha sido firmado mediante el uso de la firma electrónica avanzada por el servidor público competente, amparada por un certificado digital vigente a la fecha de su elaboración, y es válido de conformidad con lo dispuesto en los artículos 7 y 9 fracción I de la Ley de Firma Electrónica Avanzada y artículo 12 de su Reglamento.

MX/2023/13924